

การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ

PRODUCTION OF BIODIESEL FROM PALM OIL IN A TUBULAR REACTOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1878-1

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ

PRODUCTION OF BIODIESEL FROM PLAM OIL IN A TUBULAR REACTOR



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... **60501**  
วัน,เดือน,ปี..... - 3 ก.ค. 2549

b. 11512224  
.....  
.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1878-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# PRODUCTION OF BIODIESEL FROM PLAM OIL IN A TUBULAR REACTOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN PETROCHEMICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005

ISBN 974-15-1878-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง	การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ
นักศึกษา	นางสาวสุริยาพร มาลัย
รหัสประจำตัว	43061208
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมปิโตรเคมี
พ.ศ.	2548
ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษา ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มและเมทานอล โดยมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีปริมาตรรวม 0.3 ลิตร ที่ได้ติดตั้งเครื่องผสมไ้การเคลื่อนที่ โดยศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1 ต่อ 6 และ 1 ต่อ 4.5 Superficial velocity 6.8 13.6 20.4 และ 27.2 เมตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 0.5% และ 1% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำมันปาล์ม อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพคือ ที่ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 1% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำมันปาล์ม Superficial velocity 20.4 เมตรต่อชั่วโมง เวลาที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 15 นาที และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งปริมาณของน้ำมันดีเซลชีวภาพในผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้เท่ากับ 98.1% โดยน้ำหนัก

Thesis Title	Production of Biodiesel from Palm Oil in a Tubular Reactor
Student	Miss Suriyaporn Malai
Student ID.	43061208
Degree	Master of Engineering
Programme	Petrochemical Engineering
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Prakob Kitchaiya

## ABSTRACT

This thesis proposes a study conditions for biodiesel production from palm oil and methanol by transesterification reaction in a 0.3 litres tubular reactor. Potassium hydroxide was used as the catalyst. There was a static mixer installed inside the reactor in order to enhance the mixing between oil and alcohol. The experimental conditions were palm oil and methanol molar ratio at 1: 6 and 1:4.5, Superficial velocity were 6.7, 13.6, 20.4 and 27.2 m/h, catalyst concentrations were 0.5% and 1% weight by volume of palm oil and temperature at 50 and 60 °C, respectively. It was found that catalyst concentration at 1% weight by volume, Superficial velocity 20.4 m/h, Space time at 15 minutes and temperature at 60 °C. Methyl ester yield was 98.1% by weight.

## II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากจากความช่วยเหลือของบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ. ดร. ประกอบ กิจไธยา ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษา อีกทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลืออย่างมากมายในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณชัชวีร์ ไทยสุชาติ สำหรับคำปรึกษาที่ดี และให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และนักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่น้องทุกคน สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือให้ผู้วิจัยบรรลุในการต่อสู้กับอุปสรรคต่างๆ รวมทั้งเป็นแรงผลักดันให้งานวิจัยนี้สำเร็จ

ขอผิดพลาดประการใดที่มีในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้เขียนขอน้อมรับความผิดพลาดนั้นไว้แต่เพียงผู้เดียว

สุริยาพร มาลัย

# 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.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการทำวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 น้ำมันดีเซล.....	4
2.1.1 ชนิดของน้ำมันดีเซล.....	4
2.1.2 สมบัติที่สำคัญของน้ำมันดีเซล.....	5
2.2 ความหมายของน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	7
2.3 น้ำมันพืชที่ใช้ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	8
2.3.1 ลักษณะและโครงสร้างของน้ำมัน.....	8
2.3.2 สมบัติของน้ำมันพืชในการเป็นเชื้อเพลิง.....	9
2.3.3 ปัญหาของน้ำมันพืชในการเป็นเชื้อเพลิง.....	9
2.4 การใช้ออกซิเจนของไตรกลีเซอไรด์ทดแทนน้ำมันดีเซล.....	10
2.5 น้ำมันดีเซลชีวภาพที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....	11
2.5.1 มาตรฐานของน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	12
2.5.2 กระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	14
2.6 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อก.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่.....	18
2.7.1 หลักการผสมของเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ (Mixing principles).....	19
2.7.2 การประยุกต์ใช้เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่.....	20
บทที่ 3 การทดลอง.....	22
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	22
3.1.1 อุปกรณ์.....	22
3.1.2 สารเคมี.....	22
3.2 สภาพะที่ทำการทดลอง.....	22
3.3 วิธีการทดลอง.....	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	25
4.1 ผลการทดลอง.....	25
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	25
4.2.1 ผลของ Space time และ Reynolds number ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์.....	25
4.2.2 ผลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์.....	28
4.2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์.....	28
4.3 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	30
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	33
เอกสารอ้างอิง.....	34
ภาคผนวก ตารางแสดงผลการทดลอง.....	36
ประวัติผู้เขียน.....	40

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ความต้องการใช้พลังงานในประเทศ.....	1
1.2 การผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย.....	2
2.1 มาตรฐานของน้ำมันดีเซลในประเทศไทย.....	5
2.2 คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันชนิดต่างๆ.....	7
2.3 คุณสมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ.....	8
2.4 สมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช.....	9
2.5 มาตรฐานน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	12
2.6 ข้อกำหนดมาตรฐานน้ำมันดีเซลชีวภาพในแต่ละประเทศ.....	13
2.7 การเลือกใช้ไตรกลีเซอไรด์ชนิดต่างๆ เพื่อผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในแต่ละประเทศ.....	14
ก-1 เปอร์เซนต์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อ เมทานอล 1:6.....	36
ก-2 เปอร์เซนต์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อ เมทานอล 1:4.5.....	38

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมัน.....	8
2.2 สมการเคมีของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	11
2.3 ลำดับชั้นของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	11
2.4 แผนภูมิการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยกระบวนการแบบกะ.....	15
2.5 กระบวนการปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบต่อเนื่องในระดับโรงงานต้นแบบ.....	16
2.6 ลักษณะของเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่และลักษณะของชิ้นส่วนภายใน.....	19
2.7 การผสมของเหลวโดยเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่.....	19
2.8 การละลายก๊าซในของเหลวด้วยเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่.....	19
2.9 ลักษณะการไหลแบบการแบ่งส่วนการไหล.....	20
2.10 ลักษณะการไหลแบบการผสมในแนวรัศมี.....	20
2.11 ลักษณะการไหลแบบการเปลี่ยนทิศทางการไหล.....	20
2.12 การผสมของของเหลวที่มีความหนืดต่ำภายในเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่.....	21
2.13 การแพร่กระจายของเหลวภายในเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่.....	21
2.14 การผสมของของเหลวที่มีความหนืดสูงภายในเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่.....	21
3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ สำหรับสังเคราะห์ไบโอดีเซล.....	24
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Space time และ เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ (โดยน้ำหนัก) ที่อัตราส่วน น้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:6 โดยโมล ณ อุณหภูมิใดๆ (ก) 50 องศาเซลเซียส (ข) 60 องศา เซลเซียส.....	26
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Space time และ เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ (โดยน้ำหนัก) ที่อัตราส่วนน้ำมัน ปาล์มต่อเมทานอล 1:4.5 โดยโมล ณ อุณหภูมิใดๆ (ก) 50 องศาเซลเซียส (ข) 60 องศาเซลเซียส.....	27
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Superficial velocity และ เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ (โดยน้ำหนัก) ที่ สเปซไทม์ 15 นาที อัตราส่วนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:6 โดยโมล อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรน้ำมันปาล์ม.....	28
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปซไทม์ และเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ (โดยน้ำหนัก) ณ อุณหภูมิใดๆ (ก) 50 องศาเซลเซียส (ข) 60 องศาเซลเซียส.....	29
4.5 แสดงลักษณะของของเหลวที่ไหลออกจาก Static mixer.....	30

## VII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงลักษณะของของเหลวที่ไหลภายในส่วนทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมในช่วงที่ 1 (ระยะทาง 0.1 - 1.5 เมตร).....	31
4.7 แสดงลักษณะของของเหลวที่ไหลภายในส่วนทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมในช่วงที่ 2 (ระยะทาง 1.5 - 3.0 เมตร).....	31
4.8 แสดงลักษณะของของเหลวที่ไหลภายในส่วนทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมในช่วงที่ 3 (ระยะทาง 3.0 - 4.5 เมตร).....	32
4.9 แสดงลักษณะของของเหลวที่ไหลภายในส่วนทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมในช่วงที่ 4 (ระยะทาง 4.5 - 6 เมตร).....	32



### VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปีพ.ศ. 2546 ประเทศไทยมีปริมาณการใช้ น้ำมันสำเร็จรูปเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะน้ำมันดีเซลมีการใช้มากถึง 48 ล้านลิตรต่อวัน คิดเป็น 49.6 % ของความต้องการใช้ภายในประเทศ [1] ซึ่งมีปริมาณการใช้สูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ราคาน้ำมันเชื้อเพลิง ก็ปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งมีความต้องการเสริมสร้างความมั่นคงในด้านพลังงานของประเทศ รวมถึงความต้องการลดมลพิษเพื่อให้สิ่งแวดล้อมดีขึ้น ดังนั้นหากประเทศไทยสามารถผลิตและใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพจากพืชน้ำมันหรือแหล่งไตรกลีเซอไรด์ที่มีอยู่หรือของเหลือใช้ภายในประเทศจะทำให้ประเทศไทยลดการพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศ อันจะส่งผลดีต่อความมั่นคงทางด้านพลังงานและเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ

ตารางที่ 1.1 ความต้องการใช้พลังงานในประเทศ

ปี พ.ศ.	2540	2541	2542	2543	2544	2545	2546
น้ำมันดีเซล (DIESEL)	42.9%	41.3%	41.4%	42.1%	43.7%	44.8%	49.6%
น้ำมันเตา (FUEL OIL)	22.3%	21.5%	21.5%	17.9%	13.0%	13.3%	13.3%
น้ำมันเบนซิน (GASOLINE)	18.0%	19.4%	19.0%	19.0%	19.7%	20.4%	18.7%
น้ำมันเครื่องบิน (JET FUEL)	8.7%	9.0%	8.9%	9.8%	10.7%	10.3%	10.1%
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG)	8.0%	8.7%	9.0%	11.0%	12.7%	10.8%	8.2%
น้ำมันก๊าด (KEROSENE)	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.1%

ที่มา : สำนักนโยบายและแผนพลังงาน

การใช้น้ำมันพืชกับเครื่องยนต์ดีเซลมีการทดลองใช้ตั้งแต่สงครามโลกครั้งที่ 2 แต่เนื่องจากสมัยนั้นน้ำมันปิโตรเลียมยังมีราคาถูก ประกอบกับมีปัญหาเกิดขึ้นมากมาย เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำมันพืชและน้ำมันดีเซลมีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลให้จุดติดได้ยากและการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ดังนั้นการใช้น้ำมันพืชโดยตรงกับเครื่องยนต์แบบเดิมจึงไม่เหมาะสม ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาใช้ผลิตผลทางการเกษตรในรูปแบบต่างๆ ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานกับเครื่องยนต์มากขึ้น เช่น การผลิตแก๊สโซฮอล ตลอดจนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ (Biodiesel) ทั้งนี้เพื่อเป็นการนำทรัพยากรมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์อย่างคุ้มค่า และยังเป็นการรักษาเงินตราภายในประเทศ อีกทั้งความต้องการเสริมสร้างความมั่นคงในด้านพลังงานของประเทศ รวมถึงความต้องการลดมลพิษเพื่อให้สิ่งแวดล้อมดีขึ้น

โดยสากลคำว่าไบโอดีเซล หมายถึง เมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ของน้ำมันหรือไขมันของพืชและสัตว์ (ไตรกลีเซอไรด์) ซึ่งสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอลหรือเอทานอล โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นต่าง กรด หรือเอนไซม์ ไบโอดีเซลที่ได้จากการทำปฏิกิริยาจะมีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม แต่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ดีตามธรรมชาติ ไม่มีองค์ประกอบของซัลเฟอร์ ลดปริมาณเขม่าและควันดำได้เป็นอย่างดี

สำหรับในประเทศไทยเริ่มมีการวิจัยเกี่ยวกับน้ำมันไบโอดีเซลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524 โดยใช้น้ำมันจากเมล็ดพืชน้ำมัน เช่น น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันเมล็ดสบู่ดำ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม รวมถึงเอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม เป็นพลังงานทดแทนในเครื่องยนต์ดีเซล ดังแสดงในตารางที่ 1.2 สำหรับในต่างประเทศ ได้มีการวิจัยน้ำมันพืชเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลอย่างต่อเนื่อง โดยใช้น้ำมันพืชจากพืชน้ำมันที่มีการเพาะปลูกมากในแต่ละประเทศ จนถึงปัจจุบันได้มีการตั้งโรงงานเพื่อผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากเมล็ดเรพในกลุ่มประเทศยุโรป และโรงงานผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันปาล์มในประเทศมาเลเซีย

ตารางที่ 1.2 การผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย [2]

บริษัท/หน่วยงาน	วัตถุดิบ	กำลังการผลิต (ลิตร/วัน)	ระบบการผลิต
บริษัทราชาไบโอดีเซล จำกัด อ.ดอนสัก จ.สุราษฎร์ธานี	น้ำมันพืชใช้แล้ว น้ำมันมะพร้าว	20,000	แบบกะ
กรมอุทกหารเรือ	น้ำมันปาล์มโอสัน	2,000	แบบกะ
สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย	น้ำมันปาล์มสเตียร์น	30	แบบกะ
โครงการสวนพระองค์ สวนจิตรลดา	น้ำมันพืชใช้แล้ว	400	แบบกะ

วิธีพื้นฐานที่ใช้ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ คือกระบวนการของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบกะ กระบวนการแบบกะมีข้อดีหลายประการ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแบบต่อเนื่อง นั่นคือกระบวนการแบบกะต้องการปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นจึงต้องการเงินลงทุนสูงกว่า มีความแตกต่างในทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในแต่ละกะ จึงไม่เหมาะสำหรับการผลิตในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เป็นแบบต่อเนื่อง โดยอาจใช้

เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่ติดตั้งเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ช่วยในการผสม ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดีกว่าระบบการผลิตแบบเดิม อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตให้ดียิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ เพื่อการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันปาล์ม
- 1.2.2 ทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้น โดยสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพที่สภาวะต่างๆ

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 สร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเพื่อผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ
- 1.3.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ
- 1.3.3 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ โดยการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่สังเคราะห์ได้

## 1.4 ขั้นตอนการทำวิจัย

- 1.4.1 ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันพืชโดยการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน
- 1.4.2 ออกแบบและจัดสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ
- 1.4.3 ทำการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ
- 1.4.4 วิเคราะห์คุณภาพน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากกระบวนการผลิต

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.5.1 ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ
- 1.5.2 เป็นแหล่งข้อมูลในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ เพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 น้ำมันดีเซล [3, 4]

น้ำมันดีเซลเป็นปัจจัยหนึ่งที่ขาดไม่ได้ในอุตสาหกรรมของประเทศ มีการใช้กับรถบรรทุกหนัก รถเมล์ หัวรถจักร เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องจักรในเกษตรกรรม เหมืองแร่ เป็นต้น น้ำมันดีเซล คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีทั้งพาราฟิน แนฟทีน โอเลฟิน และอะโรมาติก จำนวนคาร์บอนอะตอมอยู่ในช่วง 12 ถึง 18 เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบโดยตรง (Straight-Run) แต่ในปัจจุบันเนื่องจากมีกระบวนการแตกตัวในโรงกลั่นหลายกระบวนการ จึงอาจมีน้ำมันส่วนที่ได้จากการแตกตัวผสมอยู่ เพื่อเพิ่มปริมาณให้สอดคล้องกับอุปสงค์ที่เพิ่มขึ้นตลอดเวลาโดยที่ราคายังถูกที่สุดอยู่ ช่วงจุดเดือดที่กว้างซึ่งอยู่ระหว่าง 150 ถึง 370°ซ น้ำมันดีเซลอาจจะประกอบด้วยน้ำมันที่มีคุณภาพต่างกัน ในหลายสมบัติ เช่น ความหนืด ค่าซีเทน จุดวาบไฟ การกลายเป็นไอ เป็นต้น ASTM D 975 ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลของประเทศสหรัฐอเมริกาได้แบ่งน้ำมันดีเซลออกหลายประเภท ซึ่งข้อกำหนดในแต่ละประเทศขึ้นกับภูมิประเทศและสภาพอากาศที่ใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 แต่ในประเทศไทยมีอยู่ 2 ประเภทเท่านั้น คือ น้ำมันดีเซลหมุนเร็วและหมุนช้า น้ำมันดีเซลทั้งสองประเภทแม้จะคล้ายคลึงกัน แต่มีความต้องการด้านคุณภาพต่างกัน โดยน้ำมันดีเซลหมุนเร็วจะมีข้อกำหนดคุณภาพที่เข้มงวดกว่า เพื่อให้เหมาะสำหรับเครื่องยนต์และการใช้งาน จึงมีราคาแพงกว่า

#### 2.1.1 ชนิดของน้ำมันดีเซล [3]

ชนิดของน้ำมันดีเซลสามารถแบ่งตามขนาดของเครื่องยนต์ดีเซล ปัจจุบันประเทศไทยมีจำหน่ายอยู่ 2 ชนิดคือ

1. น้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องรอบเร็ว (Automotive Diesel Oil; ADO) หรือ น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว (High speed diesel) หรือน้ำมันโซล่า น้ำมันดีเซลชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลที่มีความเร็วรอบสูงกว่า 1000 รอบต่อนาที ใช้สำหรับงานที่เปลี่ยนแปลงความเร็วค่อนข้างบ่อย เช่น รถยนต์ขนส่ง รถบรรทุก รถไฟ เป็นต้น

2. น้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องรอบช้า (Industrial Diesel Oil; IDO) หรือน้ำมันดีเซลหมุนช้า (Low speed diesel) หรือน้ำมันซีโล่ เหมาะสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลที่มีความเร็วรอบต่ำประมาณ 500-1000 รอบต่อนาที ใช้สำหรับงานที่ค่อนข้างหนัก และรอบค่อนข้างคงที่ เช่น เครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในการขับเคลื่อนเรือเดินทะเลและการผลิตไฟฟ้า เป็นต้น

## 2.1.2 สมบัติที่สำคัญของน้ำมันดีเซล [4]

### คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลที่สำคัญมีดังนี้

1. ความหนืด (Viscosity) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความต้านทานในตัวต่อการไหลของน้ำมัน คือ น้ำมันที่มีความหนืดน้อยจะไหลได้ง่าย ส่วนน้ำมันที่มีความหนืดมากกว่าจะไหลได้ยากกว่า ความหนืดมีผลต่อระบบการฉีดน้ำมัน และยังมีส่วนในการหล่อลื่นปั๊มเชื้อเพลิงแรงดันสูงอีกด้วย โดยน้ำมันที่มีความหนืดมากเกินไป จะทำให้ละอองน้ำมันที่ฉีดออกไปไม่กระจายเท่าที่ควร แต่หากน้ำมันมีความหนืดน้อยเกินไปก็จะไม่เพียงพอสำหรับการหล่อลื่น

2. ค่าซีเทน (Cetane number; CN) เป็นค่าที่แสดงถึงคุณภาพในการจุดระเบิดของเชื้อเพลิง กล่าวคือ ยิ่งค่าซีเทนมีค่าสูงเท่าใดก็ยิ่งจะมีช่วงเวลาความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้นลง และทำให้มีปริมาณของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้เมื่อเชื้อเพลิงเกิดการจุดระเบิดมีค่าน้อยลงด้วย ดังนั้นเชื้อเพลิงที่มีค่าซีเทนที่สูงกว่าจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันที่น้อยกว่า และทำให้ควบคุมการเผาไหม้ได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องยนต์เนื่องจากมีช่วงเวลาความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้น ทำให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่สะสมในห้องเผาไหม้จะลดลงก่อนถึงการลุกติดไฟ และยังลดปริมาณการปล่อยไฮโดรคาร์บอนและแก๊สจําพวกไนโตรเจนออกไซด์ได้อีกด้วย นอร์มัลเฮกซะเดกเคน (ซีเทน) ซึ่งสามารถติดไฟได้ง่ายได้ถูกกำหนดให้มีค่าซีเทนเป็น 100 และให้เฮปตะเมทิลโนเนนที่ติดไฟยากมีค่าซีเทนเป็น 15 ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีค่าซีเทนสูงก็จะมีความสามารถในการต้านทานการน็อคของเครื่องยนต์ที่มากขึ้นด้วย

3. ดัชนีซีเทน (Cetane index) จะแสดงถึงคุณภาพในการติดไฟของน้ำมันดีเซล หาได้จากค่าความถ่วงจำเพาะ API และอุณหภูมิของการกลั่นที่ 50%

4. อุณหภูมิการกลั่น (Distillation temperature) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการระเหยของน้ำมัน มีผลต่อเครื่องยนต์ดังนี้

4.1 อุณหภูมิที่มีน้ำมันกลั่นออกมา 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แสดงถึงความยากง่ายในการติดเครื่องยนต์ ยิ่งมีค่ามากเครื่องยนต์จะยิ่งติดยาก

4.2 อุณหภูมิที่มีน้ำมันกลั่นออกมา 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นจุดที่จะทำให้การอุ่นเครื่องยนต์ทำได้เร็ว การกระจายไอน้ำมันไปยังกระบอกสูบต่างๆ เป็นไปอย่างสม่ำเสมอและปรับส่วนผสมของน้ำมันกับอากาศได้ถูกต้องตลอดเวลา ทำให้เร่งเครื่องได้ดี เครื่องยนต์มีพลังงานสูง

4.3 อุณหภูมิที่มีน้ำมันกลั่นออกมา 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ต้องมีการกำหนดค่าสูงสุดไว้เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานให้ได้พลังงานสูงสุดและประหยัดเชื้อเพลิง

4.4 อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดและส่วนที่เหลือจากการกลั่น มีการกำหนดค่าสูงสุดไว้เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมันที่ไม่เผาไหม้เกิดการผสมกับน้ำมันเครื่องมากเกินไป

5. จุดวาบไฟ (Flash point) คือ อุณหภูมิที่น้ำมันได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอผสมกับอากาศ และเมื่อไอนี้ถูกเปลวไฟจะลุกวาบขึ้น น้ำมันที่มีจุดวาบไฟต่ำจะต้องมีการดูแลอย่างระมัดระวัง

6. จุดไหลเท (Pour point) คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันยังเป็นของเหลวพอที่จะไหลได้ โดยจะมีผลต่อการใช้งานน้ำมันที่อุณหภูมิต่ำ

7. ปริมาณกำมะถัน ในน้ำมันดีเซลกำมะถันจะอยู่ในรูปแบบต่างๆ เช่น ไดซัลไฟด์ หรือ สารประกอบเฮเทอโรไซคลิก เป็นต้น ซึ่งกำมะถันเหล่านี้เมื่อผ่านห้องเผาไหม้จะกลายเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นกลายเป็นกรดกำมะถันและกัดกร่อนชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์

จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของน้ำมันดีเซลมีหลายประการ และเพื่อเป็นการรักษามาตรฐานของน้ำมันดีเซลให้เป็นผลดีกับเครื่องยนต์และสิ่งแวดล้อม รัฐบาลไทยโดยกระทรวงพาณิชย์ จึงได้กำหนดมาตรฐานของน้ำมันดีเซลภายในประเทศตามตารางที่ 2.1

## 2.2 ความหมายของน้ำมันดีเซลชีวภาพ [5]

คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติได้มีมติให้ไบโอดีเซล หมายถึงเชื้อเพลิงที่ได้จากน้ำมันพืชและสัตว์ที่ผ่านกระบวนการทางเคมี เกิดเป็นสารที่เรียกว่าเมทิลเอสเทอร์ หรือเอทิลเอสเทอร์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้ดี โดยไม่ต้องทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ น้ำมันนี้ไม่มีส่วนผสมของปิโตรเลียม สลายได้ง่าย และปราศจากกำมะถัน ส่วนการนำน้ำมันพืชมาผสมกับน้ำมันดีเซลหรือน้ำมันก๊าดเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลนั้น คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติมีมติให้ใช้คำว่า น้ำมันดีเซลมะพร้าวหรือน้ำมันดีเซลปาล์ม ขึ้นอยู่กับชนิดของประเภทน้ำมันที่นำมาผสม เช่น น้ำมันดีเซลมะพร้าวดิบ น้ำมันดีเซลมะพร้าวบริสุทธิ์ น้ำมันดีเซลปาล์มดิบ น้ำมันดีเซลปาล์มบริสุทธิ์ เป็นต้น น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตจากน้ำมันหรือไขมันต่างชนิดต่างๆ จะมีคุณสมบัติต่างกันดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานของน้ำมันดีเซลในประเทศไทย

ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล		วิธีทดสอบ
		หมุนเร็ว	หมุนช้า	
1. ความตวงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6 องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า	0.81	-	ASTM D 1298
	ไม่ต่ำกว่า	0.87	0.92	
2. ค่าซีเทน หรือ ค่านีซีเทน	ไม่ต่ำกว่า	47	45	ASTM D 613
3. ความหนืด (เซนติสโตกส์) ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า	1.8	-	ASTM D 445
	ไม่สูงกว่า	4.1	8.0	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล		วิธีทดสอบ
		หมุนเร็ว	หมุนช้า	
ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า	-	-	
	ไม่สูงกว่า	-	6.0	
4. จุดไหลเท (องศาเซลเซียส)	ไม่สูงกว่า	10	16	ASTM D 97
5. ปริมาณกำมะถัน ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.05	1.5	ASTM D 2622
6. การกัดกร่อนแผ่นทองแดงหมายเลข	ไม่สูงกว่า	1	-	ASTM D 130
7. ปริมาณกากดำ ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.05	-	ASTM D 189
8. ปริมาณน้ำและตะกอน ร้อยละโดยปริมาตร	ไม่สูงกว่า	0.05	0.3	ASTM D 2709
9. ปริมาณเถ้า ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.01	0.02	ASTM D 482
10. จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ไม่ต่ำกว่า	52	52	ASTM D 93
11. อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตร ในอัตราร้อยละ 90 (องศาเซลเซียส)	ไม่สูงกว่า	357	-	ASTM D 86
12. สี	ไม่ต่ำกว่า	-	4.5	ASTM D 1500
	ไม่สูงกว่า	4.0	7.5	
13. คุณสมบัติการหล่อลื่น ทดสอบโดยเครื่อง HFRR (ไมโครเมตร)	ไม่สูงกว่า	460	-	CEC F-06-A-96

ที่มา : ประกาศกรมทะเบียนการค้า พ.ศ. 2545

## ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันชนิดต่างๆ [6]

เมทิลเอสเทอร์ ของน้ำมันพืช	ความหนืด mm <sup>2</sup> /sec	ซีเทน นัมเบอร์	ค่า ความร้อน MJ/Liter	จุดหมอก °C	จุดวาบไฟ °C	ความ หนาแน่น g/L	กำมะถัน %wt
Peanut	4.9 (37.8°C)	54	33.6	5	176	0.883	-
Soybean	4.5 (37.8°C)	45	33.5	1	178	0.885	-
Babassu	3.6 (37.8°C)	63	31.8	4	127	0.879	-
Palm	5.7 (37.8°C)	62	33.5	13	164	0.88	-
Sunflower	4.6 (37.8°C)	49	33.5	1	183	0.86	-
Tallow	-	-	-	12	96	-	-
Rapeseed	4.2 (40°C)	51-59.7	32.8	-	-	0.882	-
Used rapeseed	9.48 (30°C)	53	36.7	-	192	0.895	0.002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 น้ำมันพืชที่ใช้ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ

### 2.3.1 ลักษณะและโครงสร้างของน้ำมัน [7]

น้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์เป็นประเภทสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ที่มีโครงสร้างเชื่อมต่อกับกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 10 ถึง 30 อะตอม โดยปริมาณกรดไขมันคิดเป็น 94-96% ของน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งคุณสมบัติของน้ำมันแต่ละชนิดแตกต่างกันตามคุณสมบัติของกรดไขมันนั้นๆ แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ [7]

น้ำมันพืช	ความถ่วงจำเพาะ 21 °C (g/ml)	ความหนืด 21 °C (cP)	ค่าความร้อน (kJ/kg)
น้ำมันถั่วเหลือง	0.918	57.2	39,350
น้ำมันทานตะวัน	0.918	60.0	39,490
น้ำมันมะพร้าว	0.915	51.9	37,540
น้ำมันถั่วลิสง	0.914	67.1	39,470
น้ำมันปาล์ม	0.898	88.6	39,550
น้ำมันเมล็ดในปาล์ม	0.904	66.3	39,720
น้ำมันเมล็ดสบู่ดำ	0.915	36.9 (38 °C)	39,300
น้ำมันดีเซล	0.845	3.8	46,800



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 สมบัติของน้ำมันพืชในการเป็นเชื้อเพลิง [2-3, 8]

สมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ความหนืดคินเมติกของน้ำมันพืชเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 30 ถึง 40 เซนติสโตกส์ ที่ 38°C ความหนืดที่สูงนี้เกิดจากโมเลกุลและสูตรโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ของไตรกลีเซอไรด์ น้ำมันพืชมีน้ำหนักโมเลกุลมากอยู่ในช่วง 600 ถึง 900 ซึ่งสูงกว่าของน้ำมันดีเซลประมาณ 10 เท่า จุดวาบไฟสูงมาก (มากกว่า 200°C) ค่าการให้ความร้อนอยู่ในช่วง 39 ถึง 40 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าน้ำมันดีเซล (45 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) จำนวนออกซิเจนในน้ำมันดีเซลทำให้ค่าการให้ความร้อนลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เลขซีเทนอยู่ในช่วง 32 ถึง 40 ค่าไอโอดีอยู่ในช่วง 0 ถึง 200 ส่วนจุดเกิดหมอกและจุดไหลเทของน้ำมันพืชสูงกว่าน้ำมันดีเซล

ตารางที่ 2.4 สมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช [8]

Vegetable Oil	Kinematic Viscosity at 38°C	Cetane Number	Heating Value	Cloud Point	Pour Point	Flash Point	Density	Carbon Residue	Ash	Sulphur
	mm <sup>2</sup> /s		MJ/kg	°C	°C	°C	kg/L	%wt	%wt	%wt
Corn	34.9	37.6	39.5	-1.1	-40.0	277	0.9095	0.24	0.010	0.01
Cottonseed	33.5	41.8	39.5	1.7	-15.0	234	0.9148	0.24	0.010	0.01
Crambe	53.6	44.6	40.5	10.0	-12.2	274	0.9044	0.23	0.050	0.01
Linseed	27.2	34.6	39.3	1.7	-15.0	241	0.9236	0.22	<0.010	0.01
Peanut	39.6	41.8	39.8	12.8	-6.7	271	0.9262	0.24	0.005	0.01
Rapeseed	37.0	37.6	39.7	-3.9	-31.7	246	0.9115	0.30	0.054	0.01
Safflower	31.3	41.3	39.5	18.3	-6.7	260	0.9144	0.25	0.006	0.01
H.O.Safflower	41.2	49.1	39.5	-12.2	-20.6	293	0.9021	0.24	<0.001	0.02
Sesame	35.5	40.2	39.3	-3.9	-9.4	260	0.9133	0.25	<0.010	0.01
Soya bean	32.6	37.9	39.6	-3.9	-12.2	254	0.9138	0.27	<0.010	0.01
Sunflower	33.9	37.1	39.6	7.2	-15.0	274	0.9161	0.23	<0.010	0.01
Palm	39.6	42.0	-	31.0	-	267	0.9180	-	-	-
Babassu	30.3	38.0	-	20.0	-	150	0.9460	-	-	-
Tallow	-	-	40.0	-	-	201	-	6.21	-	-

### 2.3.3 ปัญหาของน้ำมันพืชในการเป็นเชื้อเพลิง [3, 8]

การใช้น้ำมันพืชแทนน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไปทำให้เกิดปัญหา ซึ่งสัมพันธ์กับชนิดและเกรดของน้ำมันและสภาพภูมิอากาศ การฉีด Atomization และการเผาไหม้ของน้ำมันพืชในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นแตกต่างอย่างมากกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ความหนืดที่สูงมากของน้ำมันพืชสร้างปัญหาให้กับกระบวนการฉีด ทำให้น้ำมัน Atomization ไม่ดี การผสมกันของน้ำมันกับอากาศไม่ดี ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จุดวาบไฟที่สูงมากของมันเป็นผลมาจากค่าการเป็นไอที่ต่ำ ซึ่งทำให้เกิดเป็นคาร์บอนอุดตันที่หัวฉีด และยังเกิดการเงี้ยวและสลายตัวในน้ำมันหล่อลื่น และจากคุณสมบัติที่มีความหนืดที่สูง ความเป็นไอต่ำของน้ำมันพืช เป็นผลให้การสตาร์ทเครื่องยนต์เมื่อ

อากาศเย็นทำได้ยาก การทำงานผิดพลาด และการจุดระเบิดคลาดเคลื่อน น้ำมันพืชเกิดโพลีเมอร์ เซชันได้จากทั้งความร้อนและออกซิเดชัน ทำให้เกิดการตกตะกอนในหัวฉีด เกิดเป็นฟิล์มที่อุดตันการไหลของเชื้อเพลิงและรบกวนการเผาไหม้ ส่วนในระยะยาวน้ำมันพืชทำให้เกิดยางเหนียว ทำให้แหวน ลูกสูบติด ปัญหาอื่นๆ คือ ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยทั่วไป ซึ่งเครื่องยนต์ต้องทำการปรับปรุงอีกมาก

## 2.4 การใช้อนุพันธ์ของไตรกลีเซอไรด์ทดแทนน้ำมันดีเซล

รูคอล์ฟ ดีเซล ผู้คิดค้นเครื่องยนต์ดีเซล ได้ใช้น้ำมันถั่วลิสงเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ในการทดสอบเมื่อปี ค.ศ.1900 เชื้อเพลิงจากน้ำมันพืชจึงมีความเป็นไปได้ในการแทนที่น้ำมันดีเซล[8] แม้ว่าความคิดที่จะใช้น้ำมันพืชมีมาเป็นเวลานานแล้ว แต่ไม่จริงจังนัก เนื่องจากส่วนใหญ่การทดสอบในระยะสั้นให้ผลที่น่าพอใจ แต่ผลในระยะยาวกลับมีปัญหาอย่างรุนแรงกับเครื่องยนต์ เนื่องจากความหนืดที่สูง ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์ และมีการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ จึงมีความพยายามในการพัฒนาอนุพันธ์ของน้ำมันพืชที่มีคุณสมบัติและให้ผลเหมือนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ปัญหาของการใช้ไตรกลีเซอไรด์แทนน้ำมันดีเซล ส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับความหนืดที่สูง ความเป็นไอที่ต่ำ และลักษณะที่เป็น Polyunsaturated ของไตรกลีเซอไรด์ [8] ซึ่งทั้งนี้สามารถลดปัญหาดังกล่าวลงได้โดย 4 วิธี คือ [9]

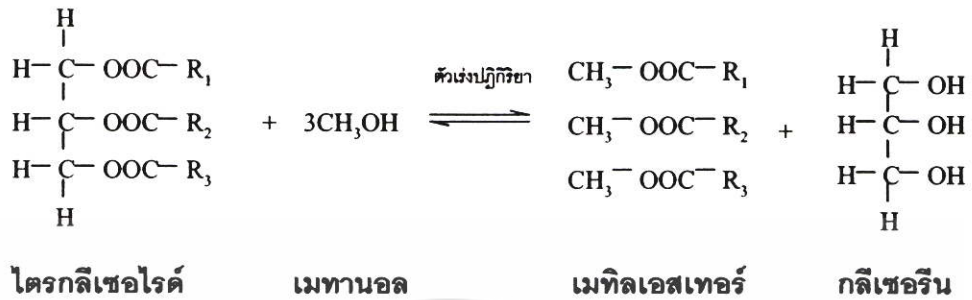
1. การนำมาใช้โดยตรงและการผสม (Direct use and blending) ในทางปฏิบัติไม่สามารถใช้น้ำมันพืช 100 % แทนน้ำมันดีเซลได้ เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำมันพืชเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล พบว่าน้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล และเกิดเป็นไขที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการป้อนเชื้อเพลิง และการใช้งานในบางพื้นที่ในช่วงฤดูหนาวที่มีอุณหภูมิต่ำ จุดระเบิดได้ช้า จึงได้มีการนำมาผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนต่างๆ แต่ก็มักจะพบปัญหาการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง และเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

2. การทำเป็นไมโครอิมัลชัน (Microemulsions) ของน้ำมันจากพืชและสัตว์กับตัวทำละลายเช่น เมทานอล เอทานอล และ 1-บิวทานอล ด้วยอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งเป็นการทำให้ของเหลวเกิดการกระจายอนุภาคอย่างสมดุล วิธีนี้ลดปัญหาความหนืดได้ดี แต่ยังคงมีรายงานปัญหาในเรื่องการอุดตันที่หัวฉีด เกิดการสะสมของคราบคาร์บอน การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น [9]

3. การแตกสลายด้วยความร้อน (Thermal cracking หรือ Pyrolysis) เป็นการนำน้ำมันพืชมาให้ความร้อนในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน เพื่อให้ไขมันแตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งทำให้ความหนืดของน้ำมันพืชลดลง ปัญหาของวิธีนี้คือ เครื่องมือมีราคาแพง และควบคุมการเกิดผลิตภัณฑ์ได้ยาก เช่น บางครั้งจะได้ก๊าซโซลีนออกมามากกว่าน้ำมันดีเซล

4. ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันหรือแอลกอฮอล์ไลซิส (Transesterification หรือ Alcoholysis) เป็นปฏิกิริยาของน้ำมันหรือไขมันซึ่งเป็นไตรกลีเซอไรด์ที่ได้จากพืชและสัตว์กับแอลกอฮอล์ เกิดเป็นเอสเทอร์

ซึ่งคือน้ำมันดีเซลชีวภาพ และกลีเซอริน โดยใช้กรด ต่าง หรือเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีนี้เป็นวิธีมาตรฐานในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในปัจจุบันปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สมการเคมีของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องเป็นอนุกรมกันและเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ โดยไตรกลีเซอไรด์จะถูกเปลี่ยนทีละขั้นตอนเป็นไดกลีเซอไรด์และน้ำมันดีเซลชีวภาพ โมโนกลีเซอไรด์และกลีเซอรอลในที่สุด ดังรูปที่ 2.3 โดยสมดุลของปฏิกิริยาจะมีทิศทางไปทางด้านการเกิดน้ำมันดีเซลชีวภาพและกลีเซอรอล



รูปที่ 2.3 ลำดับขั้นของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

## 2.5 น้ำมันดีเซลชีวภาพที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับ แอลกอฮอล์ แอลกอฮอล์ที่เหมาะสมคือ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล และเอมีลแอลกอฮอล์ แต่ที่นิยมใช้คือเมทานอล เนื่องจากมีราคาถูกและหาได้ง่าย บางครั้งใช้เอทานอลเพราะผลิตจากแหล่งหมุนเวียนได้ ชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้จะทำให้ไขมันดีเซลชีวภาพมีคุณสมบัติส่วนใหญ่ใกล้เคียงกัน แต่มีสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน เช่น ความหนืด จุดเกิดหมอก และจุดไหลเท

### 2.5.1 มาตรฐานของน้ำมันดีเซลชีวภาพ

เนื่องจากน้ำมันดีเซลชีวภาพนั้นผลิตได้จากน้ำมันพืชและไขมันหลายชนิดที่มีคุณสมบัติต่างกัน มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ดังนั้นการกำหนดคุณภาพมาตรฐานน้ำมันดีเซลชีวภาพมีคุณภาพเป็นมาตรฐานเดียวกัน ซึ่ง ASTM (American Society of Testing & Materials) ได้กำหนดมาตรฐาน D 6751 สำหรับน้ำมันดีเซลชีวภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และในประเทศต่างๆ ที่ปัจจุบันมีการผลิตและใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพ กำหนดมาตรฐานไว้ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 นอกจากนี้ในแต่ละประเทศอาจใช้วัตถุดิบในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานน้ำมันดีเซลชีวภาพ [10]

คุณสมบัติ	หน่วย	มาตรฐาน DIN 51606	มาตรฐาน US ASTM
จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	ไม่น้อยกว่า 100	ไม่น้อยกว่า 100
ปริมาณน้ำ และ ตะกอน	ร้อยละโดยปริมาตร	-	ไม่มากกว่า 0.05
ปริมาณกากถ่าน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่มากกว่า 0.30	ไม่มากกว่า 0.05
ปริมาณเถ้า	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	ไม่มากกว่า 0.02
ความหนืด ที่ 40 องศาเซลเซียส	เซนติสโตกส์	3.5 – 5.0	1.9 – 6.5
ปริมาณกำมะถัน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่มากกว่า 0.01	ไม่มากกว่า 0.05
ค่าซีเทน	-	ไม่น้อยกว่า 49	ไม่น้อยกว่า 40
จุดหมอก	องศาเซลเซียส	-	3 องศาเซลเซียส
การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	-	ไม่มากกว่า 1	ไม่มากกว่า 3B
ค่าความเป็นกรดทั้งหมด	มิลลิกรัม KOH/กรัม	ไม่มากกว่า 0.50	ไม่มากกว่า 0.80
กลีเซอรินอิสระ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่มากกว่า 0.02	ไม่มากกว่า 0.02
ปริมาณกลีเซอรินทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่มากกว่า 0.25	ไม่มากกว่า 0.24

ตารางที่ 2.6 ข้อกำหนดมาตรฐานน้ำมันดีเซลชีวภาพในแต่ละประเทศ [11]

Specifications Standard/Specification	Units	Australia ONC1191	France -	Germany DINE51606	Italy UNI10635	Sweden SS155436	USA ASTM D6751	Draft EU EN14214
Introduction Date		Jly1997	Spt1997	Spt1997	Apr1997	Nov1996	2001	2001
Density @ 15°C	g/cm <sup>3</sup>	0.85-0.89	0.87-.89	0.875-0.90	0.86-0.90	0.87-0.90	-	0.86-0.90
Kinematic Viscosity @ 40°C	mm <sup>2</sup> /s	3.5-5.0	3.5-5.0	3.5-5.0	3.5-5.0	3.5-5.0	1.9-6.0	3.5-5.0
Flash Point	°C	≥100	≥100	≥110	≥100	≥100	≥130	≥130
CFPP	°C	0/-15	-	0-10/-20	-	-5	-	0/-15
Pour Point	°C	-	-10	-	0/-15	-	-	-
Sulphur	%max	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01
CCR 100% max.		0.05	-	0.05	-	-	0.05	-
10% disti.residue	%max	-	0.3	-	0.5	-	-	0.3
Sulphated Ash max.	%max	0.02	-	0.03	-	-	0.02	0.01
(Oxide).Ash, max.	%mass	-	-	-	0.01	0.01	-	-
Water max.	mg/kg	-	200	300	700	300	≤0.05	500
Total Contaminants	mg/kg	-	-	20	-	20	-	-
Cu Corrosion	3h/50°C	-	-	1	-	-	No.3	1
Cetane No.		≥49	≥49	≥49	-	≥48	≥47	≥47
Neutral No.		≤0.8	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.6	≤0.8	≤0.02
Methanol	%mass	≤0.20	≤0.01	≤0.3	≤0.02	≤0.02	-	≤0.02
Ester Content	%mass	-	≥96.5	-	≥98	≥98	-	≥96.5
Monoglycende	%mass	-	≤0.8	≤0.8	≤0.8	≤0.8	-	≤0.8
Diglycende	%mass	-	≤0.2	≤0.4	≤0.2	≤0.1	-	≤0.20
Triglycende	%mass	-	≤0.2	≤0.4	≤0.1	≤0.1	-	≤0.03
Free Glycerol	%mass	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.05	≤0.02	≤0.02	0.25
Total Glycerol	%mass	0.24	0.25	0.25	-	-	0.24	≤115
Iodine No.		≤120	≤115	≤115	-	≤125	-	-
C18:3 & higher acids		≤15	-	-	-	-	-	10
Phosphorous	ppm	≤20	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	10
Alkaline Matter	(Na, k)	-	≤5	≤5	≤10	≤10	-	≤360
Distillation 95%	°C	-	≤360	-	-	-	≤360	*
IBP min.	°C	-	-	-	-	-	-	*
Bound Glycerin		-	-	-	-	-	-	Max 0.8
Oxidation Stability	Hrs.	-	-	-	-	-	-	6 min.
Sediment		-	-	-	-	-	-	≤0.05
Cloud Point		-	-	-	-	-	*	-

หมายเหตุ \* ไม่กำหนดค่าเพียงแต่ให้รายงานค่า, CFPP คือ Cold Filter Plugging Point

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 การเลือกใช้ไตรกลีเซอไรด์ชนิดต่างๆ เพื่อผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในแต่ละประเทศ[10]

ชนิดน้ำมัน	ประเทศ
น้ำมันจากเรพซีด (Rape Seed) 80% น้ำมันทานตะวัน 10%	อิตาลี และฝรั่งเศส
น้ำมันถั่วเหลือง (Soy Bean)	อเมริกา
น้ำมันปาล์ม (Palm Oil)	มาเลเซีย
น้ำมันมะกอก (Olive Oil)	สเปน
น้ำมันเมล็ดฝ้าย (Cotton Seed Oil)	กรีซ
น้ำมันจาโทรฟาเคอร์เคส (Jatropha Curcas Oil)	นิการากัว
ไขวัว (Beef Tallow)	ไอร์แลนด์
น้ำมันที่ใช้แล้ว (Used Frying Oil)	ออสเตรเลีย

### 2.5.2 กระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ

กระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในเชิงอุตสาหกรรมในปัจจุบันมีทั้งกระบวนการที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch process) และกระบวนการที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous process) ซึ่งมีข้อดี ข้อด้อยแตกต่างกัน ดังนี้

1. กระบวนการแบบกะ โรงงานผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพส่วนใหญ่ในยุโรป ที่มีกำลังการผลิตอยู่ในช่วง 500 ถึง 10,000 ตันต่อปี ยังคงใช้กระบวนการแบบกะอยู่ เทคโนโลยีการผลิตนี้มีราคาไม่แพง สามารถทำให้ได้คุณภาพตามต้องการ มีความยืดหยุ่นสูงเมื่อมีการเปลี่ยนสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา แต่มีปัญหาด้านความสม่ำเสมอของคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ แผนภูมิของกระบวนการผลิตแบบกะแสดงดังในรูปที่ 2.5 [12]

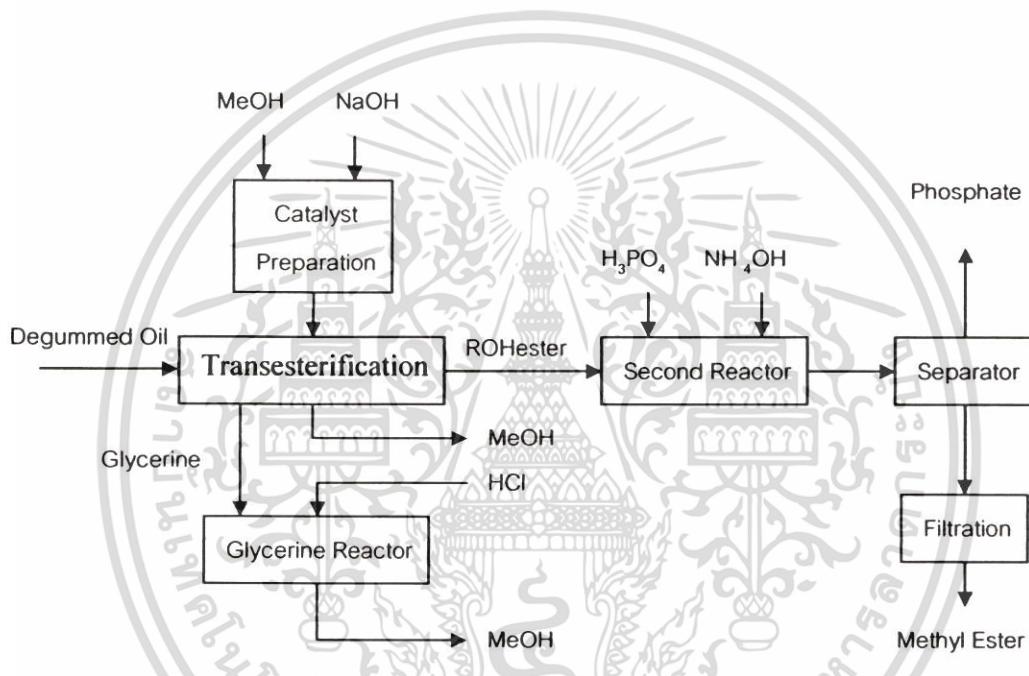
2. กระบวนการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพแบบต่อเนื่อง ในปี ค.ศ. 1990 บริษัท Leer ในประเทศเยอรมนี ได้พัฒนากระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพแบบต่อเนื่องขึ้น โดยเรียกเทคโนโลยีนี้ว่า CD process กระบวนการนี้สามารถผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้ถึง 15-20 ตันต่อชั่วโมง [13]

Krisnangkura และ Simamaharnop ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบชุดท่อของน้ำมันปาล์มกับเมทานอล โดยมีโทลูอินเป็นตัวทำละลาย ใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:5.8, 1:9, 1:13 และ 1:17 ที่อุณหภูมิ 70°C พบว่าได้ผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ 57%, 87%, 96% และ 99% ตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนโดยโมล 1:13 ปฏิกิริยาเกิดขึ้นภายใน 60 วินาที และที่อัตราส่วน 1:17 ปฏิกิริยาเกิดขึ้นใน 15 วินาที [14]

Watanabeและคณะ ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแพ็คคอลัมน์ 3 คอลัมน์ต่อเนื่องกัน ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เอนไซม์ไลเปส *Candida* จะถูกบรรจุในเครื่องปฏิกรณ์คอลัมน์ละ 3 กรัม สารตั้งต้นคือน้ำมันถั่วเหลืองผสมกับน้ำมันเมล็ดเรพและเมทานอล ใน

อัตราส่วนโดยโมล 1:3 ถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหลคงที่ 6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากคอลัมน์ที่ 1 จะเข้าสู่คอลัมน์ที่ 2 โดยมีสารตั้งต้นที่อัตราส่วน 1:3 ถูกป้อนเข้าไป พร้อมด้วยอัตราการไหลเดียวกัน และทำในทำนองเดียวกันในเครื่องปฏิกรณ์ที่ 3 ซึ่งพบว่าได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันดีเซลชีวภาพในขั้นตอนสุดท้าย 93% [15]

Darnoko และ Cheryan ศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์กวนผสมแบบต่อเนื่องขนาด 1 ลิตร สารตั้งต้นคือน้ำมันปาล์มและเมทานอลในอัตราส่วน 1:6 โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่าได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันดีเซลชีวภาพ 58.8% และ 85.6% โดยน้ำหนัก เมื่อเวลาที่สารใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ 40 นาที และ 60 นาที ตามลำดับ [16]



รูปที่ 2.4 แผนภูมิการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยกระบวนการแบบกะ [12]

Nouredдиниและคณะ รายงานผลการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบต่อเนื่องในระดับโรงงานต้นแบบ ในกระบวนการมีเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ (Static mixer) และอุปกรณ์ผสมความเฉือนสูง (High-Shear mixer) ที่ปรับความเร็วได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 สารตั้งต้นคือน้ำมัน ถั่วเหลือง และเมทานอล ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:8 และ 1:6 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วง 0.1 ถึง 1% โดยน้ำหนักของน้ำมันพืช เปลี่ยนแปลงความเร็วของอุปกรณ์ผสมความเฉือนสูงในช่วง 0 ถึง 3600 รอบต่อนาที และมีอัตราการไหลของสารตั้งต้นในช่วง 0.25 ถึง 0.35 ลิตรต่อนาที พบว่า การใช้เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่เพียงอย่างเดียวสามารถทำให้ได้น้ำมันดีเซลชีวภาพสูงมากกว่า 97% ในขณะที่ถ้าใช้อุปกรณ์ผสมความเฉือนสูงเพียง

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สมการออกแบบของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล คือ

$$r_j = \frac{dF_j}{dV} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $r_j$  คือ อัตราเร็วของปฏิกิริยา (Rate of reaction), [ $\text{mol} \cdot (\text{time} \cdot \text{volume})^{-1}$ ]

$F_j$  คือ อัตราการไหลเชิงโมล (Molar flow rate), [ $\text{mol}/\text{time}$ ]

$V$  คือ ปริมาตร (Volume), [ $\text{volume}$ ]

ในกรณีที่ปฏิกิริยาอันดับสอง ( $2^{\text{nd}}$  order reaction) สมการอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยา คือ

$$-r_A = kC_A C_B \quad (2.3)$$

จากนิยามของคอนเวอร์ชัน (Conversion,  $x_A$ ) คือ

$$x_A = (F_{A0} - F_A) / F_{A0} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $F_{A0}$  คือ อัตราการไหลเชิงโมลของสาร A ที่เวลาเริ่มต้น, [ $\text{mol}/\text{time}$ ]

$F_A$  คือ อัตราการไหลเชิงโมลของสาร A ที่เวลาใดๆ, [ $\text{mol}/\text{time}$ ]

เมื่อพิจารณาเฉพาะสารทำปฏิกิริยาจำกัด A และ จากสมการที่ 2.3 จัดรูปใหม่จะได้

$F_A = F_{A0}(1 - x_A)$  แทนในสมการที่ 2.1 จะได้

$$F_{A0} \left( \frac{dx_A}{dV} \right) = -r_A \quad (2.5)$$

กำหนดให้  $\theta_B = \frac{C_{B0}}{C_{A0}}$  เมื่อปฏิกิริยาเป็นอันดับสอง ดังนั้นอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาจะ

เท่ากับ

$$-r_A = kC_{A0}^2 (1 - x_A)(\theta_B - x_A) \quad (2.6)$$

$$F_{A0} \frac{dx}{dV} = kC_{A0}^2 (1 - x_A)(\theta_B - x_A) \quad (2.7)$$

หาปริพันธ์ของสมการ (2.7) ได้ดังนี้

$$\int_0^1 \frac{dx}{(1-x_A)(\theta_B-x_A)} = \frac{kC_{A0}^2}{F_{A0}} \int_0^V dV \quad (2.8)$$

$$\frac{1}{\theta_B-1} \ln\left(\frac{\theta_B-x_A}{\theta_B(1-x_A)}\right) = kC_{A0}\tau = \beta \quad (2.9)$$

$$\frac{\theta_B-x_A}{\theta_B(1-x_A)} = \exp[\beta(\theta_B-1)] \quad (2.10)$$

จะได้คอนเวอร์ชันของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ สำหรับปฏิกิริยาอันดับสอง คือ

$$x_{PFR} = \frac{\theta_B [\exp(\beta(\theta_B-1)) - 1]}{\theta_B \exp[\beta(\theta_B-1)] - 1} \quad (2.11)$$

เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ สารจะไหลผ่านท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอดโดยความเข้มข้นสารตั้งต้นลดลงตามความยาวในแกนไหล ดังนั้นในตอนต้นจะมีความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงและลดลงเรื่อยๆ คอนเวอร์ชันจะขึ้นกับความยาวของเครื่องปฏิกรณ์

## 2.7 เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ (Static mixer) [20]

เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการผสมซึ่งไม่ใช่หน่วยขับเคลื่อนใดๆ โดยของไหลจะถูกกวนผสมเมื่อไหลผ่านเครื่องผสม

เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่มีลักษณะเป็นท่อที่ภายในประกอบไปด้วยชิ้นส่วน (Element) หลายๆ อัน โดยที่แต่ละอันมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ายาว 1.5 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ซึ่งบิดทำมุม 180 องศา และในบางชนิดจะมีรูปร่างลักษณะพิเศษเฉพาะ ขึ้นอยู่กับการใช้งาน โดยไม่เพียงแต่ใช้เพื่อผสมของผสมในกระบวนการเท่านั้น แต่ยังสามารถประยุกต์ใช้ในงานอื่นได้อีก เช่น การละลายก๊าซในของเหลว



รูปที่ 2.6 ลักษณะของเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่และลักษณะของชั้นส่วนภายใน [20-21]



รูปที่ 2.7 การผสมของเหลวโดยเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ [20]

รูปที่ 2.8 การละลายก๊าซในของเหลวด้วยเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ [20]

### 2.7.1 หลักการผสมของเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ (Mixing principles)

เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ที่สามารถผสมของไหลได้ โดยอาศัยหลักการ 3 ข้อ คือ

#### 1. การแบ่งส่วนการไหล (Division of flow)

การแบ่งส่วนการไหลเป็นการแบ่งของไหลออกเป็น 2 ส่วน เมื่อของไหลไหลผ่านแต่ ละชั้นส่วน ดังนั้นจำนวนส่วนที่ได้ (N) จะเป็นไปตามสูตร  $N = 2^k$  เมื่อ k คือ จำนวนชั้นส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ลักษณะการไหลแบบการแบ่งส่วนการไหล [20]

## 2. การผสมในแนวรัศมี (Radial mixing)

การผสมในแนวรัศมี คือ การผสมซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่ของไหลไหลไปตามส่วนโค้งของแต่ละชั้นส่วน ซึ่งจะไหลวนจากผนังท่อกลับเข้าสู่บริเวณกึ่งกลางของท่อ และไหลวนจากกึ่งกลางท่อไปยังผนังท่อกลับกันไป

รูปที่ 2.10 ลักษณะการไหลแบบการผสมในแนวรัศมี [20]

## 3. การเปลี่ยนทิศทางการไหล (Flow reversal)

การเปลี่ยนทิศทางการไหล คือ การผสมขณะที่ของไหลไหลผ่านแต่ละชั้นส่วน ทิศทางการไหลของของไหลจะสลับเปลี่ยนไปมาระหว่างซ้ายและขวา แรงที่เกิดจากแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดนั้น มีค่ามากจนทำให้เกิดการกวนผสมของของเหลวขึ้น

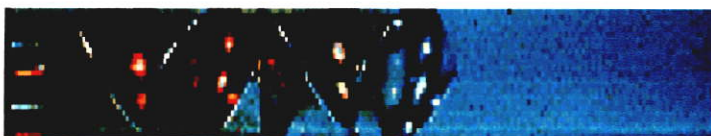
รูปที่ 2.11 ลักษณะการไหลแบบการเปลี่ยนทิศทางการไหล [20]

### 2.7.2 การประยุกต์ใช้เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่

การใช้งานเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่สามารถใช้กับลักษณะการผสมหรือการกระจายได้หลายแบบ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การผสมของไหลที่มีความหนืดต่ำและสามารถละลายซึ่งกันและกันได้ จะอาศัยหลักการเปลี่ยนทิศทางการไหลเป็นหลัก โดยการผสมในลักษณะนี้จะใช้ชั้นส่วนในจำนวนน้อย



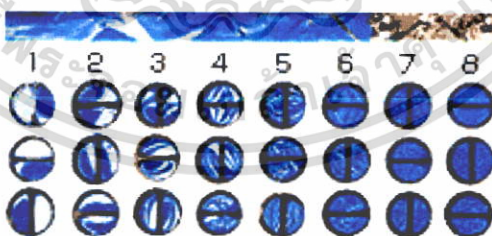
รูปที่ 2.12 การผสมของของเหลวที่มีความหนืดต่ำภายในเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ [20]

2. การแพร่กระจายของเหลว การผสมของเหลวที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน เช่น น้ำและน้ำมัน เครื่องผสมสามารถแพร่กระจายน้ำมันให้ผสมกับน้ำได้ โดยอาศัยหลักการผสมในแนวรัศมี ซึ่งของผสมที่ไหลผ่านชั้นส่วนจำนวนมากจะทำให้ขนาดของอนุภาคของน้ำมันเล็กลง



รูปที่ 2.13 การแพร่กระจายของเหลวภายในเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ [20]

3. การผสมของไหลที่มีความหนืดสูง การผสมของเหลวความหนืดสูงจะอาศัยหลักการแบ่งส่วนการไหลและการผสมในแนวรัศมี จากภาพแสดงให้เห็นการผสมทีละชั้น เมื่อของผสมไหลผ่านไปในแต่ละชั้นส่วน



รูปที่ 2.14 การผสมของของเหลวที่มีความหนืดสูงภายในเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ [20]

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. บั้มแบบไดอะแฟรมของ Prominent รุ่น GALA0713 สำหรับบั้มน้ำมันปาล์มและรุ่น GALA1602 สำหรับบั้มเมทานอล

2. ท่อทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\frac{1}{4}$  นิ้ว ความยาว 5 เมตร และ 3 เมตร สำหรับให้ความร้อนน้ำมันปาล์มและเมทานอล

3. ท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\frac{1}{4}$  นิ้ว ความยาว 7 เมตร

4. มาตรวัดความดัน (Pressure gauge)

5. ตัวดูดซับความดัน (Pulse absorber)

6. เครื่องผสมไ้การเคลื่อนที่ที่ทำจากโพลีโพรพิลีน เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก  $\frac{1}{4}$  นิ้ว ยาว 6 นิ้ว จำนวนส่วนประกอบ (Element) 24 ชิ้น

7. ชุดควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งประกอบด้วย

- เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (Thermocouple K type)
- ตัวควบคุม (Controller)
- ชุดให้ความร้อน (Heater) ขนาด 500 วัตต์
- พัดลม
- กล้องไฟม

##### 3.1.2 สารเคมี

1. น้ำมันปาล์ม

2. เมทานอล 99% เกรดการค้า

3. เอทานอล 95% เกรดการค้า

4. โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์

5. กรดฟอสฟอริก เกรดวิเคราะห์

6. โซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส

#### 3.2 สภาวะที่ทำการทดลอง

1. อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล ที่ทำการทดลองคือ 1:6 และ 1:4.5

2. อุณหภูมิ ที่ทำการทดลองคือ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

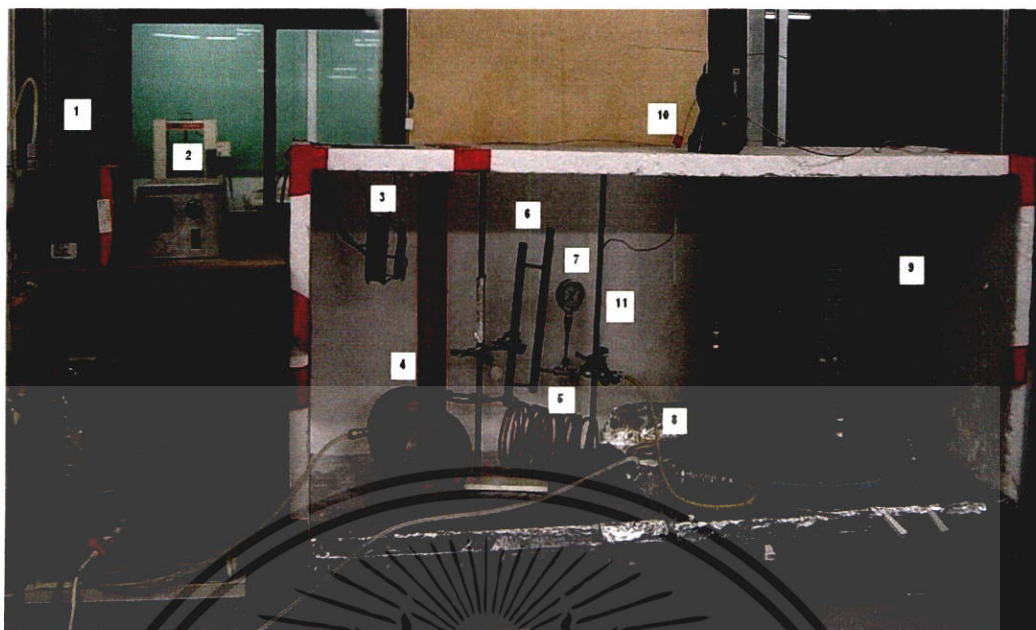
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ทำการทดลองคือ 0.5% และ 1% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำมันปาล์ม

4. Superficial velocity,  $u_0$  ที่ทำการทดลองคือ

- 6.8 เมตรต่อชั่วโมง โดยมีสเปซไทม์ 15 30 45 และ 60 นาที
- 13.6 เมตรต่อชั่วโมง โดยมีสเปซไทม์ 7.5 15 22.5 และ 30 นาที
- 20.4 เมตรต่อชั่วโมง โดยมีสเปซไทม์ 5 10 15 และ 20 นาที
- 27.2 เมตรต่อชั่วโมง โดยมีสเปซไทม์ 3.75 7.5 11.25 และ 15 นาที

### 3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ ประกอบด้วยชุดเครื่องมือในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลดังรูปที่ 3.1 บรรจุอยู่ในกล่องโฟม ซึ่งมีชุดควบคุมอุณหภูมิที่ประกอบด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ เทอร์โมคัปเปิลและชุดลดให้ความร้อนที่มีพัดลมติดตั้งอยู่ ในการทดลองจะทำการป้อนน้ำมันปาล์มและสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอลเข้าสู่ส่วนอุ่นสารป้อน (Preheater) ซึ่งเป็นท่อทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\frac{1}{4}$  นิ้ว ยาว 5 เมตรสำหรับน้ำมันปาล์ม และ 3 เมตรสำหรับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอล หลังจากนั้นจะช่วยให้เกิดการผสมโดยใช้เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ชนิดโพลีโพรพิลีนยาว 6 นิ้ว จำนวนส่วนประกอบ 24 ชิ้น ในระหว่างนี้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นบางส่วน และปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปเมื่อของเหลวผสมไหลเข้าสู่ส่วนทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมเป็นท่อพลาสติกเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\frac{1}{4}$  นิ้ว ยาว 7 เมตร ซึ่งที่ท่อพลาสติกนี้ ทุกๆ 1.5 เมตรจะมีจุดเก็บตัวอย่าง ทำการเก็บตัวอย่างที่จุดเก็บตัวอย่างและหยุดปฏิกิริยาด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกในเอทานอลที่ถูกแช่เย็นจนมีอุณหภูมิ  $0^{\circ}\text{C}$  นำตัวอย่างที่ได้ไปล้างน้ำอุ่นจนได้ค่า pH ที่เป็นกลาง หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างมาวิเคราะห์เพื่อหาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเครื่อง HPLC (High Performance Liquid Chromatograph)



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ สำหรับสังเคราะห์ไบโอดีเซล

- |                                  |  |
|----------------------------------|--|
| 1. ป้อน                          | 2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ                     |
| 3. ชุดให้ความร้อน                | 4. ชุดลดให้ความร้อนสำหรับน้ำมันปาล์ม         |
| 5. ชุดลดให้ความร้อนสำหรับเมทานอล | 6. ตัวดูดซับความดัน                          |
| 7. มาตรวัดความดัน                | 8. เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่เทอร์โมคัปเปิ้ล |
| 9. ชุดชุดท่อพลาสติก              | 10. เครื่องแสดงอุณหภูมิ                      |
| 11. เทอร์โมคัปเปิ้ล              |  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

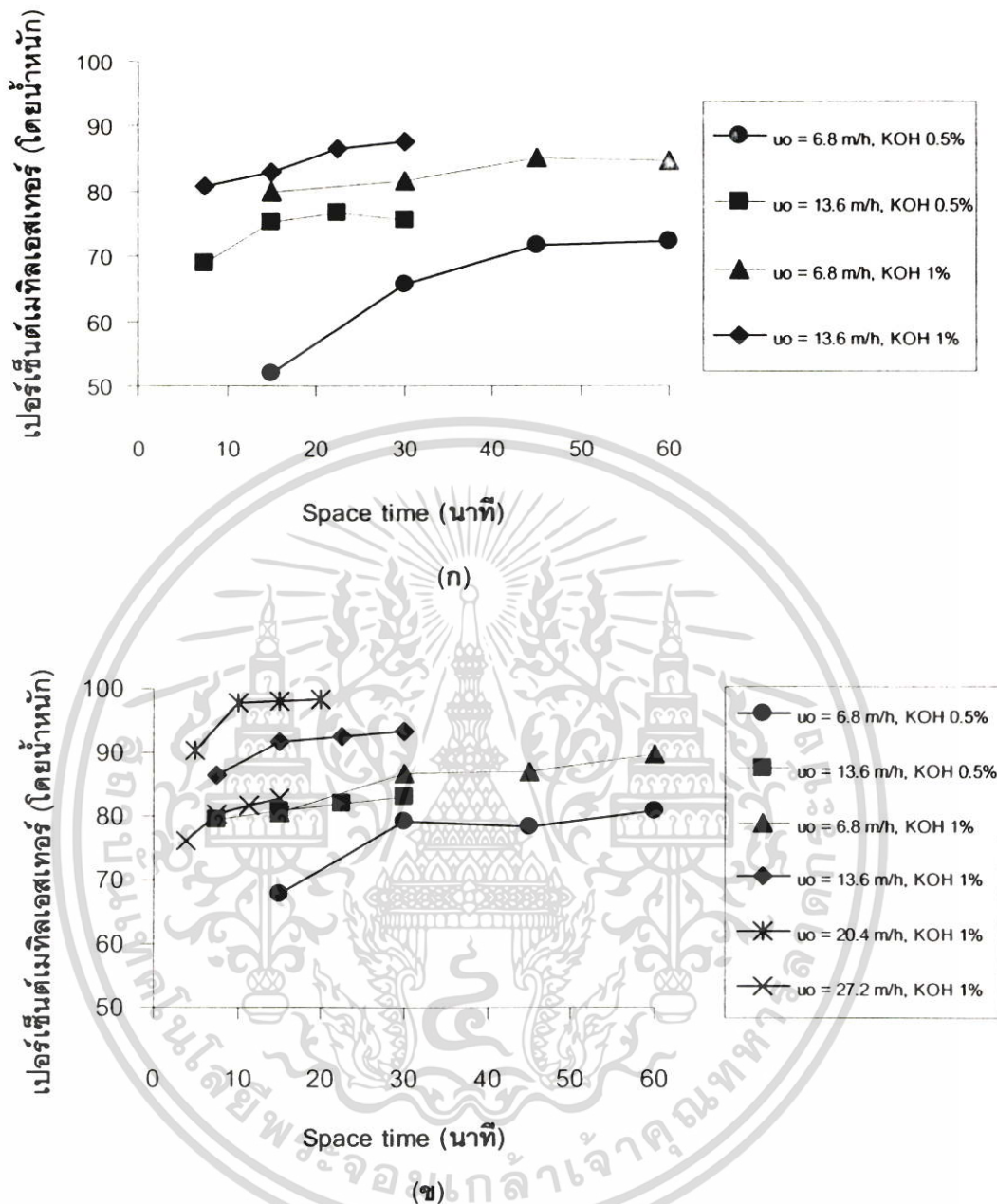
### 4.1 ผลการทดลอง

ผลการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ (โดยน้ำหนัก) โดยเครื่อง HPLC ที่สังเคราะห์จากเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ โดยมีการติดตั้งเครื่องผสมไครการเคลื่อนที่ช่วยในการผสมแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

### 4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

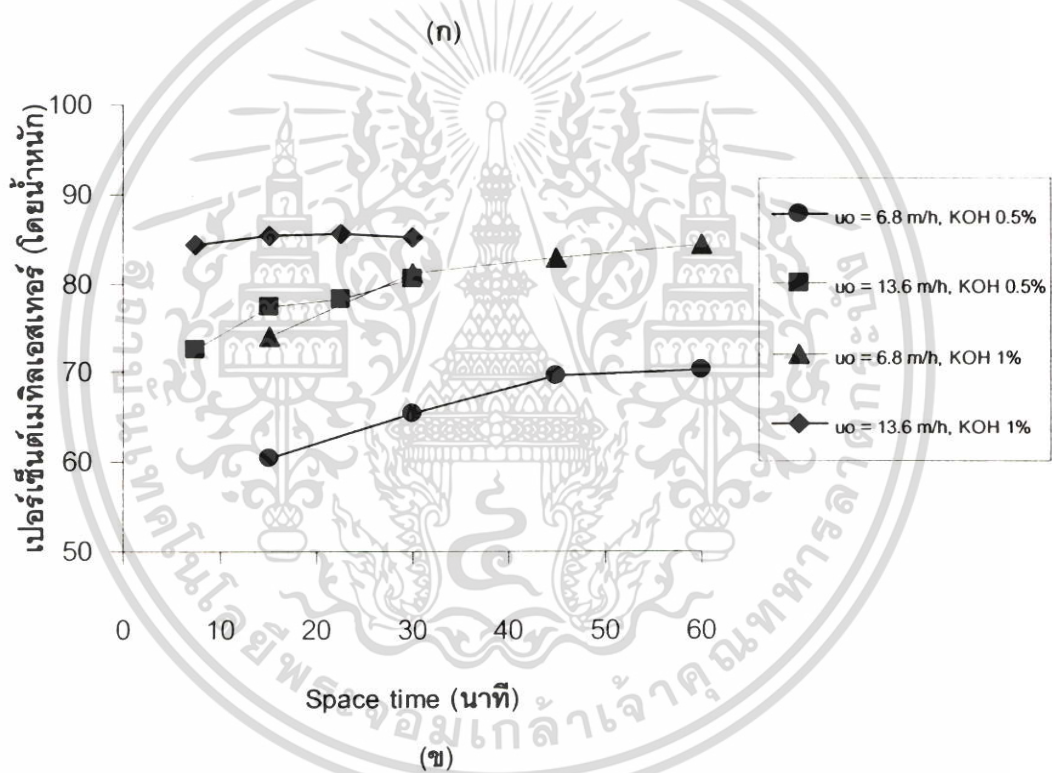
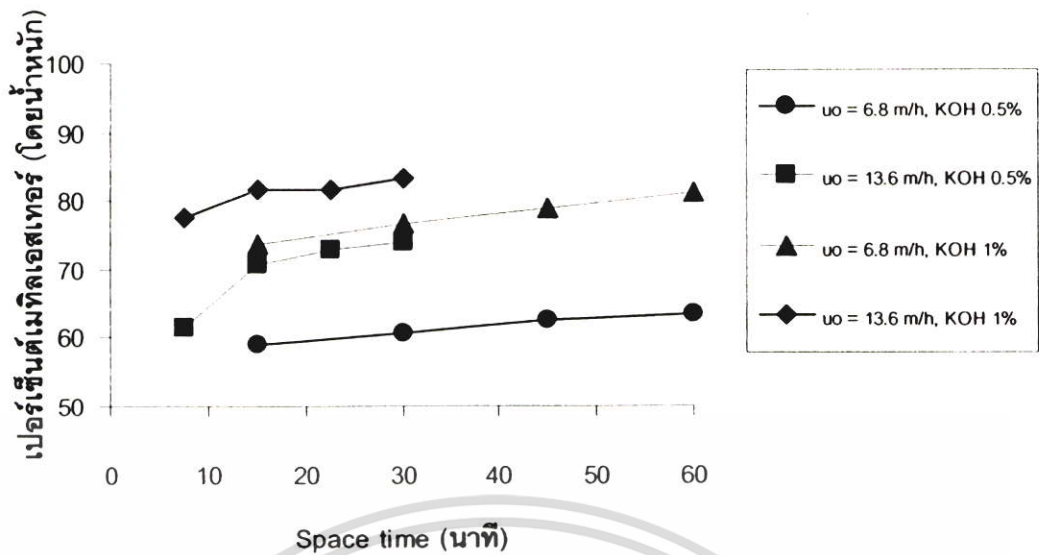
#### 4.2.1 ผลของสเปซไทม์และ Superficial velocity ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

เมื่อทำการทดลองที่ Superficial velocity 6.8 เมตรต่อชั่วโมง สเปซไทม์ที่ทำการทดลองคือ 15 30 45 และ 60 นาที ตามลำดับ จากผลการทดลองจะพบว่า ที่สเปซไทม์ 15 นาที ปฏิริยาภิเริ่มจะเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง หลังจากนั้นที่สเปซไทม์นานกว่านี้ปฏิริยาภิไม่ได้เกิดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และลักษณะของผลการทดลองก็จะคล้ายกับการทดลองที่ Superficial velocity 13.6 เมตรต่อชั่วโมง พบว่าที่สเปซไทม์ 7.5 นาที ปฏิริยาภิเริ่มจะเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง หลังจากนั้นที่สเปซไทม์นานกว่านี้ปฏิริยาภิไม่ได้เกิดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 เนื่องจากว่าปฏิริยาภินี้มีสารตั้งต้นที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ปฏิริยาภิเกิดขึ้นได้ดีระหว่างผิวรอยต่อของวัฏภาคของเหลว ดังนั้นเมื่อของเหลวไหลผ่านเครื่องช่วยผสมไครการเคลื่อนที่ก็จะเกิดการกระจายตัวซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวรอยต่อของวัฏภาค หรืออีกนัยหนึ่งคือเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิริยาเคมีของสารตั้งต้นทั้งสองชนิด หลังจากนั้นของเหลวก็จะไหลเข้าสู่ส่วนการทำปฏิริยาเพิ่มเติมซึ่งก็คือการเพิ่มสเปซไทม์นั่นเอง เมื่อสารตั้งต้นเกิดการผสมกันและมีเวลาทำปฏิริยาที่พอเพียงแล้วปฏิริยาภิก็จะเกิดได้ดี แต่หลังจากนั้นที่สเปซไทม์มากขึ้น ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเกิดการแยกชั้นของสารขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวรอยต่อของวัฏภาคลดลง ปฏิริยาภิจึงเกิดได้ไม่ดีนัก เมื่อทำการทดลองโดยการเพิ่ม Superficial velocity เป็น 20.4 เมตรต่อชั่วโมง พบว่าปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพในผลิตภัณฑ์จะมีค่าสูงถึง 98 % โดยน้ำหนัก แต่เมื่อทำการทดลองที่ Superficial velocity 27.2 เมตรต่อชั่วโมง กลับพบว่าปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพในผลิตภัณฑ์กลับลดลงเหลือเพียง 82 % โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูป 4.3 เนื่องจากว่าเมื่อเพิ่ม Superficial velocity จาก 20.4 เมตรต่อชั่วโมง เป็น 27.2 เมตรต่อชั่วโมง ถึงแม้ว่าจะเป็นการทำพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น แต่สเปซไทม์สั้นลง ทำให้สารตั้งต้นมีเวลาไม่เพียงพอที่จะทำปฏิริยาภิกัน ที่ Superficial velocity 20.4 เมตรต่อชั่วโมง ถึงแม้ว่าจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคน้อยกว่าที่ Superficial velocity 27.2 เมตรต่อชั่วโมง แต่ก็มีเวลาให้สารตั้งต้นทำปฏิริยาภิกันสูงกว่าจึงทำให้ปฏิริยาภิเกิดได้ดี



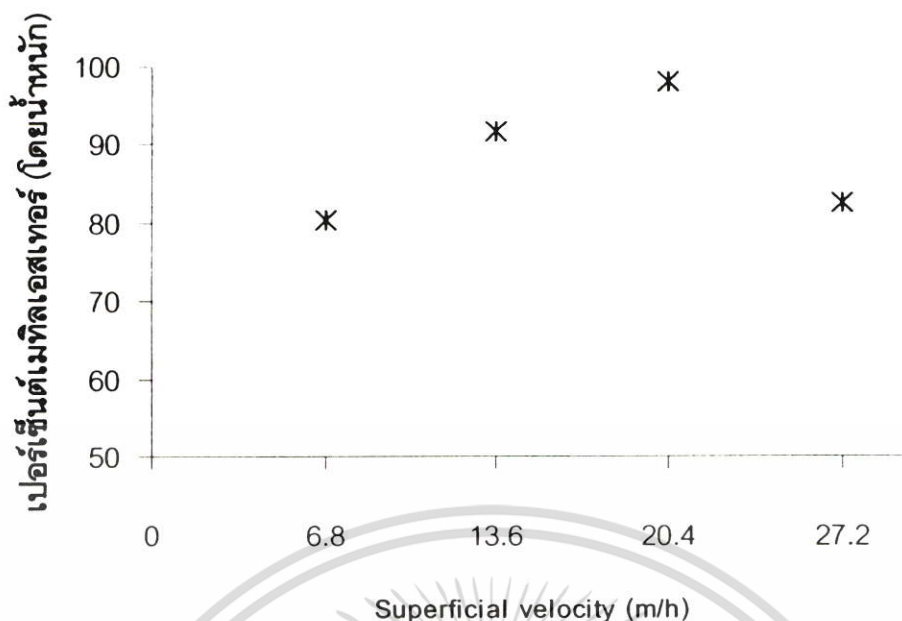
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Space time และ เปอร์เซนต์เมทิลเอสเทอร์ (โดยน้ำหนัก) ที่อัตราส่วนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:6 โดยโมล ณ อุณหภูมิใดๆ (ก) 50 องศาเซลเซียส (ข) 60 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Space time และ เปอร์เซนต์เมทิลเอสเทอร์ (โดยน้ำหนัก) ที่อัตราส่วนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:4.5 โดยโมล ณ อุณหภูมิใดๆ ( ก) 50 องศาเซลเซียส (ข) 60 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Superficial velocity และ เปอร์เซ็นต์เมทิลแอลกอฮอล์ (โดยน้ำหนัก) ที่สเปซไทม์ 15 นาที อัตราส่วนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:6 โดยโมล อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาณน้ำมันปาล์ม

#### 4.2.2 ผลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลแอลกอฮอล์

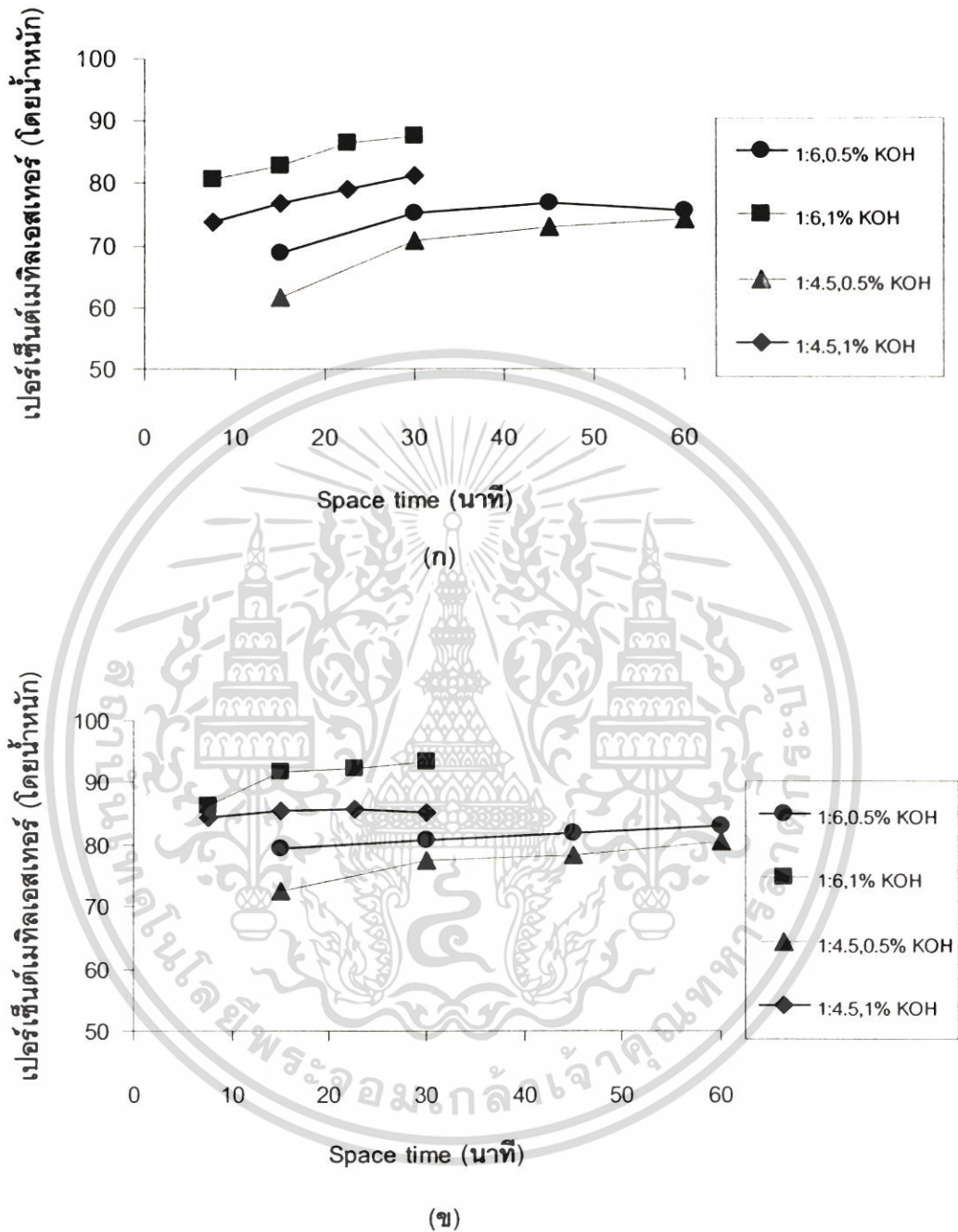
จากผลการทดลองพบว่าการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพโดยใช้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาณของน้ำมันปาล์ม ปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่สังเคราะห์ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาณของน้ำมันปาล์ม ในทั้งสองอัตราส่วนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล ดังแสดงในรูป 4.4 ทั้งนี้เนื่องมาจาก ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในเมทานอล จากปฏิกิริยาตามสมการที่ 4.1 ที่ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น จะทำให้มีปริมาณของ  $\text{MeO}^-$  เพิ่มมากขึ้น และเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนอะตอมที่หมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้เกิดน้ำมันดีเซลชีวภาพมากขึ้นตามไปด้วย



#### 4.2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลแอลกอฮอล์

จากการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น จะทำให้ปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันดีเซลชีวภาพ ถูกจำกัดด้วยการถ่ายเทมวลระหว่างวัฏภาค ซึ่งขึ้นกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass transfer coefficient)

โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูงขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี ปริมาณของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จึงสูงขึ้น



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปซไทม์ และเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ (โดยน้ำหนัก) ณ อุณหภูมิใดๆ (n) 50 องศาเซลเซียส (ข) 60 องศาเซลเซียส

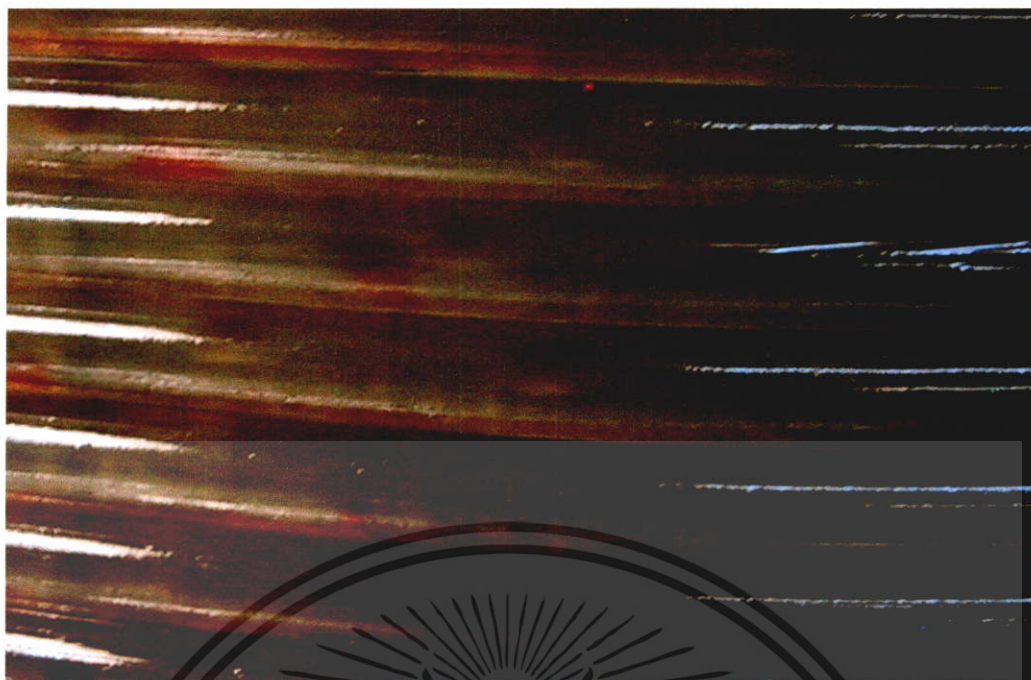
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 วิจารณ์ผลการทดลอง

เนื่องจากการไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันของสารตั้งต้นทั้งสอง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นได้น้อยเฉพาะที่ผิวรอยต่อระหว่างสองวัฏภาค ปฏิกิริยาการแยกชั้นนี้ แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.6-4.9 ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงแรกหลังจากที่สารตั้งต้นทั้งสองไหลออกมาจาก Static mixer จะเกิดลักษณะเป็นเม็ดของเหลวขนาดเล็กๆ สีนํ้าตาลกระจายอยู่โดยทั่วไป ดังรูปที่ 4.5 หลังจากนั้นจะค่อยๆ เกิดการแยกของวัฏภาคของเหลว ดังรูปที่ 4.6 โดยของเหลวจะแยกออกเป็นชั้นของเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอริน โดยเมทิลเอสเทอร์เป็นชั้นบนและกลีเซอรินเป็นชั้นล่าง และจะเกิดการแยกชั้นของเหลวทั้งสองวัฏภาคตลอดไปตามความยาวของท่อ ซึ่งมีผลทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสองวัฏภาคมีค่าน้อยและคงที่ ทำให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เพิ่มขึ้นในช่วงความยาวที่สอง และสามของท่อแทบจะไม่มีผลต่อการเพิ่มของปริมาณเมทิลเอสเทอร์



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของของเหลวที่ไหลออกจาก Static mixer

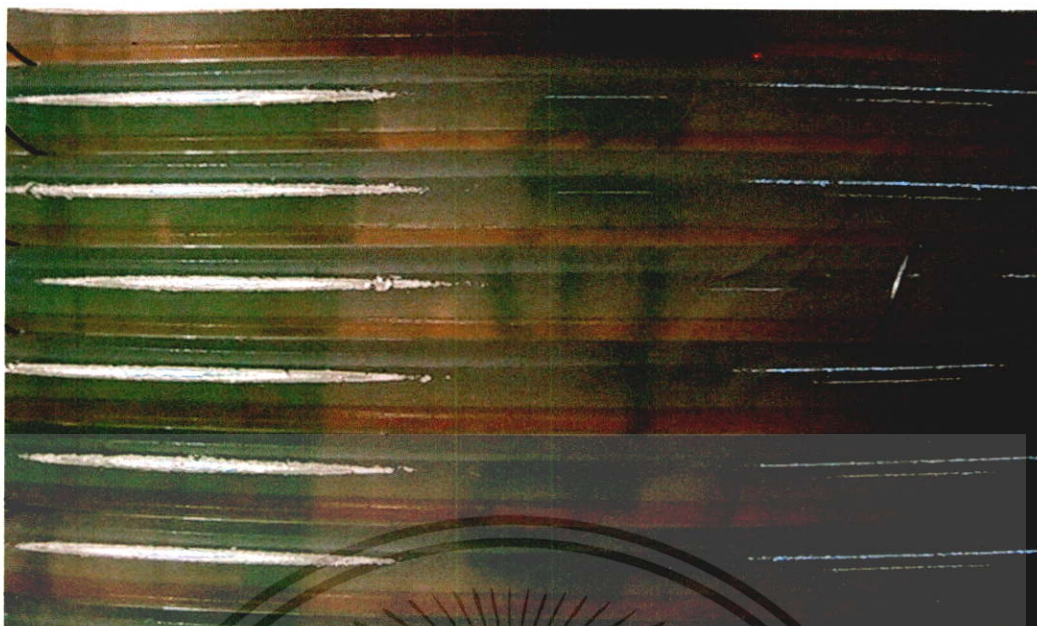


รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะของของเหลวที่ไหลภายในส่วนทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมในช่วงที่ 1 (ระยะทาง 0.1-1.5 เมตร)



รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของของเหลวที่ไหลภายในส่วนทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมในช่วงที่ 2 (ระยะทาง 1.5 – 3.0 เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะของของเหลวที่ไหลภายในส่วนทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมในช่วงที่ 3 (ระยะทาง 3.0 - 4.5 เมตร)



รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะของของเหลวที่ไหลภายในส่วนทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมในช่วงที่ 4 (ระยะทาง 4.5 – 6.0 เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มและเมทานอล โดยมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีปริมาตรรวม 0.3 ลิตร ที่ได้ติดตั้งเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ จากการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มและเมทานอลขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มกับเมทานอล และ superficial velocity เนื่องจากว่าสารตั้งต้นของปฏิกิริยานี้ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ดีที่ผิวรอยต่อของวัฏภาคของเหลว ดังนั้นเมื่อของเหลวไหลผ่านเครื่องช่วยผสมไร้การเคลื่อนที่ก็จะเกิดการกระจายตัว เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นทั้งสองชนิด ดังนั้นปัจจัยที่มีส่วนสำคัญที่สุดคือพื้นที่ผิวรอยต่อระหว่างสองวัฏภาคซึ่งมีเป็นจำนวนมากในช่วงแรก ของเครื่องปฏิกรณ์ที่ยังมีความเข้มข้นของสารตั้งต้นทั้งสองชนิดสูงอยู่

จากการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่ได้ติดตั้งเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่จำนวน ส่วนประกอบ 24 ชิ้น พบว่าจะได้ปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพในผลิตภัณฑ์สูงถึง 98% เมื่อใช้ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของ ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ Superficial velocity 20.4 เมตรต่อชั่วโมง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] บัวใจ ชุ่มใจ และ สยาม ภพลือชัย. 2544. "ไบโอดีเซล เชื้อเพลิงชีวภาพแห่งยุคสมัย". *Update*. สิงหาคม 2544. 16(168) : 50-56.
- [2] ศิริวรรณ นูรีคำ. 2546. "ไบโอดีเซล ทางเลือกใหม่ทดแทนพลังงานเชื้อเพลิง." [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก [http://clgc.rdi.ku.ac.th/newsletter/news16\\_1/biodiesel.html](http://clgc.rdi.ku.ac.th/newsletter/news16_1/biodiesel.html)
- [3] อัมพล ชือตรง, สายันต์ ศรีวิเชียร. **เชื้อเพลิงและวัสดุหล่อลื่น. พิมพ์ครั้งที่ 1.** กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ. 2538.
- [4] ประเสริฐ เทียนนิมิตร, ขวัญชัย สนิทพิทยสมบุรณ์, ปานเพชร ชินินทร. **เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น. พิมพ์ครั้งที่ 1.** กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2545.
- [5] คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ, "ไบโอดีเซล : พลังงานอนาคตของชาติ." [Online]. Available : <http://www.eppo.go.th/nepc/doc-NEPC-2544-03.html> . 2544.
- [6] Barnwal B.K., Sharma M.P. "Prospect of biodiesel production from vegetable oils in India." *Renewable & sustainable energy reviews*, vol. 9, 2005. pp. 363-378
- [7] พิสมัย เจนวนิชปัญญกุล. 2544. "ไบโอดีเซล : พลังงานทางเลือกใหม่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล" **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.** กันยายน-ธันวาคม 2544. ปีที่ 3, ฉบับที่ 16, หน้า 5-7
- [8] Shay E.G. "Diesel fuel from vegetable oils: status and opportunities." *Biomass and Bioenergy*. vol. 4, 1993. pp. 227-242
- [9] Fangrui, M. and Milford, A.H. "Biodiesel production : a review.", *Bioresource Technology*, vol. 70, 1999. pp.1-15.
- [10] Pacific Biodiesel, Inc. 2546. "Biodiesel Fuel." [Online]. Available : [http://biodiesel.com/biodiesel\\_fuel.htm#FUEL](http://biodiesel.com/biodiesel_fuel.htm#FUEL)
- [11] Meher L.C., Vidya Sagar D., Naik S.N. "Technical aspect of biodiesel production by transesterification – a review." *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2004 pp. 1-21.
- [12] Connemann, J. and Fischer, J. "Biodiesel in Europe 1998", *International Liquid Biofuels Congress*, Parana, Brazil, 1998.
- [13] Connemann, J. and Fisher, J. "Biodiesel Quality Y2K+ Market Experiences with FAME.", *CEN/TC 19 Automotive Fuel Millennium Symposion* 25 and 26 November 1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Krisnangkura, K. and Simamahamnop, R. "Continuous Transmethylation of Palm Oil in an Organic Solvent.", *JAACS*, vol. 69, no.2., 1992. pp.166-169.
- [15] Yomi, W., Shimada, Y., Sugihara, A. and Noda, H. "Continuous Production of Biodiesel Fuel from Vegetable Oil Using Immobilized *Candida Antarctica* Lipase.", *JAACS*, vol.77, no.4, 2000. pp. 355-360.
- [16] Damoko, D. and Cheryan, M. "Continuous Production of Palm Methyl Esters.", *JAACS*, vol.77, no. 12, 2000. pp. 1269-1272.
- [17] Nouredini, H., Harkey, D. and Medikonduru, V. "A Continuous Process for the Conversion of Vegetable Oils into Methyl Esters of Fatty Acids.", *JAACS*, vol.75, no.12, 1998, pp. 1775-1783.
- [18] วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. **จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2544. หน้า 236-239.
- [19] Fogler, H.S. *Elements of Chemical Reaction Engineering*. 3<sup>rd</sup> ed. United States of America : Prentice-Hall, Inc. 1999. pp. 189, 811-820, 825-826, 829-831.
- [20] Noritake. 2546. "Static Mixer." [Online]. Available : <http://www.noritake.co.jp/eng/eeg/kakouki/feature.html>
- [21] Kenics. 2546. "Static Mixer." [Online]. Available : <http://www.kenics.com/km.php>
- [22] Goncalvs, C. B. and Meirelles, A. J. A. "Liquid-Liquid Equilibrium Data for the System Palm Oil + Fatty Acids + Ethanol + Water at 318.2 K", *Fluid Phase Equilibria*, vol.221, 2004, pp. 139-150.
- [23] จักรพงศ์ ไชยบุรี. "จลนพลศาสตร์ของการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันปาล์มในตัวทำละลาย." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.

ภาคผนวก

ตารางแสดงผลการทดลอง

ตาราง ก-1 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมัน  
ปาล์มต่อเมทานอล 1:6

อุณหภูมิ ( $^{\circ}$ ซ)	% KOH	$U_0$ (m/h)	Space time	%เมทิลเอสเทอร์ (โดยน้ำหนัก)	
50	0.5	6.8	15	52.06	
			30	65.55	
			45	71.64	
			60	72.12	
	13.6	0.5	6.8	7.5	68.82
				15	75.19
				22.5	76.78
				30	75.43
	6.8	1	6.8	15	79.88
				30	81.61
				45	85.11
				60	84.72
13.6	1	6.8	7.5	80.66	
			15	83.00	
			22.5	86.46	
			30	87.52	
60	0.5	6.8	15	67.75	
			30	79.09	
			45	78.31	
			60	80.82	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1 (ต่อ)

อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	% KOH	$U_0$ (m/h)	Space time	%เมทิลเอสเทอร์ (โดยน้ำหนัก)
60	0.5	13.6	7.5	79.34
			15	80.75
			22.5	81.95
			30	83.04
	6.8	13.6	15	80.54
			30	86.63
			45	86.96
			60	89.68
			7.5	86.33
			15	91.72
			22.5	92.41
			30	93.40
20.4	13.6	5	90.295	
		10	97.905	
		15	98.075	
		20	98.46	
27.2	13.6	3.75	76.15	
		7.5	80.37	
		11.25	81.69	
			15	82.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-2 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อ  
เมทานอล 1:4.5

อุณหภูมิ (°C)	% KOH	$U_0$ (m/h)	Space time	% เมทิลเอสเทอร์ (โดยน้ำหนัก)
50	0.5	6.8	15	59.02
			30	60.53
			45	62.58
			60	63.27
	13.6	6.8	7.5	61.56
			15	70.68
			22.5	72.97
			30	74.06
	1	6.8	15	77.56
			30	81.58
			45	81.82
			60	83.28
13.6	6.8	7.5	73.81	
		15	76.76	
		22.5	79.07	
		30	81.22	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-2 (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	% KOH	$U_0$ (m/h)	Space time	% เมทิลเอสเทอร์ (โดยน้ำหนัก)
60	0.5	6.8	15	60.54
			30	65.46
			45	69.63
			60	70.24
		13.6	7.5	72.64
			15	77.47
			22.5	78.31
			30	80.62
	6.8		15	74.14
			30	81.17
		45	82.84	
		60	84.41	
		13.6	7.5	84.36
			15	85.45
22.5	85.59			
30	85.05			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสาวสุรียาพร มาลัย
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 17 มกราคม 2518 ที่จังหวัดนครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	ระดับปริญญาตรี 2541 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี
ผลงานวิชาการ	1) “ปฏิกิริยาไฮโดรริสของซูโครสด้วยเรซิน Amberlyst 35”, การประชุม เสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 1, 2543. 2) “การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14, 2547.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้