

การผลิตไบโอดีเซล: ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของ
น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันโดยใช้อะซีโตนเป็นตัวทำละลาย



ปริญญาโทเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาด้านหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การผลิตไบโอดีเซล: ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของ
น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันโดยใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลาย



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BIODIESEL PRODUCTION: TRANSESTERIFICATION OF
SUNFLOWER OIL USING ACETONE AS CO-SOLVENT

PREM
PANATORN

TECHAWUTHITHORN
KONGPAIRIN

THIS SENIOR PROJECT IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง

การผลิตไบโอดีเซล: ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของ
น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันโดยใช้เอซีโตนเป็นตัวทำละลาย

โดย

นายเปรม เตชะวุฒิธร

อาจารย์ที่ปรึกษา

นายพนาธร ก้องไพรินทร์

ปริญญานิพนธ์

ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

ธนวรรณ พิณรัตน์

.....ประธานกรรมการ
(ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์)

.....กรรมการ
(รศ. ดร.ประกอบ กิจไชยา)

.....กรรมการ
(ผศ. ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การผลิตไบโอดีเซล: ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันโดยใช้อะซีโตนเป็นตัวทำละลาย
โดย	นายเปรม เตชะวุฒิศร นายพนารท ก้องไพรินทร์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์

บทคัดย่อ

การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันกับเมทานอล โดยใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่ง และใช้อะซีโตนเป็นตัวทำละลายร่วม เพื่อช่วยให้เกิดปฏิกริยาเป็นแบบเอกพันธ์ งานวิจัยครั้งนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 100-150 องศาเซลเซียส ปริมาณกรดซัลฟูริก 1-5% โดยมวลของน้ำมัน และปริมาณตัวทำละลาย 10-30% โดยมวลของน้ำมัน ในการทดลองใช้อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันคงที่คือ 30:1 และเวลาในการทำปฏิกริยา 20 นาที จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ การใช้อุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส ปริมาณกรดซัลฟูริก 3% โดยมวลของน้ำมัน และปริมาณอะซีโตน 10% โดยมวลของน้ำมัน ภายใต้สภาวะการเกิดปฏิกริยาดังกล่าวจะได้ผลผลิต 88.45%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report title	Biodiesel production: Transesterification of sunflower oil using acetone as co-solvent
By	Prem Techawuthithorn Panatorn Kongpairin
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2013
Advisor	Dr.Tanawan Pinnarat

Abstract

Production of biodiesel by transesterification of sunflower oil and methanol using sulfuric acid as catalyst was studied. A homogeneous reaction was formed using acetone as a co-solvent. This work studied the effects of main parameters: temperature at 100–150 °C; sulfuric acid 1–5 wt.%; co-solvent, acetone 10–30 wt.%; a molar ratio of methanol to oil of 30:1; and reaction time of 20 minutes. The optimum condition were temperature at 120°C; sulfuric acid 3 wt.%; co-solvent, acetone 10 wt.%; a molar ratio of methanol to oil of 30:1; and reaction time of 20 minutes. Under these conditions, the conversion of sunflower oil to Fatty Acid Methyl Ester (FAME) of 88.45% was obtained.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือของคณาจารย์ และบุคคลหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือดังนี้

ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่มอบความรู้ ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และชี้แนะ ข้อบกพร่อง พร้อมทั้งช่วยแก้ปัญหาในด้านต่างๆ จนสามารถดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาในการทำ ปริญญาานิพนธ์ และให้แนวทางในการดำเนินงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และอุปการณ์ในการ วิเคราะห์ผลการทดลอง

ดร.ธีรพร สุธีวงศ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาในเรื่องเคมีอินทรีย์ และ การเขียนสูตรโครงสร้าง-สมการเคมีต่างๆ

คณาจารย์ เจ้าหน้าที่ทุกฝ่ายในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้และคำแนะนำตลอดการทำปริญญา นิพนธ์

บิดาและมารดา ผู้ซึ่งให้การสนับสนุน ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจ ตลอดการ ดำเนินงานจนสำเร็จการศึกษา

พี่ น้อง และเพื่อนทุกคนที่ให้กำลังใจและคอยช่วยเหลือเป็นผลให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบแต่บิดา มารดา ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้มอบความรู้และคำสั่งสอนแก่คณะผู้จัดทำจนสามารถประสบความสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี หากมีข้อผิดพลาดประการใดคณะผู้จัดทำต้องขออภัยและน้อมรับไว้ ณ ที่นี้

เปรม เตชะวุฒิชัย

พนาร ก้องไพรินทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ ใช้งานด้าน การค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	3
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไบโอดีเซล.....	4
2.2 การผลิตไบโอดีเซล.....	4
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....	7
2.3.1 อุณหภูมิและความดัน.....	7
2.3.2 อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน.....	7
2.3.3 ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา.....	8
2.3.4 ปริมาณของกรดไขมันอิสระและน้ำในสารตั้งต้น.....	12
2.3.5 เวลาในการทำปฏิกิริยา.....	12
2.3.6 อิทธิพลของการแพร่.....	13
2.3.6.1 การปั่นกวน.....	13
2.3.6.2 ตัวทำละลาย.....	13
2.4 การใช้ตัวทำละลายในการทำปฏิกิริยา.....	13
บทที่ 3 การดำเนินงาน.....	16
ตอนที่ 1 การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....	16
1.1 อุปกรณ์.....	16
1.2 สารเคมี.....	17
1.3 การทดลอง.....	17
ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....	20
2.1 การวัดความหนืดของน้ำมันตัวอย่าง.....	20
2.2 การวัดค่าความหนาแน่นของน้ำมันตัวอย่าง.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	23
ตอนที่ 1 การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันที่นำมาเป็นวัตถุดิบ.....	23
ตอนที่ 2 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 50°C.....	23
ตอนที่ 3 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะ Subcritical.....	24
4.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา (กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 97-98%).....	24
4.2 ผลของการใช้ตัวทำละลาย.....	25
4.3 ผลของอุณหภูมิ.....	25
4.4 ผลของปริมาณอะซีโตน.....	27
4.5 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ Autoclave.....	28
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ.....	29
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	29
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	30
เอกสารอ้างอิง.....	31
ภาคผนวก.....	35
ภาคผนวก ก. วิธีการคำนวณ.....	36
ภาคผนวก ข. ข้อกำหนดมาตรฐานน้ำมันดีเซล ไปโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในประเทศไทย.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการแตกสลายทางความร้อน และน้ำมันดีเซล.....	5
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการทดลองปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..	11
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการทดลองปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..	11
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ศึกษาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 50°C.....	18
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ศึกษาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะ Subcritical.....	19
ตารางที่ 3.3 สารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะ Subcritical.....	19
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันที่เป็นวัตถุดิบ.....	23
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืด และผลการประมาณค่าไบโอดีเซล.....	23
ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลที่อุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ที่สภาวะ Subcritical.....	26
ตารางที่ 4.4 สรุปสภาวะและปริมาณที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	28
ตารางที่ ก.1 ร้อยละโดยมวลของตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	37
ตารางที่ ก.2 ร้อยละโดยมวลของตัวทำละลายและปริมาณตัวทำละลาย.....	38
ตารางที่ ก.3 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และปริมาณตัวทำละลายสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในการศึกษานี้.....	38
ตารางที่ ก.4 ข้อมูลการทดลอง.....	40
ตารางที่ ข.1 ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล.....	42
ตารางที่ ข.2 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล.....	7
รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของระบบที่มีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	8
รูปที่ 2.3 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของระบบที่มีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	9
รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาสaponifiเคชันของกรดไขมันกับด่าง.....	12
รูปที่ 2.5 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของเอสเทอร์กับน้ำ.....	12
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์เคมี ที่อุณหภูมิและความดันสูง (Autoclave).....	16
รูปที่ 3.2 การแยกชั้นระหว่างชั้นน้ำมัน (ชั้นบน) และชั้นน้ำ (ชั้นล่าง) ในขั้นตอนการล้าง เมทานอล อะซิโตน และกรดซัลฟิวริกด้วยน้ำกลั่น.....	20
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลและปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาที่ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 เวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 150°C และความดัน 2 bar.....	24
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลและปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาที่ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 เวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 150°C และความดัน 2 bar ของปฏิกริยาที่ไม่มีอะซิโตน และมีอะซิโตน 20% โดยมวลน้ำมัน.....	25
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลและปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาที่ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 เวลา 20 นาที อะซิโตน 20% โดยมวลน้ำมันที่อุณหภูมิ 100°C 120°C และ 150°C ความดัน 2 bar.....	26
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลและปริมาณอะซิโตน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยา 3% โดยมวลน้ำมัน ณ สภาวะที่ทำปฏิกริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน อุณหภูมิ 120°C และความดัน 2 bar.....	27
รูปที่ 4.5 ข้อมูลอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เคมีขณะทำการเพิ่มอุณหภูมิ.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันเชื้อเพลิงในการขนส่ง และการเดินทางมาจากแหล่งฟอสซิลเป็นส่วนใหญ่ เช่น แก๊สโซลีน ดีเซล หรือเคโรซีน ด้วยจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นทำให้มีความต้องการเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การใช้เชื้อเพลิงประเภทนี้เป็นจำนวนมากส่งผลให้เกิดมลภาวะทางอากาศ ภาวะโลกร้อน และการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ ดังนั้นปัจจุบันจึงมีการหาเชื้อเพลิงทดแทน ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น มีการพัฒนาพลังงานชีวมวล ซึ่งหนึ่งในพลังงานที่เข้ามามีบทบาทแก้ปัญหาพลังงานในปัจจุบันของประเทศไทย คือ ไบโอดีเซล [1]

ไบโอดีเซล เป็นเชื้อเพลิงที่สามารถผลิตจากธรรมชาติ สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ส่วนสำคัญ คือ ไม่มีส่วนประกอบของสารประกอบซัลเฟอร์ที่ก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม [2] ไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ระหว่างไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride: TG) ในน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์สายโซ่สั้น เช่น เมทานอล เอทานอล เป็นต้น ได้ผลิตภัณฑ์เป็น แอลคิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล และกลีเซอรอล โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี (กรดหรือด่าง) ตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ (เอนไซม์)

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีนั้นสามารถใช้ได้ทั้ง กรดและด่าง สำหรับการใช้อย่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นที่นิยมมากในการผลิตระดับอุตสาหกรรม แต่จะใช้ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นน้ำมันบริสุทธิ์เท่านั้น ถ้าแหล่งน้ำมันราคาถูกมักมีสารเจือปนที่มีองค์ประกอบของน้ำ และกรดไขมันอิสระ ถ้ามีน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ เกิดเป็นกรดไขมันอิสระทำปฏิกิริยากับด่างเกิด เป็นสบู่มีผลทำให้ปริมาณไบโอดีเซลที่ได้ลดลง [3] สำหรับการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นการแก้ปัญหาในกรณีที่กรดไขมันอิสระเจือปนในสารตั้งต้น ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันพร้อมกับการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ผลิตไบโอดีเซลได้ทั้งสองปฏิกิริยา แต่เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยากรดสามารถแตกตัวได้ดี ถ้าสารตั้งต้นมีน้ำเจือปนจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยากับน้ำได้ง่ายทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ผลที่ตามมา คือปริมาณไบโอดีเซลลดลง [4] ตัวเร่งปฏิกิริยาอีกประเภท คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ เช่น การใช้ไลเปส (Lipase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทนการใช้สารเคมี สามารถแก้ปัญหา และลดข้อจำกัดของสารเจือปนในสารตั้งต้น ทั้งกรดไขมันอิสระและน้ำ กระบวนการผลิตที่ใช้ไลเปสถือเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และไม่

มีของเสียจากการผลิตเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามการผลิตในระดับอุตสาหกรรมไม่เป็นที่นิยมมากนัก เพราะไลเพสมีราคาสูง [5]

ด้วยข้อจำกัดของตัวเร่งปฏิกิริยา นำไปสู่การพัฒนาทำปฏิกิริยาโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้น คือ การทำปฏิกิริยาที่อยู่ในสภาวะอุณหภูมิวิกฤติ และความดันวิกฤติ (supercritical condition) คุณสมบัติของของไหล ณ สภาวะนี้จะมีความสามารถในการแพร่กระจายตัวเหมือนแก๊ส และของไหลมีความหนาแน่นอยู่ระหว่างของเหลว และแก๊ส รวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของการละลายจึงทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงในกระบวนการผลิต เพราะใช้อุณหภูมิ และความดันในสภาวะวิกฤติ ซึ่งแต่ละสภาวะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารแต่ละชนิด เช่น เมทานอล ($T_c=239.6^{\circ}\text{C}$, $P_c=8.09\text{ MPa}$) เป็นต้น [6] ทำให้การผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีนี้ไม่พบมากในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ การศึกษาเพื่อผลิตไบโอดีเซลจึงมีอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดการใช้พลังงาน ส่งผลให้มีการคิดวิธีการใหม่ๆ ตัวอย่างเช่นการใช้ตัวทำละลายร่วม เช่น เฮกเซน เฮปเทน เตตระไฮโดรฟูแลน เป็นต้น เนื่องจากสามารถลดความหนืดของน้ำมัน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มการถ่ายโอนมวลสารทำให้สามารถเกิดผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลได้ และอาจช่วยลดอุณหภูมิและเวลาในการดำเนินปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ [7] แต่การเลือกตัวทำละลายร่วมที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลมีข้อจำกัดจากคุณสมบัติของตัวทำละลายร่วมเอง เช่น จุดเดือดของตัวทำละลายร่วม ความสามารถในการละลายของสารที่มีขั้วและไม่มีขั้ว เป็นต้น

ไบโอดีเซลที่มีการผลิตอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน มาจากผลิตภัณฑ์ทางเกษตรกรรมชนิดต่างๆ โดยเฉพาะพืชที่ให้น้ำมัน เช่น ปาล์ม ถั่วเหลือง มะพร้าว ทานตะวัน เป็นต้น เมื่อกล่าวถึงพืชที่ให้น้ำมันอีกชนิดหนึ่ง คือ สาหร่าย ส่วนใหญ่นำไปใช้ในการผลิตอาหารเสริม หรืออุตสาหกรรมเสริมความงาม ซึ่งสาหร่ายบางสายพันธุ์มีปริมาณน้ำมันเป็นองค์ประกอบที่สูง เมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งแล้ว จึงถือว่าเป็นพืชที่มีศักยภาพในการผลิตไบโอดีเซล อีกทั้งยังสามารถเจริญเติบโตและให้ผลผลิตที่รวดเร็วกว่าพืชที่ให้น้ำมันชนิดอื่น จึงเป็นไปได้ว่าสามารถพัฒนาการผลิตเป็นระดับอุตสาหกรรมในอนาคต [8]

จากธรรมชาติของสารตั้งต้น (สาหร่าย) สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันนั้น จะมีกรดไขมันอิสระ และน้ำ เป็นองค์ประกอบด้วย การแยกกรดไขมันอิสระออกจากน้ำมันนั้นทำได้ยากกว่าการแยกน้ำ เพราะจุดเดือดที่สูงกว่าของกรดไขมันอิสระในน้ำมันส่งผลให้การใช้พลังงานมากกว่าการแยกน้ำ สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดร่วมกับตัวทำละลายร่วมจึงมีความเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการนี้จึงเลือกทำการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้กรดซัลฟิวริก และใช้อะซีโตนเป็นตัวทำละลาย เพื่อหาปริมาณตัวทำละลาย ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน ในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาสู่ระดับอุตสาหกรรม

วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันที่ใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 97-98% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ร่วมกับตัวทำละลายคือ อะซีโตน และหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล

ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรดซัลฟิวริก) ที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันระหว่างช่วง 1-5% โดยมวลของน้ำมัน
 2. ศึกษาตัวทำละลาย คือ อะซีโตน ที่ช่วงอัตราส่วน 0-30% โดยมวลของน้ำมัน ที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน
 3. หาสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในช่วงอุณหภูมิ 100-150°C
- โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 30:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 20 นาที สำหรับทุกการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไบโอดีเซล

ปัจจุบันราคาของเชื้อเพลิงที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมมีราคาสูงขึ้น ทำให้มีการค้นคว้าวิจัยพลังงานทดแทนใหม่ๆ ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจอีกทางหนึ่ง เนื่องจากสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบธรรมชาติ มีค่าซีเทนสูง สามารถผลิตได้ง่ายกว่าน้ำมันดีเซลและปลอดภัยในการใช้งาน เนื่องจากไม่ติดไฟ ไม่เป็นพิษ มีจุดวาบไฟต่ำ ลดการปลดปล่อยมลพิษ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ฝุ่นขนาดเล็ก (Particle matter), สารประกอบซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) และไฮโดรคาร์บอน ทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

สารตั้งต้นที่นำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลมาจากธรรมชาติแบ่งออกเป็นสองแหล่ง คือ น้ำมันจากพืช และน้ำมันจากสัตว์ น้ำมันจากพืช เช่น น้ำมันมะพร้าว (Coconut oil) น้ำมันปาล์ม (Palm oil) น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil) น้ำมันเมล็ดเรพ (Rapeseed oil) และน้ำมันจากสาหร่าย (Algae oil) เป็นต้น น้ำมันจากสัตว์ เช่น น้ำมันหมู (Lard) เป็นต้น องค์ประกอบของน้ำมันจะแตกต่างกันไปตามชนิดของน้ำมัน เช่น น้ำมันเมล็ดเรพจะมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ โอเลอิก (Oleic) และลิโนเลอิก (Linoleic) ส่วนน้ำมันปาล์มจะมีกรดไขมันไม่อิ่มตัว และกรดไขมันอิ่มตัวผสมกัน คือ โอเลอิก (Oleic) และปาล์มมิติก (Palmitic) [9, 10, 11] แต่แต่ละประเทศสามารถเพาะปลูกพืชน้ำมันแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมในการเพาะปลูก และการผลิตโดยการใช้ไขมันที่แตกต่างกันส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตด้วย รวมทั้งความบริสุทธิ์ของน้ำมันที่นำมาใช้จะมีผลต่อกระบวนการผลิตโดยตรง สารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์สูงมีราคาแพง จึงมีการศึกษาเพื่อนำน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้ว (Waste cooking oil) ซึ่งมีราคาถูกกว่ามาใช้เป็นสารตั้งต้น แต่จะมีสารเจือปนคือ กรดไขมันอิสระและน้ำ [11, 12] ทำให้กระบวนการผลิตไบโอดีเซลต้องมีการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสม การผลิตไบโอดีเซลนั้นมีหลายวิธีด้วยกันดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.2 การผลิตไบโอดีเซล

ช่วงแรกมีการใช้น้ำมันพืชเติมโดยตรงกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่มีการผสมสารเคมีใดๆ ทำให้ต้นทุนถูก แต่วิธีการนี้ส่งผลให้เครื่องยนต์ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากน้ำมันมีความหนืดสูง ส่งผลให้หัวฉีดน้ำมันฉีดน้ำมันให้เป็นฝอยได้ยาก เกิดการจุดระเบิดได้ยาก การสันดาปไม่สมบูรณ์ และเหลือคราบเขม่าเกาะที่หัวฉีด การใช้น้ำมันชนิดนี้เครื่องยนต์ดีเซลจำเป็นต้องมีการอุ่นน้ำมันในทุกจุดที่น้ำมันไหลผ่านเพื่อป้องกันการเกิดไขในเครื่องยนต์ ซึ่งก่อให้เกิดการอุดตันภายใน

เครื่องยนต์ จากปัญหาดังกล่าวได้มีการปรับปรุงเป็นการใช้ไบโอดีเซลแบบลูกผสมโดยการนำ น้ำมันพืช หรือน้ำมันสัตว์มาผสมกับน้ำมันก๊าด หรือน้ำมันดีเซล เพื่อลดความหนืด และปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณสมบัติคล้ายน้ำมันดีเซลมากขึ้น [3, 14] แต่ไบโอดีเซลแบบดังกล่าวก็ยังมีข้อเสียคือ ระยะเวลาเป็นไอได้ง่าย และต้องการส่วนผสมที่เป็นน้ำมันดีเซลเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงมีนักวิจัย คิดค้นวิธีการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ส่วนผสมจากปิโตรเลียมให้น้อยที่สุด หรือไม่ต้องมีส่วนผสมจากปิโตรเลียมเลย วิธีดังกล่าว เช่น การทำไมโครอิมัลชัน การแตกสลายทางความร้อน ปฏิกริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชัน

การทำไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) คือ กระบวนการลดความหนืดของน้ำมันโดยใส่ สารเติมแต่งจำพวกอิมัลชัน (Emulsion) เป็นตัวทำละลาย (Solvent) เช่น อะซีโตน (Acetone) เมทานอล (Methanol) และเอทานอล (Ethanol) เป็นต้น เพื่อให้เกิดสมดุลของการกระจายตัวของ สารแขวนลอยของอนุภาคของเหลวชนิดหนึ่งในของเหลวอีกชนิดหนึ่งที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ข้อเสียของวิธีการนี้คือค่าซีเทน (Cetane number) และค่าความความร้อนของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จะ ลดลง [13, 14]

วิธีการแตกสลายทางความร้อน (Thermal cracking หรือ Pyrolysis) คือ การให้ความร้อน กับน้ำมันเพื่อให้ไขมันแตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลง

Niehaus และคณะ [15] กับ Schwab และคณะ [16] ทำการทดลองโดยการให้ความร้อน กับน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 850°C ผลที่ได้คือค่าซีเทนและค่าความร้อนสูงสุดที่ได้มีค่าสูงขึ้นจาก 38 MJ/kg เป็น 43 MJ/kg และ 39 MJ/kg เป็น 40 MJ/kg ตามลำดับ จากค่าซีเทนและค่าความร้อน สูงสุดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การเผาไหม้ในเครื่องยนต์มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น แต่อย่างน้อยก็น้ำมันดีเซลที่มี ค่าซีเทน 50 และค่าความร้อนสูงสุด 45 MJ/kg [10, 11, 17] ส่วนความหนืดมีค่าลดลงจาก 32 cSt เป็นประมาณ 9 cSt ที่อุณหภูมิ 37.8°C ซึ่งเป็นผลดีต่อการนำน้ำมันมาใช้เป็นเชื้อเพลิง แต่ข้อเสีย คือ มีจุดไหลเท (Pour point) ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก -12.2°C เป็นประมาณ 6°C [14] ทำให้การทำงานของเครื่องยนต์มีปัญหาด้านการไหลของน้ำมันเมื่ออุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการแตกสลายทางความร้อน และ น้ำมันดีเซล

	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการ แตกสลายทางความร้อน	น้ำมันดีเซล
ค่าซีเทน	38.0	43.0	50.0
ค่าความร้อนสูงสุด (MJ/kg)	39.0	40.0	45.0
จุดไหลเท (°C)	-12.2	6.0	-6.7
ความหนืด at 37.8°C (cSt)	32.0	9.0	3.0

โดยค่าตัวแปรสำคัญที่ใช้คุณภาพน้ำมัน คือ

- ค่าซีเทน (Cetane number) คือ คุณภาพการจุดติดไฟ เมื่อค่านี้มากจะทำให้การเผาไหม้ได้ดีขึ้น
- ค่าความร้อนสูงสุด (Higher heating value: HHV) คือ ค่าความร้อนสูงสุดที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เมื่อค่านี้มากจะทำให้ได้ความร้อนจากการเผาไหม้มาก ซึ่งเป็นผลดีต่อการเผาไหม้
- จุดไหลเท (Pour point) คือ อุณหภูมิ ณ จุดที่ของเหลวเริ่มแข็งตัว และไม่สามารถไหลได้สะดวก เมื่อค่านี้ลดลงจะส่งผลให้น้ำมันสามารถทำงานที่อุณหภูมิต่ำลงได้
- ความหนืด (Viscosity) คือ ค่าบ่งชี้คุณสมบัติความต้านทานในการไหลของของไหล เมื่อค่านี้ต่ำจะช่วยให้การไหลคล่องตัวขึ้นซึ่งเป็นผลดีต่อเครื่องยนต์

การผลิตไบโอดีเซลอีกวิธีหนึ่งคือ การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) และการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) เป็นวิธีที่นิยมในใช้อุตสาหกรรม โดยน้ำมันชนิดนี้สามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ต้องผสมน้ำมันดีเซล หรือใส่สารเติมแต่งเพิ่มเติม เรียกว่าน้ำมันที่ผ่านกระบวนการนี้ว่า “ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์”

ข้อดีของไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ คือ หลังจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ จะไม่มีการปลดปล่อยเขม่า ลดปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน และยังสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีอีกด้วย ทำให้น้ำมันชนิดนี้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าน้ำมันดีเซล ด้านคุณสมบัติไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์มีค่าซีเทนประมาณ 46-65 ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันธรรมชาติที่นำมาผลิตไบโอดีเซล นอกจากนี้ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ยังมีความปลอดภัยในการเก็บและขนส่งมากกว่า เนื่องจากมีจุดวาบไฟ (Flash point) ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ $60-100^{\circ}\text{C}$ [10, 11, 17] ทำให้โอกาสที่จะเกิดการลุกวาบของไฟน้อยลง ด้านกระบวนการผลิตยังมีผลพลอยได้จากปฏิกิริยา คือ กลีเซอรอล (Glycerol) ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง แต่ไบโอดีเซลก็มีข้อด้อยกว่าน้ำมันดีเซล คือ มีค่าความร้อนจากการเผาไหม้น้อยกว่า และมีค่าความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล สำหรับในประเทศไทยที่มีสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ ยังมีคุณสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญ คือ จุดไหลเท (Pour point) และจุดหมอก (Cloud point) เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันน้อยกว่าสองค่าดังกล่าวจะทำให้เกิดผลกระทบขึ้น คือ ปัญหาด้านการไหล และเกิดไขซึ่งเป็นสาเหตุของการอุดตันในเครื่องยนต์ [18]

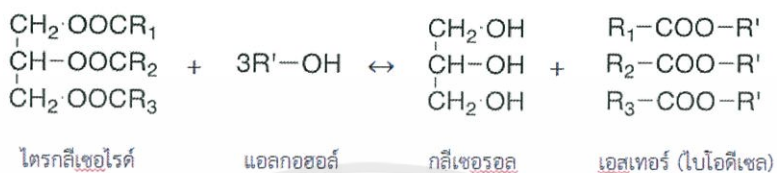
การผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันถือเป็นหนึ่งทางเลือก โดยมีหลายปัจจัย

ที่ต้องคำนึงถึงในการผลิต ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันมีสารตั้งต้น คือ น้ำมันหรือไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) กับแอลกอฮอล์ (Alcohol) ดังแสดงในรูป 2.1 โดยทั่วไปใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซล (เอสเทอร์) และกลีเซอรอล



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล

โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันมีดังนี้

2.3.1 อุณหภูมิและความดัน

ประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซลจะดีขึ้นถ้าอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน [14, 19] และอุณหภูมิที่สูงยังช่วยลดความหนืดของสารในระบบ ระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะใช้อุณหภูมิประมาณ 60°C [20, 21, 22, 23] แต่ระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 60-70°C [4, 24, 25, 26] แต่ในบางการทดลองใช้อุณหภูมิประมาณ 100°C [7] ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นในระบบด้วย เช่น อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน และปริมาณตัวเร่งเป็นต้น ส่วนความดันที่เพิ่มขึ้นจะช่วยลดปริมาณไอของแอลกอฮอล์ในระบบให้อยู่ในสถานะเอกพันธ์เดียวกับสารอื่นซึ่งอยู่ในวัฏภาคของเหลว แต่ในระบบที่ใช้ตัวเร่งจะใช้ความดันบรรยากาศเนื่องจากมีส่วนที่กลายเป็นไอน้อย และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดันสูงเกินกว่าจุดวิกฤตของสารในระบบจะส่งผลให้เกิดของไหลเหนือวิกฤตทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น เพราะสถานะของไหลเหนือวิกฤตมีอัตราการแพร่ที่ดีกว่าสถานะของเหลว ในการทำปฏิกิริยาสามารถลดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาลงได้โดยการปรับเปลี่ยนปัจจัยอื่น เช่น ปริมาณแอลกอฮอล์ ปริมาณตัวเร่ง และการใส่ตัวทำละลายเป็นต้น

2.3.2 อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

สมการปฏิกิริยาเคมีแสดงอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ที่ต้องใช้น้ำมันตามปริมาณสารสัมพันธ์เป็น 3:1 (ตามรูปที่ 2.1) แต่ในการผลิตไบโอดีเซลจะใช้แอลกอฮอล์มากเกินไปเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น แต่จะไม่ใส่ให้มากเกินไปเพราะจะทำให้สารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาเจือจาง ระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันอยู่ที่ประมาณ 6:1 [20, 21, 22, 23] ส่วนระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะใช้อัตราส่วนโดยโมลประมาณ 30:1 [24, 25] บางระบบอาจจะใช้อัตราส่วนโดยโมลสูงถึง 245:1 เพื่อลดระยะเวลาในการ

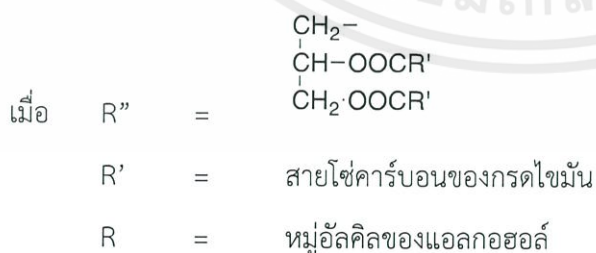
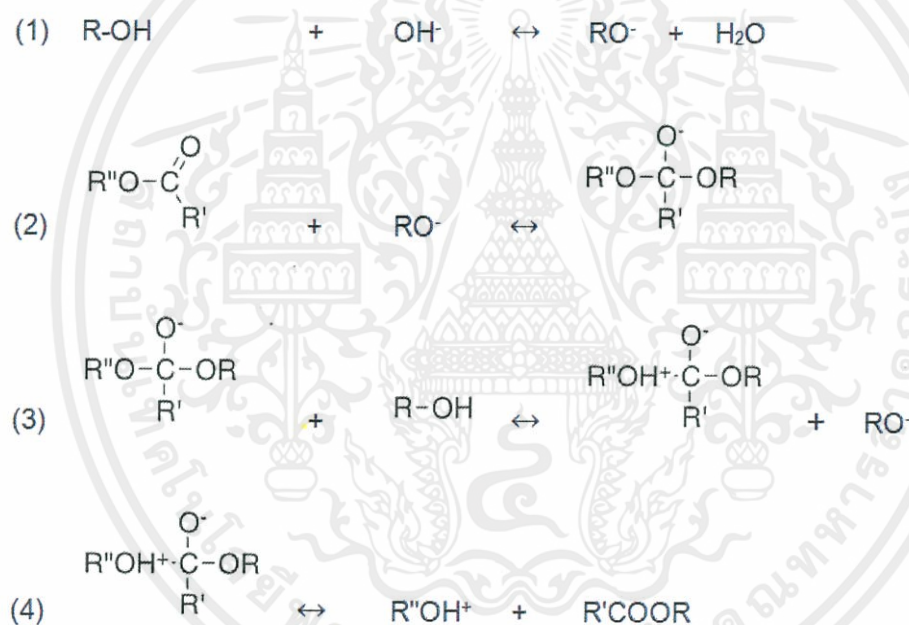
ทำปฏิกิริยา [26] แต่ในการทดลองของ Wang และคณะ พบว่าการเพิ่มแอลกอฮอล์ในระบบมากเกินไปส่งผลให้ได้ผลผลิตที่น้อยลงเนื่องจากเกิดการเจือจางของตัวเร่ง [7, 22]

2.3.3 ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ เบส กรด และเอนไซม์ อีกทั้งในการผลิตไบโอดีเซลสามารถผลิตได้โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและความดันไม่สูง แต่ต้องใช้น้ำมันที่มีความบริสุทธิ์สูงในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากจะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงดังจะกล่าวในหัวข้อ 2.3.4 การเกิดปฏิกิริยาโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสสามารถเขียนกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.2 [27]

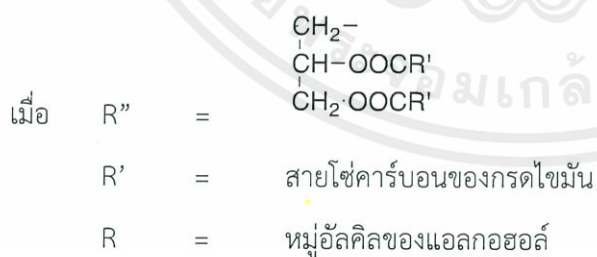
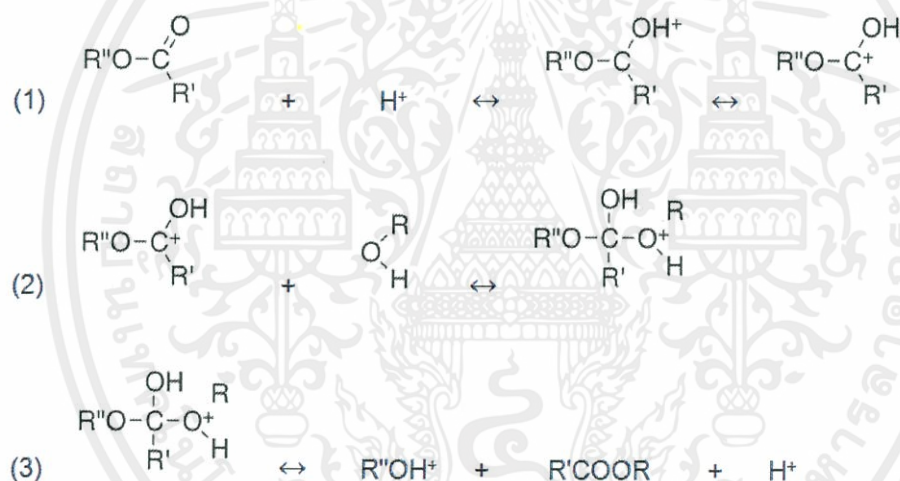


รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของระบบที่มีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาด้านนี้ มิใช่อนุญาตให้เผยแพร่เพื่อประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.) แอลกอฮอล์จะทำปฏิกิริยากับตัวเร่งชนิดเบส เกิดเป็นแอลคอกไซด์ไอออน (alkoxide ion: RO⁻) และโปรตอน (proton)
- 2.) แอลคอกไซด์ไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนิลคาร์บอนของไตรกลีเซอไรด์
- 3.) แอลกอฮอล์จะทำปฏิกิริยาต่อที่ตำแหน่งหมู่แอลคิล เกิดเป็นไตรกลีเซอไรด์ที่พร้อมจะแตกตัวเป็นไบโอดีเซลและแอลคอกไซด์
- 4.) ไตรกลีเซอไรด์แตกตัวออกเป็นไบโอดีเซลและไดกลีเซอไรด์

การทดลองผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาส่วนมากจะผลิตด้วยสภาวะที่ใกล้เคียงกันคือ ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 60 °C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ประมาณ 1% โดยน้ำหนัก เมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาประมาณ 20-30 นาที จะได้ผลผลิตไบโอดีเซลประมาณ 90% [20, 21] และถ้าใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 1 ชั่วโมง จะได้ผลผลิตไบโอดีเซลได้มากกว่า 95% [22, 23]



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของระบบที่มีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดไม่จำเป็นต้องใช้น้ำมันที่มีความบริสุทธิ์สูงเท่ากับน้ำมันที่ใช้ในระบบที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากกรดไขมันอิสระในน้ำมันไม่ขัดขวางการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด แต่ข้อเสียของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้คือประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซลต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และไม่สามารถใช้ได้ในสารตั้งต้นที่มีน้ำอยู่มากกว่า 0.6% โดยน้ำหนัก [11]

กลไกในการช่วยให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแตกต่างจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส โดยกลไกดังกล่าวจะมี 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.3 [27]

1.) โพรตอนเข้าทำปฏิกิริยาในตำแหน่งออกซิเจน ทำให้คาร์บอนิลคาร์บอนมีความเป็นบวกมากขึ้น

2.) ออกซิเจนของแอลกอฮอล์เข้าทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิล

3.) ไตรกลีเซอไรด์ส่วนที่ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์แตกตัวออกมาเป็นไบโอดีเซล

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน [14, 19] ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะส่งผลให้ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามไปด้วย การทดลองของ Freedman และคณะ [24] ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60°C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1 และกรดซัลฟิวริก 3% โดยน้ำหนัก ใช้เวลา 48 ชั่วโมง ในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลผลิตมากกว่า 90% การทดลองของ Wang และคณะ [22] ทำการทดลองที่สภาวะใกล้เคียงกันคืออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันน้อย และปริมาณกรดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ใช้อุณหภูมิสูงกว่าคือ 95°C ผลที่ได้คือใช้เวลาน้อยลงมากกว่าครึ่งคือ 20 ชั่วโมงเพื่อให้ได้ผลผลิตมากกว่า 90%

บางการทดลองใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสูงถึงหลักร้อย และใช้ปริมาณกรดมากเช่นการทดลองของ Lam กับ Lee [4] ใช้อุณหภูมิ 60°C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 180:1 และกรด 35% โดยน้ำหนัก พบว่าใช้เวลาเพียง 6 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ผลผลิต 98.00% ส่วนการทดลองของ Zheng และคณะ [22] ใช้อุณหภูมิ 70°C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 245:1 และกรด 41.8% โดยน้ำหนัก ได้ผลผลิตไบโอดีเซล 99.00% โดยใช้เวลาเพียง 4 ชั่วโมงในการทำปฏิกิริยา จะเห็นได้ว่าการทดลองที่ใส่ปริมาณแอลกอฮอล์สูงจะใส่กรดสูงตามไปด้วย เนื่องจากการใส่ปริมาณแอลกอฮอล์ที่สูงจะส่งผลให้กรดเจือจาง ดังนั้นจึงต้องใส่ปริมาณกรดสูงตามไปด้วยเพื่อให้กรดทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สภาวะการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งแบบกรดและเบสสรุปไว้ในตารางที่ 2.2 และ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการทดลองปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

น้ำมัน	ตัวเร่ง		อุณหภูมิ (°C)	แอลกอฮอล์	อัตราส่วนแอล- กอฮอล์ต่อน้ำมัน	เวลา	ประสิทธิภาพ	อ้างอิง
	ชนิด	ปริมาณ						
น้ำมันคาโนลา	โซเดียมไฮดรอกไซด์	1.0% โดยน้ำหนัก	60	เมทานอล	6 ต่อ 1	20 นาที	>90%	[20]
น้ำมันใช้แล้ว	โซเดียมไฮดรอกไซด์	1.1% โดยน้ำหนัก	60	เมทานอล	7 ต่อ 1	20 นาที	88.80%	[21]
น้ำมันใช้แล้ว	โซเดียมไฮดรอกไซด์	1.0% โดยน้ำหนัก	65	เมทานอล	6 ต่อ 1	60 นาที	97.02%	[22]
น้ำมันพืช	โซเดียมไฮดรอกไซด์	1.0% โดยน้ำหนัก	60	เมทานอล	6 ต่อ 1	60 นาที	99.00%	[23]

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการทดลองปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

น้ำมัน	ตัวเร่ง		อุณหภูมิ (°C)	แอลกอฮอล์	อัตราส่วนแอล- กอฮอล์ต่อน้ำมัน	เวลา	ประสิทธิภาพ	อ้างอิง
	ชนิด	ปริมาณ						
น้ำมันพืช	กรดซัลฟิวริก	1.0% โดยน้ำหนัก	65	เมทานอล	30 ต่อ 1	69 ชั่วโมง	99.00%	[24]
น้ำมันถั่วเหลือง	กรดซัลฟิวริก	3.0% โดยน้ำหนัก	60	เมทานอล	30 ต่อ 1	48 ชั่วโมง	98.00%	[25]
น้ำมันสาหร่าย	กรดซัลฟิวริก	35.0% โดยน้ำหนัก	60	เมทานอล	180 ต่อ 1	6 ชั่วโมง	98.00%	[4]
น้ำมันใช้แล้ว	กรดซัลฟิวริก	41.8% โดยน้ำหนัก	70	เมทานอล	245 ต่อ 1	4 ชั่วโมง	99.00%	[26]
น้ำมันใช้แล้ว	กรดซัลฟิวริก	4.0% โดยน้ำหนัก	95	เมทานอล	20 ต่อ 1	20 ชั่วโมง	>90%	[22]

2.3.4 ปริมาณของกรดไขมันอิสระและน้ำในสารตั้งต้น

ปริมาณของกรดไขมันอิสระในน้ำมันส่งผลแตกต่างกันต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน โดยปกติในระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะทำการแยกกรดไขมันอิสระออกให้เหลือน้อยกว่า 0.5-3% โดยน้ำหนัก และเหลือน้ำน้อยกว่า 0.6% โดยน้ำหนัก [11] เนื่องจากกรดไขมันอิสระสามารถทำปฏิกิริยากับเบสที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง และยังทำให้เกิดสบู่จากปฏิกิริยาสaponification ดังแสดงในรูป 2.4 ซึ่งทำให้ยากต่อการแยกเพื่อทำให้ได้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ ส่วนน้ำสามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับเอสเทอร์เกิดเป็นกรดไขมันดังแสดงในรูป 2.5 และยังส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องทำให้เกิดสบู่ดังที่ได้กล่าวในข้างต้น [13]



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาสaponificationของกรดไขมันกับด่าง



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอสเทอร์กับน้ำ

สำหรับระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดสามารถใช้น้ำมันที่มีส่วนผสมของกรดไขมันอิสระได้สูงกว่าเบส เพราะกรดไขมันอิสระและตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดไม่เกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดสบู่ แต่ยังเกิดปัญหาเกี่ยวกับน้ำเช่นเดียวกันกับในระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส คือ น้ำทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

2.3.5 เวลาในการทำปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาจนถึงระยะหนึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลงและเมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับจะทำให้ระบบเข้าสู่สมดุล กล่าวคือความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6 อิทธิพลของการแพร่ (diffusion limit)

อิทธิพลของการแพร่จะเกิดขึ้นสำหรับระบบที่สารตั้งต้นไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน โดยการเพิ่มการละลาย และการแพร่ของสารตั้งต้น สามารถลดอิทธิพลของการแพร่มีผลต่อปฏิกิริยา เช่น การเพิ่มพลังงานอิสระที่พื้นผิว เพิ่มความสามารถในการละลาย และเพิ่มการถ่ายเทมวลสารเป็นต้น วิธีการลดอิทธิพลของการแพร่มีดังนี้

2.3.6.1 การปั่นกววน

การปั่นกววนเป็นการเพิ่มพลังงานอิสระที่พื้นผิว (Surface free energy) และเพิ่มอิทธิพลของการแพร่โดยการตีของเหลวเข้าด้วยกัน ส่งผลให้เกิดการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสเร็วขึ้น และของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายกันได้ชั่วขณะหนึ่ง เมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสในการเกิดปฏิกิริยาของสารเพิ่มขึ้น และการถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้นปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น [27]

2.3.6.2 ตัวทำละลาย

ตัวทำละลายมีผลต่อปฏิกิริยา คือ ช่วยลดความหนืดในระบบ เพิ่มความสามารถในการละลาย ลดเวลาในช่วงก่อนที่สารจะเริ่มเกิดปฏิกิริยา (initial lag phase) และเพิ่มการถ่ายเทมวลสาร [4] ดังนั้นการผสมตัวทำละลายเข้าในระบบช่วยให้เกิดแรงขับเคลื่อนปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากขึ้น และอาจลดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาลงได้ด้วย แต่ถ้าตัวทำละลายมากเกินไปจะทำให้ยากต่อการแยกผลิตภัณฑ์ออกจากสารอื่นที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา [3] ตัวอย่างการใช้ตัวทำละลายในการผลิตไบโอดีเซลจะแสดงหัวข้อถัดไป

2.4 การใช้ตัวทำละลายในการทำปฏิกิริยา

จากการทดลองของนักวิจัยหลายท่าน [1, 3, 4, 28, 30] พบว่าการใส่ตัวทำละลายสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยา โดยที่ให้ผลผลิตไบโอดีเซลเท่าเดิมแต่ลดสถานะในการทำปฏิกิริยา ลง เช่น ลดอุณหภูมิและความดันในการทำปฏิกิริยา ลดการใช้แอลกอฮอล์ในปฏิกิริยา ลดเวลาในการทำปฏิกิริยา

Lam และ Lee [4] ทำการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่าย ใช้ตัวทำละลายช่วยในปฏิกิริยาทำให้เพิ่มการละลายระหว่างน้ำมันจากสาหร่ายกับเมทานอล ลดเวลาในช่วงก่อนที่สารจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้ปริมาณเมทานอลน้อย และเพิ่มการถ่ายเทมวลสารระหว่างสารตั้งต้น โดยตัวทำละลายที่ใช้ในการทดลองคือ เฮกเซน (hexane), เอทานอล (ethanol), เทตราไฮโดรฟูแลน, โทลูอิน (toluene), เอทิลอะซิเตต (ethyl acetate), คลอโรฟอร์ม (chloroform) ที่สภาวะการทดลอง 60°C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 60:1 กรดซัลฟิวริก 21% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อตัวทำละลาย 0.25 และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง พบว่าระบบที่ใช้ เทตราไฮโดรฟูแลนได้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดคือ 60% โทลูอินและเฮกเซนได้ผลผลิต 45% และ 25% ตามลำดับ ส่วนระบบที่เหลือได้ผลผลิตไบโอดีเซลน้อยกว่า 20% การทดลองขั้นต่อมา Lam และ Lee

ได้ทำการทดลองที่สภาวะเดิมแต่ใช้เททราไฮโดรฟูแลนในอัตราส่วนต่างๆ (อัตราส่วนโดยโมลของ เมทานอล 0.05, 0.15, 0.25, 0.4, 0.5 โมล ต่อเททราไฮโดรฟูแลน 1 โมล) ผลที่ได้คืออัตราส่วน 0.05 จะได้ผลผลิต 20% และอัตราส่วน 0.25 ได้ผลผลิต 60% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนมากขึ้นเกิน 0.25 จะทำให้ได้ผลผลิตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากการเปรียบเทียบระบบที่ใช้ตัวทำละลายและไม่ใช้ตัวทำละลายที่ สภาวะ 60°C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อเททราไฮโดรฟูแลนต่อน้ำมันเท่ากับ 60:15:1 ตัวเร่ง กรดซัลฟิวริก 21% และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง พบว่าระบบที่มีตัวทำละลายจะได้ผลผลิต 95 % แต่ระบบที่ไม่ใส่ตัวทำละลายจะได้ผลผลิตเพียง 32%

Guan และคณะ [1] ได้ทำการทดลองโดยเปรียบเทียบตัวทำละลายหลายๆชนิด คือ ไดเมทิลอีเทอร์ (dimethyl ether: DME), ไดเอทิลอีเทอร์ (diethyl ether: DEE), เททราบิวทิล- เมทิลอีเทอร์ (tert-butyl methyl ether: TBME) และเททราไฮโดรฟูแลน (tetrahydrofuran: THF) ตัวทำละลายแต่ละชนิดจะมีปริมาณการผสมที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป และถ้าใส่ตัวทำละลาย มากเกินไปจะส่งผลให้ผลผลิตไบโอดีเซลลดลง สารตั้งต้นที่ใช้คือน้ำมันดอกทานตะวันกับเมทานอล การทดลองที่อุณหภูมิ 25 °C ใส่ตัวเร่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5% โดยน้ำหนัก พบว่าการ เปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที และสำหรับระบบที่ใส่ตัวทำละลายด้วย อัตราส่วนโดยโมลของตัวทำละลายต่อเมทานอล 6:1 และ 8:1 น้ำมันดอกทานตะวันจะเกิดปฏิกิริยา ได้มากกว่า 95% ซึ่งมากกว่าในระบบที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของตัวทำละลายต่อเมทานอลเป็น 4:1 และระบบที่ไม่ใส่ตัวทำละลาย

Thanh และคณะ [3] ได้ทำการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้วและเมทานอลโดย ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งและอะซิโตนเป็นตัวทำละลายในระบบ การทดลองทำปฏิกิริยาที่ อุณหภูมิ 25 °C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันคือ 5:1 และใส่ตัวเร่ง โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5% โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเมื่อใส่ ตัวทำละลายที่เป็นอะซิโตน 5, 10, 15, 20, 25, 30% โดยน้ำหนัก จะได้ผลผลิตเพิ่มขึ้นจาก 34% เป็น 58, 76, 86, 95 และ 96% ตามลำดับ เห็นได้ชัดเจนว่าการใส่อะซิโตนในระบบสามารถเพิ่มผลผลิต ของไบโอดีเซลได้ แต่ในระบบที่ใส่อะซิโตน 30% โดยน้ำหนักน้ำมัน พบว่าส่งผลให้ใช้เวลาใน กระบวนการแยกไบโอดีเซลหลังจากการทำปฏิกิริยานานขึ้น

Cao และคณะ [28, 29] ได้ทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองด้วยวิธีสภาวะ เหนือวิกฤต และการใช้ตัวทำละลายในระบบเพื่อช่วยลดจุดวิกฤตในการทำปฏิกิริยา ตัวทำละลายที่ ใช้ คือ โพรเพน (propane) และคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide) ในการทดลองที่ไม่ใช้ตัวทำ ละลายต้องทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 °C และเมื่อใส่ตัวทำละลายในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาลดลงเหลือ 280 °C ปริมาณที่เหมาะสมสำหรับ โพรเพนคือ 0.5 โมล ต่อ เมทานอล 1 โมล และ คาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 โมลต่อเมทานอล 1 โมล การทดลองที่ทำปฏิกิริยาที่ อุณหภูมิ 280 °C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลของต่อน้ำมัน 24:1 ปริมาณตัวทำละลายโพรเพน 0.5 โมล และคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 โมลต่อเมทานอล 1 โมล พบว่าได้ผลผลิตไบโอดีเซลใกล้เคียง

กันคือระบบที่ใช้โพรเพนได้ผลผลิต 98% และระบบที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ได้ผลผลิต 98.5% และ ความดันที่เกิดขึ้นในระบบคือ 12.8 MPa และ 14.3 MPa ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

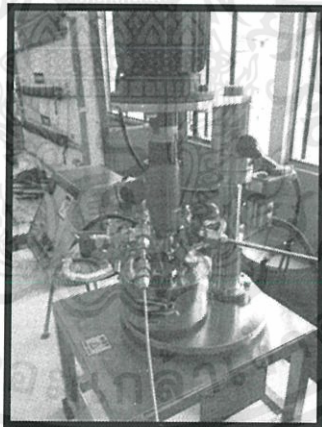
การดำเนินงาน

โครงการนี้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับตัวทำละลาย ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา คือ กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 97-98% (concentrated H_2SO_4 97-98%) นำมาใช้งานร่วมกับตัวทำละลาย คือ อะซีโตน (CH_3COCH_3) โดยคาดว่าจะช่วยลดความหนืดของน้ำมันขณะทำปฏิกิริยา ส่งผลให้น้ำมันสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้ง่ายขึ้น โดยทำการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน อัตราส่วนโดยมวลของตัวทำละลาย คือ อะซีโตน และผลของอุณหภูมิโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มากเกินไป (30:1)

ตอนที่ 1 การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องปฏิกรณ์เคมี ที่อุณหภูมิและความดันสูง (Autoclave) ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์เคมี ที่อุณหภูมิและความดันสูง (Autoclave)

2. ขวดก้นกลม 3 คอ
3. คอนเดนเซอร์ คอลัมน์ (Condenser column)
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก
5. เครื่องกวนสารละลายและให้ความร้อน (Magnetic stirrer with heating hot plate)
6. เทอร์โมมิเตอร์ รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
7. ปีกเกอร์ (Beaker)
8. ขวดรูปชมพู่ (Flask)
9. หลอดฉีดยา (Syringe)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. Cannon-Fenske Routine Viscometers เบอร์ 100 (Ranges : 3-15 cSt)
11. Cannon-Fenske Routine Viscometers เบอร์ 150 (Ranges : 7-35 cSt)
12. นาฬิกาจับเวลา
13. อ่างวิสกิเมตรควบคุมอุณหภูมิ (Viscometer Bath)
14. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath)
15. พิคโนมิเตอร์ (Glass pycnometer) ผ่านการสอบเทียบ 25.157 ml
16. กรวยแยก (Separatory funnel)

1.2 สารเคมี

1. น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน ตรา TOPS (Sunflower oil)
2. เมทานอล (Methanol)
3. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 97 – 98% (Conc. H₂SO₄ - Analytical Reagent Grade)
4. อะซีโตน (Acetone - American Chemical Society Grade)
5. น้ำกลั่น
6. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

1.3 การทดลอง

ตอนที่ 1 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 50°C

1. เตรียมสารตั้งต้น คือ น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน เมทานอล กรดซัลฟิวริก ตัวทำละลาย ตามตารางที่ 3.1 โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1
2. นำน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน เมทานอล และตัวทำละลายลงในขวดก้นกลม 3 คอ
3. นำขวดก้นกลม 3 คอต่อเข้ากับคอนเดนเซอร์ คอลัมน์ แล้วนำไปจุ่มลงใน Water Bath
4. เปิดกวนสารละลาย และตั้งค่าอุณหภูมิจนอุณหภูมิภายในขวดก้นกลม 3 คอคงที่ที่ 50°C
5. ทำการเติมกรดซัลฟิวริกลงในขวดก้นกลม 3 คอ
6. เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปเป็นเวลา 11 ชั่วโมง ทำการเติมน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลม 3 คอ เพื่อหยุดปฏิกิริยา
7. เทสารจากขวดก้นกลม 3 คอลงในปิ๊กเกอร์ รองนสารเคมีในปิ๊กเกอร์แยกชั้น
8. นำสารเคมีไประเหยเมทานอล และอะซีโตน ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในชุดดูดอากาศ และจะแยกออกเป็น 2 ชั้น ชั้นบน คือ ชั้นน้ำมัน และชั้นล่าง คือ กลีเซอรอล
9. หลังจากระเหยเมทานอล และอะซีโตน นำชั้นน้ำมัน (ชั้นบน) เทลงในกรวยแยก
10. ล้างเมทานอล อะซีโตน และกรดซัลฟิวริกที่อยู่ในชั้นน้ำมันออก โดยน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร รองนแยกชั้นเปิดให้ชั้นน้ำไหลออก จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นซ้ำ 5 ครั้ง
11. เก็บสารเคมีชั้นบน หรือชั้นน้ำมันลงในขวดรูปชมพู่

หมายเหตุ : ตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ศึกษาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 50°C

ตัวแปร	
ปริมาณกรดซัลฟิวริก	5 wt. oil%
ปริมาณอะซีโตน	20 wt. oil %

ตอนที่ 2 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะ Subcritical

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาตามตารางที่ 3.2 เตรียมสารตั้งต้น คือ น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน เมทานอล กรดซัลฟิวริก ตัวทำละลาย ตามตารางที่ 3.3 โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 ในทุกกรณี
2. นำสารตั้งต้นที่เตรียมไว้เติมเข้าเครื่องปฏิกรณ์เคมีที่อุณหภูมิ และความดันสูง (Autoclave)
3. ตรวจสอบเครื่องปฏิกรณ์เคมีก่อนใช้งาน ให้มีความพร้อมในการใช้งาน
4. เพิ่มความดันในเครื่องปฏิกรณ์ที่ความดัน 2 bar โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และตั้งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นครั้งละ 50 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา
5. เริ่มบันทึกเวลาเมื่ออุณหภูมิถึงตามสภาวะที่กำหนด และจับเวลาจนเสร็จสิ้นปฏิกิริยาเป็นเวลา 20 นาที
6. หลังเสร็จสิ้นสุดปฏิกิริยาทำการเปิดสายป้อนน้ำเย็นเพื่อลดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีให้อุณหภูมิต่ำลง
7. เปิดเครื่องปฏิกรณ์เคมีเมื่ออุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง และทำการเก็บสารจากเครื่องปฏิกรณ์ลงในปิកเกอร์ และเติมน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตรเพื่อหยุดปฏิกิริยา
8. นำสารเคมีไประเหยเมทานอล และอะซีโตน ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงในชุดดูดอากาศ และจะแยกออกเป็น 2 ชั้น ชั้นบนคือชั้นน้ำมัน และชั้นล่างคือกลีเซอรอล
9. หลังจากระเหยเมทานอล และอะซีโตน นำชั้นน้ำมัน (ชั้นบน) เทลงในกรวยแยก
10. ล้างเมทานอล อะซีโตน และกรดซัลฟิวริกที่อยู่ในชั้นน้ำมันออก โดยน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร รอจนแยกชั้นเปิดให้ชั้นน้ำไหลออก จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นซ้ำ 5 ครั้ง
11. เก็บสารเคมีชั้นบน หรือชั้นน้ำมันลงในขวดรูปชมพู่

หมายเหตุ : ตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

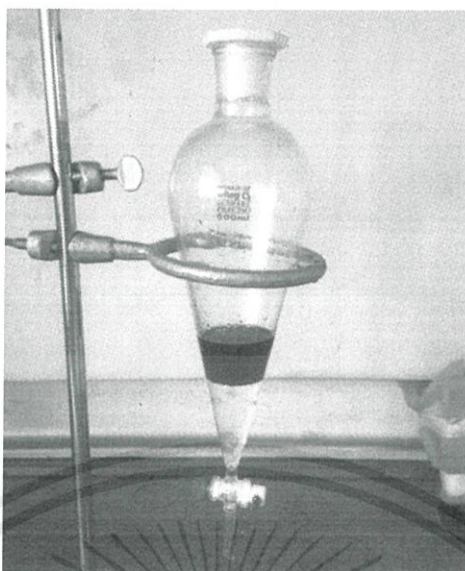
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ศึกษาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะ Subcritical

ตัวแปร	
ปริมาณกรดซัลฟิวริก	1, 3, 5 wt. oil%
ปริมาณอะซีโตน	10, 20, 30 wt. oil %
อุณหภูมิ	100, 120, 150°C

ตารางที่ 3.3 สารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะ Subcritical

Experiment	MeOH:Oil	Catalyst	Co-solvent	Temp. (°C)	Pressure (bar)
1	30:1	1%	-	150	2
2	30:1	3%	-	150	2
3	30:1	5%	-	150	2
4	30:1	1%	20%	150	2
5	30:1	3%	20%	150	2
6	30:1	5%	20%	150	2
7	30:1	1%	20%	120	2
8	30:1	3%	20%	120	2
9	30:1	5%	20%	120	2
10	30:1	1%	20%	100	2
11	30:1	3%	20%	100	2
12	30:1	5%	20%	100	2
13	30:1	3%	10%	120	2
14	30:1	3%	30%	120	2
15	30:1	3%	-	120	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การแยกชั้นระหว่างชั้นน้ำมัน (ชั้นบน) และชั้นน้ำ (ชั้นล่าง) ในขั้นตอนการล้างเมทานอล อะซีโตน และกรดซัลฟิวริกด้วยน้ำกลั่น

ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

จากการวิจัยทางวิชาการโดยคุณ M.E. Borges และคณะได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการประมาณองค์ประกอบของ Fatty Acid Methyl Esters (FAME) ในน้ำมันไบโอดีเซลจากความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) ทำให้สามารถประมาณค่า %FAME ในน้ำมันตัวอย่างเป็นไปตามสมการความสัมพันธ์ของค่า Dynamic viscosity และ %FAME yield ได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.3 อีกทั้งได้มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับเกณฑ์ตามมาตรฐานลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ได้มีการกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันไบโอดีเซลไว้ดังในตารางที่ ข.2 (มาตรฐาน ASTM D 445) คือ ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C ทำให้สามารถวิเคราะห์หาค่า %FAME yield ได้จากสมการความสัมพันธ์ที่กล่าวมาของงานวิจัย และอีกทั้งเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าว โดยใช้คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันตัวอย่าง คือ ค่า Dynamic viscosity มาทำนายหาค่า %FAME yield [31]

2.1 การวัดความหนืดของน้ำมันตัวอย่าง

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน จะทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ คือ ความหนืด (Viscosity) ด้วยเครื่องมือ Cannon-Fenske Routine Viscometers ทั้งน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันที่เป็นวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ชั้นน้ำมัน (ชั้นบน) ที่ผ่านการระเหยเมทานอล และอะซีโตน ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ไปล้างน้ำกลั่น ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบไม่มีชิววัดความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C ดังนี้

1. เลือก Cannon-Fenske Routine Viscometers ที่ขนาดเหมาะสม ได้แก่ Size 100 หรือ Size 150

2. นำ Cannon-Fenske Routine Viscometers ล้างด้วยตัวทำละลาย คือ อะซีโตนให้สะอาดและแห้งโดยการดูดตัวทำละลายไว้ในหลอด Viscometer แล้วเทออก จากนั้นแช่ใน Water Bath ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3 นาที เพื่อระเหยอะซีโตนออกจาก Viscometer

3. นำน้ำมันตัวอย่างใส่ใน Cannon-Fenske Routine Viscometers โดยการคว่ำ Viscometer ให้ทางด้านที่มีจุดจับเวลาจุ่มลงในน้ำมันตัวอย่าง แล้วใช้ suction ดูดน้ำมันขึ้นมาให้สูงกว่า Stop mark

4. นำหลอด Cannon-Fenske Routine Viscometers แล้วแช่ใน Viscometer Bath ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 10 นาที

5. ทำการปล่อยให้ของไหลไหลอย่างอิสระภายใต้แรงดึงดูดของโลกผ่านหลอดแก้วเล็กๆ โดยเริ่มจับเวลาเมื่อส่วนบน (Head level) ของผลิตภัณฑ์ถึงจุดจับเวลาจุดแรก (Start mark) และหยุดเมื่อถึงจุดจับเวลาที่สอง (Stop mark) ทำการวัดความหนืดซ้ำอีก 2 ครั้ง

6. หากเวลาที่ได้ไม่อยู่ในช่วง 200-1,000 วินาที ให้ทำการเปลี่ยนขนาด Cannon-Fenske Routine Viscometers โดยถ้าเวลาที่จับได้น้อยกว่า 200 วินาที ให้เปลี่ยน Size ให้มีขนาดเล็กลง แต่หากเวลาที่จับได้มากกว่า 1,000 วินาที ให้เปลี่ยน Size ให้มีขนาดใหญ่

จากนั้นนำเวลาที่ได้ซึ่งอยู่ในช่วง 200-1,000 วินาที ไปคูณด้วยค่าคงที่ของ Viscometer (Viscometer constant) ค่าที่ได้คือ Kinematic Viscosity ซึ่งมีหน่วยเป็นเซนติสโตรก (cSt) ดังสมการ 3.1 และคำนวณเป็นค่า Dynamic Viscosity ซึ่งมีหน่วยเป็นเซนติพอยส์ (cP) ดังสมการที่ 3.2

$$v = C \cdot t \quad (3.1)$$

โดยที่ v คือ Kinematic viscosity มีหน่วยเป็น cSt (Centistokes หรือ Millimeters Square per Second: mm²/s)

C คือ ค่าคงที่ของ Viscometer มีหน่วยเป็น cSt/s

t คือ Flow time ที่ได้จากการจับเวลา มีหน่วยเป็น s (วินาที)

$$\eta = \rho \cdot v \quad (3.2)$$

โดยที่ η คือ Dynamic viscosity มีหน่วยเป็น cP (Centipoise หรือ Millipascal-Second: mPa.s)

ρ คือ ความหนาแน่น (Density) มีหน่วยเป็น g/cm³ หรือ kg/m³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญา ซึ่งหากมีการนำเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การวัดค่าความหนาแน่นของน้ำมันตัวอย่าง

1. ทำความสะอาด Pycnometer และจุก อบอุ่นที่อุณหภูมิ 105-110°C จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และนำไปชั่งน้ำหนัก

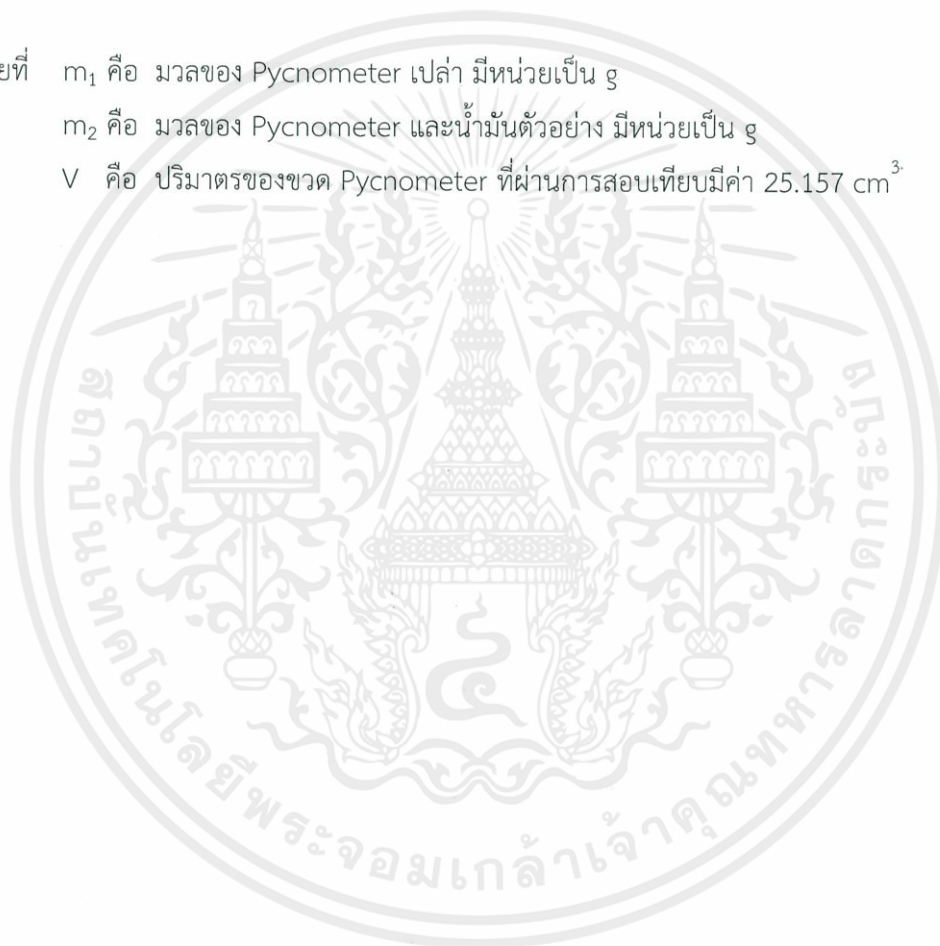
2. ใส่ น้ำมันตัวอย่างลงใน Pycnometer ค่อยๆปิดจุกไล่อากาศและปริมาณน้ำมันตัวอย่างส่วนเกินให้ออกทาง Capillary เช็ดจุกและขวดให้แห้ง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก

จากสมการ
$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.3)$$

โดยที่ m_1 คือ มวลของ Pycnometer เปล่า มีหน่วยเป็น g

m_2 คือ มวลของ Pycnometer และน้ำมันตัวอย่าง มีหน่วยเป็น g

V คือ ปริมาตรของขวด Pycnometer ที่ผ่านการสอบเทียบมีค่า 25.157 cm³



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

ตอนที่ 1 การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันที่นำมาเป็นวัตถุดิบ

น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน ตรา TOPS นำมาตรวจวัดความหนืดด้วยเครื่องมือ Cannon-Fenske Routine Viscometers เบอร์ 150 ที่อุณหภูมิ 40°C และตรวจวัดค่าความหนาแน่นด้วยเครื่องมือ Pycnometer ได้ค่าความหนืดและความหนาแน่นดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันที่เป็นวัตถุดิบ

วัตถุดิบ :	น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน
ความหนืด ที่ 40°C :	28.01 cSt
ความหนาแน่น :	0.926 g/cm ³

หมายเหตุ : ค่าคงที่ของ Viscometer เบอร์ 150 เท่ากับ 0.03901 cSt/s

ตอนที่ 2 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 50°C

จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 11 ชั่วโมง โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา (กรดซัลฟิวริก) 5% โดยมวลของน้ำมัน และตัวทำละลาย (อะซีโตน) 20% โดยมวลของน้ำมัน พบว่าความหนืดไคเนมาติกของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับจากค่าความหนืดไคเนมาติกของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันที่เป็นวัตถุดิบโดยลดลงจาก 28.01 cSt (ตารางที่ 4.1) เป็น 23.30 cSt (ตารางที่ 4.2) แต่จากค่าความหนืดที่ลดลง เมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่า %FAME yield แล้วพบว่าปริมาณไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันต่ำเพียงแค่ประมาณ 7% ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืด และผลการประมาณค่าไบโอดีเซล

MeOH:Oil	Time 1 (s)	Time 2 (s)	Time 3 (s)	Average Time (s)	Kinematic Viscosity (cSt)	Density (g/cm ³)	Dynamic Viscosity (cP)	%FAME yield
30:1	597	597	598	597.33	23.30	0.903	21.04	7.19

หมายเหตุ : ค่าคงที่ของ Viscometer เบอร์ 150 เท่ากับ 0.03901 cSt/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซล จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 50°C พบว่าเป็นผลมาจากไคเนติกส์ของปฏิกิริยา เพราะการดำเนินปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิต่ำ [22, 26] จำเป็นต้องใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณมากในการลด

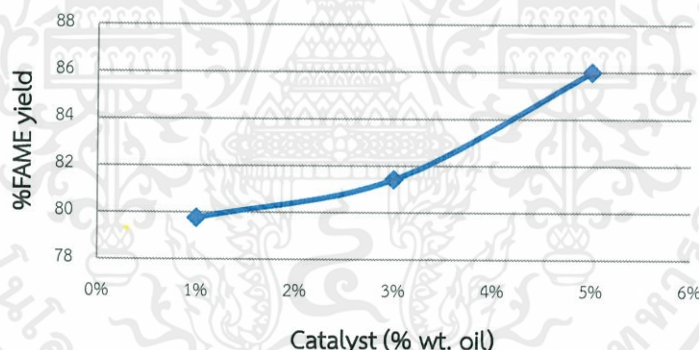
ผลของโคเนติกลิมิต จึงจะให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น แต่ผลเสียจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามากจะส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนและอาจเป็นอันตรายได้ จึงจำเป็นต้องลดผลของโคเนติกลิมิตด้วยการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น แทนการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณมาก เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน [14, 19]

ตอนที่ 3 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะ Subcritical

จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะ Subcritical โดยมีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และอะซิโตนเป็นตัวทำละลาย เป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งตัวแปรที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณอะซิโตน และอุณหภูมิ ในการดำเนินปฏิกิริยา

4.1 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 97-98%)

การศึกษาผลของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะ Subcritical condition (อุณหภูมิ 150°C และความดัน 2 bar) ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1% 3% และ 5% โดยมวลน้ำมัน ผลเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลแสดงดังรูปที่ 4.1



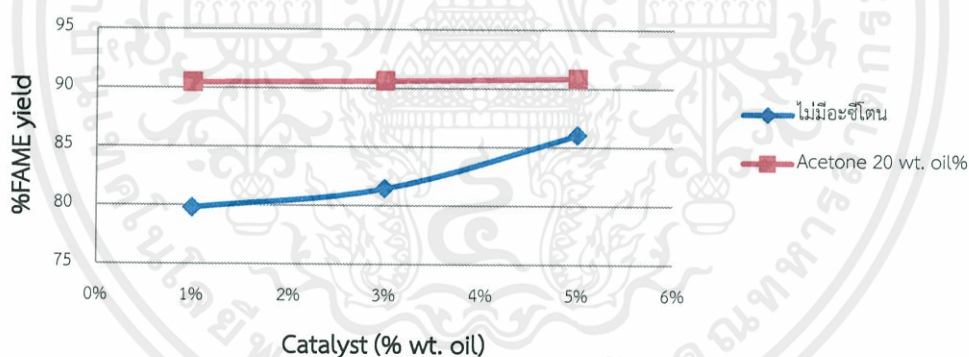
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 เวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 150°C และความดัน 2 bar

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 2 bar โดยไม่ใช้ตัวทำละลายที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% 3% และ 5% มีเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซล 79.76% 81.41% และ 86.00% ตามลำดับ แต่พบว่าในขั้นตอนการล้างด้วยน้ำกลั่นนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ใช้เวลาในการแยกชั้นนานขึ้นในขั้นตอนการล้างด้วยน้ำกลั่น และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มมากขึ้นยังส่งผลต่อน้ำเสียด้วย [30] ในการศึกษาจึงเลือกใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 3%

เนื่องจากสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลได้ดี รวมถึงใช้เวลาในการแยกชั้นระหว่างชั้นน้ำมันและชั้นน้ำได้เหมาะสมที่สุด

4.2 ผลของการใช้ตัวทำละลาย

หากเปรียบเทียบปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ไม่มีอะซิโตนกับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีอะซิโตน 20% โดยมวลน้ำมัน ณ สภาวะที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากันนั้นในรูปที่ 4.2 พบว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีอะซิโตนในปฏิกิริยาให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลประมาณ 90% ซึ่งมากกว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ไม่มีตัวทำละลายประมาณ 10%, 9% และ 4% ที่สภาวะตัวเร่งปฏิกิริยา 1% 3% และ 5% ตามลำดับ เนื่องมาจากอะซิโตนช่วยทำให้ความหนืดของของผสมในปฏิกิริยามีค่าลดลง ทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลที่สูงขึ้น อีกทั้งอะซิโตนช่วยลดระยะเวลาในการแยกชั้นของกลีเซอรอล จากของผสมหลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยาได้ เพราะเมื่อเพิ่มอะซิโตนเข้าไปในปฏิกิริยาจะทำให้ความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอรอลเพิ่มมากขึ้น [3] ดังนั้นในการศึกษาจึงเลือกใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใส่ตัวทำละลายคือ อะซิโตน เพราะทำให้ความหนืดของของผสมลดลง ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดียิ่งขึ้น และช่วยในการลดระยะเวลาในการแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอรอลด้วย



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยมวลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 เวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 150°C และความดัน 2 bar ของปฏิกิริยาที่ไม่มีอะซิโตน และมีอะซิโตน 20% โดยมวลน้ำมัน

4.3 ผลของอุณหภูมิ

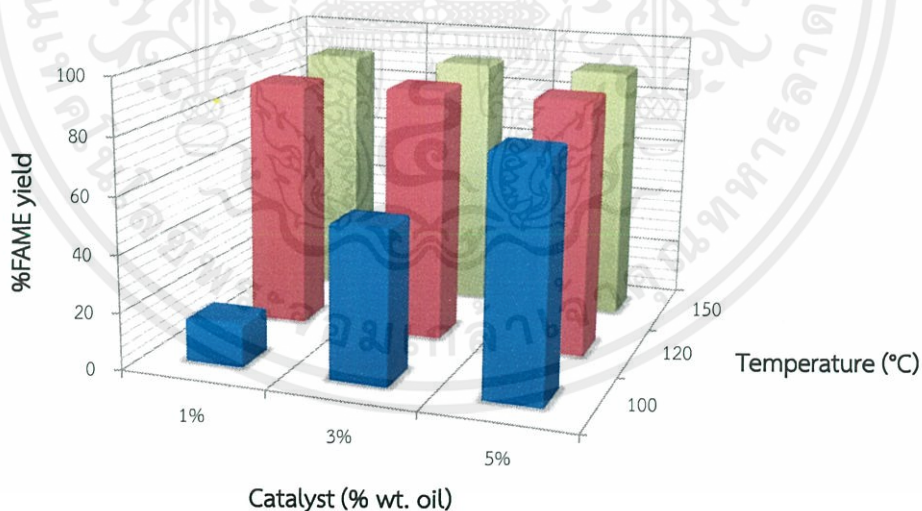
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จากผลการศึกษาศักยภาพของอะซิโตนทำให้พบว่าอะซิโตนสามารถลดผลที่เกิดจากการแพร่ (Diffusion limit) ด้วยการลดความหนืดของของผสมในระหว่างการทำปฏิกิริยาได้ ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลสูงขึ้น จึงได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิเพราะอุณหภูมินั้นเป็นปัจจัย

หลักในส่วนของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Kinetics) ของปฏิกิริยา อีกทั้งความหนืดแปรผกผันกับอุณหภูมิ ดังนั้นผู้ศึกษาต้องการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมของปฏิกิริยา เพื่อให้ได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลที่เหมาะสมกับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จะใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% 3% และ 5% โดยมวลของน้ำมัน และอะซิโตน 20% โดยมวลของน้ำมัน ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที สภาวะที่ใช้ขึ้นอยู่กับผลข้างต้น โดยใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 100°C, 120°C และ 150°C แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลที่อุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ที่สภาวะ Subcritical

Catalyst (H ₂ SO ₄)	%FAME yield (Acetone 20%)		
	100°C	120°C	150°C
1%	15.46	87.95	90.43
3%	54.22	89.72	90.59
5%	82.82	89.85	90.82



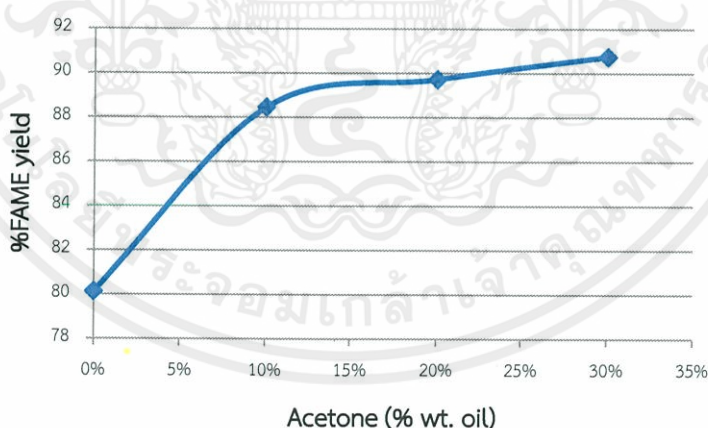
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 เวลา 20 นาที อะซิโตน 20% โดยมวลน้ำมันที่อุณหภูมิ 100°C 120°C และ 150°C ความดัน 2 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอดีเซลที่ได้จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นด้วยเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน [14, 19] โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจาก 100°C เป็น 120°C เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 15.46% เป็น 87.95% ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% โดยมวลของน้ำมัน และ เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 54.22% เป็น 89.72% ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 3% โดยมวลของน้ำมัน แต่สำหรับกรณีตัวเร่งปฏิกิริยา 5% โดยมวลของน้ำมัน เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาเกี่ยวข้อง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 150°C เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอดีเซลที่ได้จะเริ่มคงที่ เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 120°C เนื่องจากน้ำมันและเมทานอลทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลได้อย่างสมบูรณ์ ในการศึกษาเราจึงเลือกใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 120°C เพราะให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอดีเซลสูงใกล้เคียงกับปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150°C

4.4 ผลของปริมาณอะซิโตน

จากการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ผลของการใช้ตัวทำละลายอะซิโตน และอุณหภูมิแล้ว โดยได้ทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยมวลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 ตัวเร่งปฏิกิริยา 3% โดยมวลของน้ำมัน สภาวะอุณหภูมิ 120°C และความดัน 2 bar โดยใช้ปริมาณอะซิโตน 0% 10% 20% และ 30% โดยมวลของน้ำมัน แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลและปริมาณอะซิโตน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3% โดยมวลน้ำมัน ณ สภาวะที่ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน อุณหภูมิ 120°C และความดัน 2 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

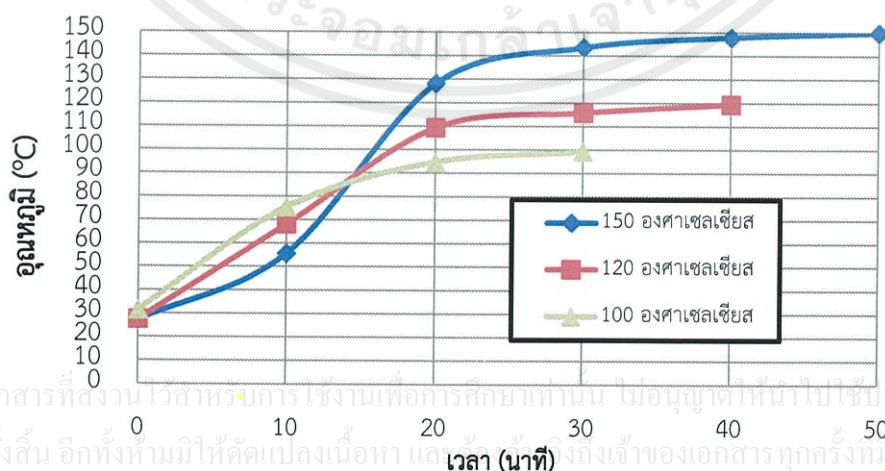
จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอะซีโตนในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน มีผลทำให้แนวโน้มของเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น เนื่องจากศักยภาพของอะซีโตนทำให้ความหนืดของของผสมในปฏิกิริยาลดลง โดยเมื่อเพิ่มปริมาณอะซีโตนจาก 0% เป็น 10% โดยมวลของน้ำมัน เปอร์เซ็นต์ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 80.14% เป็น 88.45% และเมื่อเพิ่มปริมาณอะซีโตนเป็น 20% และ 30% โดยมวลของน้ำมันแล้ว เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 89.72% และ 90.74% ตามลำดับ จึงควรเลือกใช้ปริมาณอะซีโตนที่ 10% โดยมวลของน้ำมัน เพราะเมื่อเพิ่มปริมาณอะซีโตนจาก 10% เป็น 20% โดยมวลของน้ำมันเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [3] สภาวะที่เหมาะสมแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สรุปลักษณะและปริมาณที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

	ปริมาณหรือสภาวะ
ตัวเร่งปฏิกิริยา (กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 97-98%)	3 wt. oil%
ปริมาณอะซีโตน	10 wt. oil%
อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	30:1
อุณหภูมิ/ความดัน	120°C/2 bar

4.5 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ Autoclave

เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เคมีที่อุณหภูมิสูงและความดันสูง (Autoclave) ส่งผลให้เวลาการทำปฏิกิริยาลดลงหรือไม่เท่ากัน และเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เคมีที่อุณหภูมิต่างๆ ใช้เวลาต่างกัน ดังนั้นเวลาในการทำปฏิกิริยาจึงอาจไม่ใช่ 20 นาที อาจมากกว่าตามเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิ โดยแสดง Temperature profile ไว้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ข้อมูลอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เคมีขณะทำการเพิ่มอุณหภูมิ

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

โครงการนี้ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยศึกษาการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50°C และที่สภาวะ Subcritical (100-150°C) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด คือ กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 97-98% ร่วมกับตัวทำละลาย คือ อะซิโตน เพื่อนำไปพัฒนาสู่ระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงสรุปผลการดำเนินงานดังนี้

ในการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันด้วยอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน เท่ากับ 30:1 ที่อุณหภูมิ 50°C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด 5% โดยมวลของน้ำมัน และอะซิโตน 20% โดยมวลของน้ำมัน พบว่าผลของการแพร่ (Diffusion limit) โดยใช้อะซิโตนส่งผลต่อปฏิกิริยาให้ดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น แต่ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำจึงต้องอาศัยระยะเวลาในการดำเนินปฏิกิริยานานที่จะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มมากขึ้น

ผลจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำ จึงเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ิฟิเคชันที่สภาวะ Subcritical ของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันกับเมทานอลในตัวทำละลายอะซิโตนที่ปริมาณ 10% 20% และ 30% โดยมวลของน้ำมัน ด้วยอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 โดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1% 3% และ 5% โดยมวลของน้ำมัน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100°C 120°C และ 150°C ที่ความดัน 2 bar ทุกการทดลองใช้เวลา 20 นาที

การใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 97-98% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 150°C และความดัน 2 bar สามารถทำให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มมากกว่า 80% โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น แล้วผลของตัวเร่งปฏิกิริยากลับส่งผลน้อยลง และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นจะยิ่งส่งผลให้การล้างเมทานอล และกรดซัลฟิวริกที่อยู่ในชั้นน้ำมันเกิดน้ำเสียมากขึ้นด้วย โดยปริมาณความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสมอยู่ที่ 3% โดยมวลของน้ำมัน ซึ่งเพียงพอที่จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลที่สูงประมาณ 80%

การเติมตัวทำละลายอะซิโตนลงไปนั้น เพื่อให้ให้น้ำมันและเมทานอลเพิ่มความสามารถในการละลายเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถลดความหนืดของของผสมได้ ทำให้สารตั้งต้นเกิดปฏิกิริยาได้ดี ยิ่งขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลสูงขึ้นถึง 90% เมื่อเติมปริมาณอะซิโตน 20% โดยมวลของน้ำมันเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันที่ไม่ใช้ตัวทำละลายอะซิโตนที่อุณหภูมิ

150°C ความดัน 2 bar อีกทั้งยังช่วยทำให้การแยกชั้นของกลีเซอรอลและน้ำมันหลังเสร็จสิ้นปฏิกิริยาทำได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ผลจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่เติมตัวทำละลายอะซีโตนในปฏิกิริยาเมื่อเติมอะซีโตนจาก 0% เป็น 10% มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นถึง 8% และเมื่อเพิ่มอะซีโตนที่ 20% และ 30% มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย อีกทั้งเมื่อใช้อะซีโตนที่ 30% ทำให้ไบโอดีเซลมีความขุ่นมากขึ้น อะซีโตนที่ 10% จึงเหมาะสมที่สุด

ในส่วนของการศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในตัวทำละลายอะซีโตน โดยมีกรดซัลฟิวริกเข้มข้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน อุณหภูมิจึงแปรผันโดยตรงกับเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซล จากการศึกษาที่สภาวะ Subcritical (100-150°C) พบว่าที่อุณหภูมิ 120°C และความดัน 2 bar สามารถทำให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลที่สูงเพียงพอที่ประมาณ 90%

ดังนั้นในการศึกษาสภาวะการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะ Subcritical ของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันกับเมทานอลที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 ในตัวทำละลายอะซีโตนที่ปริมาณ 10% โดยมวลของน้ำมัน โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 3% โดยมวลของน้ำมัน ณ อุณหภูมิ 120°C ความดัน 2 bar สามารถให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลที่ประมาณ 88.5%

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การใช้คุณสมบัติทางกายภาพเป็นการประมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลเท่านั้น ไม่สามารถบอกถึงองค์ประกอบของไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นได้เพราะต้องใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบ ได้แก่ GC-MS หรือ HPLC เป็นต้น

2. ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเครื่อง Autoclave นั้นปฏิกิริยานั้นดำเนินไปแล้วในขณะที่อุณหภูมียังไม่ถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา ทำให้ส่งผลต่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้ไม่ใช่ที่ 20 นาที อาจนานกว่านั้น และเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิในขณะที่ทำการทดลองไม่พร้อมกัน โดยที่อุณหภูมิ 150°C ใช้เวลาประมาณ 50 นาทีในการเพิ่มอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เคมีที่อุณหภูมิสูง และความดันสูง (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 120°C ใช้เวลาประมาณ 40 นาที และที่อุณหภูมิ 100°C ใช้เวลา 30 นาที โดยแสดง Temperature profile

ไว้ในบทที่ 4

เอกสารอ้างอิง

- [1] Guoqing Guan, N.S., Katsuki Kusakabe, *Synthesis of biodiesel from sunflower oil at room temperature in the presence of various cosolvents*. Chemical Engineering Journal, 2009. 146: p. 302-306.
- [2] Mangesh G. Kulkarni, A.K.D., *Transesterification of canola oil in mixed methanol/ethanol system and use of esters as lubricity additive*. Bioresource Technology, 2007. 98: p. 2027-2033.
- [3] Le Tu Thanh, K.O., Yasuhiro Sadanagac, Norimichi Takenakac, Yasuaki Maedaa, Hiroshi Bandowc, *A new co-solvent method for the green production of biodiesel fuel – Optimization and practical application*. Fuel, 2013. 103: p. 742-748.
- [4] Man Kee Lam, K.T.L., *Catalytic transesterification of high viscosity crude microalgae lipid to biodiesel: Effect of co-solvent*. Fuel Processing Technology, 2013. 110: p. 242-248.
- [6] Jian-Jhong Jiang, C.-S.T., *Biodiesel production from coconut oil in supercritical methanol in the presence of cosolvent*. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2012. 43: p. 102-107.
- [7] Jian-Zhong Yin, M.X., Ji-Bin Song, *Biodiesel from soybean oil in supercritical methanol with co-solvent*. Energy Conversion and Management, 2008. 49: p. 908-912.
- [8] Chisti, Y., *Biodiesel from microalgae*. Biotechnology Advances, 2007. 25: p. 294-306.
- [9] Balat, M., *Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – A review of current work*. Energy Conversion and Management, 2011. 52: p. 1479-1492.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงเท่านั้น ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น มิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] M. Mofijur, H.H.M., M.A. Kalam, A.E. Atabani, M. Shahabuddin, S.M. Palash, M.A. Hazrat, *Effect of biodiesel from various feedstocks on combustion characteristics, engine durability and materials compatibility: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. 28: p. 441-455.
- [11] I.M. Atadashi, M.K.A., A. Abdul Aziz, *High quality biodiesel and its diesel engine application: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. 14: p. 1999-2008.
- [12] Man Kee Lam, K.T.L., Avdul Rahman Mohamed, *Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review*. Biotechnology Advances, 2010. 28: p. 500-518.
- [13] Ahmed Abbaszaadeh, B.G., Mohammed Reza Omidkhah, Gholamhassan Najafi, *Current biodiesel production technologies: A comparative review*. Energy Conversion and Management, 2012. 63: p. 138-148.
- [14] Fangrui Ma, M.A.H., *Biodiesel production: A review*. Bioresource Technology, 1999. 70: p. 1-15.
- [15] Niehaus R.A., Goering C.E., Savage L.D., Jr., Sorenson S.C., *Cracked soybean oil as a fuel for a diesel engine*. Trans. ASAE, 1986. 29: p. 683-689.
- [16] Schwab A.W., D.G.J., Selke E., Sorenson S.C., Pryde E.H., *Diesel fuel from thermal decomposition of soybean oil*. JAOCS, 1988. 65: p. 1781-1786.
- [17] S.M. Palash, H.H.M., M.A. Kalam, B.M. Masum, A. Sanjid, M.J. Abedin, *State of the art of NO_x mitigation technologies and their effect on the performance and emission characteristics of biodiesel-fueled Compression Ignition engines*. Energy Conversion and Management, 2013. 76: p. 400-420.
- [18] ینگลิ้ง ปราโมทย์ไชยเวทย์, "ปิโตรเลียมเทคโนโลยี." พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พ.ศ.2555.

- [19] Surachai Jansri, G.P., *Enhancement of the Two-Stage Process for Producing Biodiesel from High Free Fatty Acid Mixed Crude Palm Oil*. Kasetsart J. (Nat. Sci.), 2011. 45: p. 1094-1104.
- [20] D.Y.C. Leung, Y.G., *Transesterification of neat and used frying oil: Optimization for biodiesel production*. Fuel Processing Technology 2006. 87: p. 883-890.
- [21] Demirbas, A., *Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification*. Energy Conversion and Management, 2009. 50: p. 923-527.
- [22] Yong Wang , S.O., Pengzhan Liu, Feng Xue, Shuze Tang, *Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil*. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2006. 252: p. 107-112.
- [23] Kulkarni MG, G.R., Meher LC, Dalai AK., *Solid acid catalyzed biodiesel production by simultaneous esterification and transesterification*. Green Chem, 2006. 8: p. 1059-1092.
- [24] Freedman B, P.E., Mounts TL, *Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified*. J Am Oil Chem Soc, 1984. 61: p. 1638-1643.
- [25] Freedman B, B.R., Pryde EH, *Transesterification kinetics of soybean oil*. J Am Oil Chem Soc, 1986. 63: p. 1375-1380.
- [26] S. Zheng, M.K., M.A. Dube, D.D. McLean, *Acid-catalyzed production of biodiesel from waste frying oil*. Biomass and Bioenergy, 2006. 30: p. 267-272.
- [27] L.C. Meher, D.V.S., S.N. Naik, *Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006. 10: p. 248-268.
- [28] Weiliang Cao, H.H., Jingchang Zhang, *Preparation of biodiesel from soybean oil using supercritical methanol and co-solvent*. Fuel, 2005. 84: p. 347-351.

- [29] Hengwen Han, Weiliang Cao , W.C., Jingchang Zhang, *Preparation of biodiesel from soybean oil using supercritical methanol and CO 2 as co-solvent*. Process Biochemistry, 2005. 40: p. 3148-3151.
- [30] Energy Publications. "*Biodiesel Process Technology*" [online].
สามารถเข้าถึงได้จาก: <http://www.thaienergy.org/?p=127>
- [31] M.E. Borges, L. Díaz, J. Gavín, A. Brito, "*Estimation of the content of fatty acid methyl esters (FAME) in biodiesel samples from dynamic viscosity measurements*", Fuel Processing Technology 92 (2011) 597–599



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



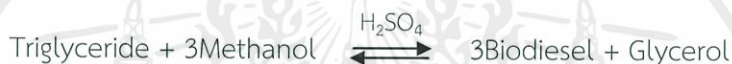
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก. วิธีการคำนวณ

ก.1 การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ร้อยละโดยมวลของตัวเร่งปฏิกิริยา และร้อยละโดยมวลของตัวทำละลาย

การหาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ใช้สำหรับการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน จะคำนวณโดยอ้างอิงจากปริมาณน้ำมันดอกทานตะวันที่เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา เพื่อคำนวณหาปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาตามอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน



สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ต้องการอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1

จาก
$$\text{mol} = \frac{\text{oil weight}}{\text{molecular weight}} \quad (1)$$

โดยที่ น้ำมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา = 50 g
มวลโมเลกุลของ Triglyceride ในน้ำมัน = 847 g/mol

$$\text{mol}_{\text{TG}} = \frac{50 \text{ g}}{847 \text{ g/mol}}$$

$$\text{mol}_{\text{TG}} = 0.059 \text{ mol}$$

จากอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ต้องการข้างต้นเมทานอลเป็น 30 เท่า ของน้ำมัน ดังนั้นจะต้องใช้เมทานอล

$$\text{mol}_{\text{MeOH}} = 30 \times 0.059 \text{ mol}$$

$$\text{mol}_{\text{MeOH}} = 1.771 \text{ mol}$$

จากสมการที่ (1) คำนวณเพื่อหาปริมาณน้ำหนักเมทานอลที่ต้องเตรียมสำหรับการทำปฏิกิริยา

โดยที่ มวลโมเลกุลของเมทานอล (Methanol) = 32 g/mol

$$\text{Methanol weight} = 32 \text{ g/mol} \times 1.771 \text{ mol}$$

$$\text{Methanol weight} = 56.67 \text{ g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาร้อยละโดยมวลของตัวเร่งปฏิกิริยาจะคำนวณโดยอ้างอิงจากมวลของน้ำมันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิเฟเคชัน

เมื่อทำการศึกษาโดยใช้น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันที่มีปริมาณ 50 g

จาก $\text{catalyst weight} = \text{oil weight} \times \text{percentage}$ (2)

- ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% wt. oil

$$\text{catalyst weight} = 50\text{g} \times 0.01$$

$$\text{catalyst weight} = 0.5\text{g}$$

- ตัวเร่งปฏิกิริยา 3% wt. oil

$$\text{catalyst weight} = 50\text{g} \times 0.03$$

$$\text{catalyst weight} = 1.5\text{g}$$

- ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% wt. oil

$$\text{catalyst weight} = 50\text{g} \times 0.05$$

$$\text{catalyst weight} = 2.5\text{g}$$

ตารางที่ ก.1 ร้อยละโดยมวลของตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ร้อยละโดยมวลของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (g)
1	0.5
3	1.5
5	2.5

การหาอัตราส่วนโดยมวลของตัวทำละลายจะคำนวณโดยอ้างอิงจากมวลของน้ำมันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิเฟเคชัน

เมื่อทำการศึกษาโดยใช้น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันที่มีปริมาณ 50 g

จาก $\text{solvent weight} = \text{oil weight} \times \text{percentage}$ (3)

- ตัวทำละลาย 10% wt. oil

$$\text{solvent weight} = 50\text{g} \times 0.10$$

$$\text{solvent weight} = 5.0\text{g}$$

- ตัวทำละลาย 20% wt. oil

$$\text{solvent weight} = 50\text{g} \times 0.20$$

$$\text{solvent weight} = 10.0\text{g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวทำละลาย 30% wt. oil

$$\text{solvent weight} = 50\text{g} \times 0.30$$

$$\text{solvent weight} = 15.0\text{g}$$

ตารางที่ ก.2 ร้อยละโดยมวลของตัวทำละลายและปริมาณตัวทำละลาย

ร้อยละโดยมวลของตัวทำละลาย	ปริมาณตัวทำละลาย (g)
10	5.0
20	10.0
30	15.0

ตารางที่ ก.3 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และปริมาณตัวทำละลายสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในการศึกษานี้

อัตราส่วนโดย โมลของเมทานอล ต่อน้ำมัน	ร้อยละโดยมวล (% wt. oil)		ปริมาณสาร (g)	
	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ตัวทำละลาย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ตัวทำละลาย
30:1	1	10	0.50	5.00
30:1	3	20	1.00	10.00
30:1	5	30	2.50	15.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 การคำนวณค่าความหนืดไคเนมาติก (Kinematic viscosity) ค่าความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) และความหนาแน่น (Density)

ตัวอย่างการคำนวณการทดลองที่ 1

- ความหนืดไคเนมาติก (Kinematic viscosity)

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (3.1)} \quad v &= C \cdot t \\ v &= 0.01518 \text{ cSt/s} \cdot 350.33 \text{ s} \\ v &= 5.32 \text{ cSt} \end{aligned}$$

- ความหนาแน่น (Density)

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (3.3)} \quad \rho &= \frac{m}{V} \\ \rho &= \frac{22.09 \text{ g}}{25.157 \text{ cm}^3} \\ \rho &= 0.878 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \end{aligned}$$

- ความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity)

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (3.2)} \quad \eta &= \rho \cdot v \\ \eta &= 0.878 \text{ g/cm}^3 \cdot 5.32 \text{ cSt} \\ \eta &= 4.67 \text{ cP} \end{aligned}$$

ก.3 การประมาณค่า %FAME yield หรือ ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล

ในการคำนวณหาปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล หรือ %FAME yield นั้นอ้างอิงมาจากการทำการวิจัยการประมาณปริมาณ Fatty acid methyl esters (FAME) จากค่าความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) [31]

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad \text{FAME yield}(\%) &= 158.5 \exp(-\eta / 6.8) & (4) \\ \text{แทนค่า} \quad \text{FAME yield}(\%) &= 158.5 \exp(-4.67/6.8) \\ \text{FAME yield}(\%) &= 79.76 \end{aligned}$$

โดยผลการคำนวณทั้งหมดแสดงดังตารางที่ ก.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลการทดลอง

Experiment	Oil weight (g)	MeOH weight (g)	MeOH:Oil	Catalyst (% wt.)	Co-solvent (% wt.)	Temp. (°C)	Pressure (bar)	Time 1 (s)	Time 2 (s)	Time 3 (s)	AV. Time (s)	Kinematic Viscosity (cSt)	Viscometer Size	Density (g/cm ³)	Dynamic Viscosity (cP)	%FAME yield
1	50.04	56.79	30:1	1%	-	150	2	351	350	350	350.33	5.32	size 100	0.878	4.67	79.76
2	50.18	56.80	30:1	3%	-	150	2	342	340	339	340.33	5.17	size 100	0.877	4.53	81.41
3	50.16	56.72	30:1	5%	-	150	2	311	313	313	312.33	4.74	size 100	0.877	4.16	86.00
4	50.14	56.82	30:1	1%	20%	150	2	285	288	289	287.33	4.36	size 100	0.875	3.82	90.43
5	50.12	56.69	30:1	3%	20%	150	2	284	286	287	285.67	4.34	size 100	0.877	3.80	90.59
6	50.12	56.87	30:1	5%	20%	150	2	284	282	284	283.33	4.30	size 100	0.880	3.79	90.82
7	50.11	56.70	30:1	1%	20%	120	2	300	301	302	301.00	4.57	size 100	0.876	4.00	87.95
8	50.09	56.68	30:1	3%	20%	120	2	291	290	290	290.33	4.41	size 100	0.878	3.87	89.72
9	50.01	56.71	30:1	5%	20%	120	2	289	289	290	289.33	4.39	size 100	0.879	3.86	89.85
10	50.06	56.83	30:1	1%	20%	100	2	454	455	455	454.67	17.74	size 150	0.892	15.83	15.46
11	50.03	56.84	30:1	3%	20%	100	2	213	212	213	212.67	8.30	size 150	0.879	7.29	54.22

Experiment	Oil weight (g)	MeOH weight (g)	MeOH:Oil	Catalyst (% wt.)	Co-solvent (% wt.)	Temp. (°C)	Pressure (bar)	Time 1 (s)	Time 2 (s)	Time 3 (s)	AV. Time (s)	Kinematic Viscosity (cSt)	Viscometer Size	Density (g/cm ³)	Dynamic Viscosity (cP)	%FAME yield
12	50.17	56.82	30:1	5%	20%	100	2	329	331	332	330.67	5.02	size 100	0.879	4.41	82.82
13	50.02	56.67	30:1	3%	10%	120	2	297	297	298	297.33	4.51	size 100	0.879	3.97	88.45
14	50.15	56.71	30:1	3%	30%	120	2	284	285	285	284.67	4.32	size 100	0.878	3.79	90.74
15	50.11	56.78	30:1	3%	-	120	2	350	349	349	349.33	5.30	size 100	0.875	4.64	80.14

หมายเหตุ : ค่าคงที่ของ Viscometer เบอร์ 100 เท่ากับ 0.01518 cSt/s

ค่าคงที่ของ Viscometer เบอร์ 150 เท่ากับ 0.03901 cSt/s

ภาคผนวก ข.
ข้อกำหนดมาตรฐานน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซล
ประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในประเทศไทย

ตารางที่ ข.1 ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล		วิธีทดสอบ *
			หมุนเร็ว	หมุนช้า	
1	ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6 องศาเซลเซียส (Specific Gravity at 15.6/15.6°C)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	0.81	-	ASTM D 1298
2	จำนวนซีเทน (Cetane Number) หรือ ดัชนีซีเทน (Calculate Cetane Index)	ไม่ต่ำกว่า	47	45	ASTM D 613 ASTM D 976
3	ความหนืด เซนติสโตกส์ (Viscosity, cST)				ASTM D 445
	3.1 ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (at 40°C)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	1.8	-	
	หรือ 3.2 ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (at 50°C)	ไม่สูงกว่า	4.1	8.0	
4	จุดไหลเท องศาเซลเซียส (Pour Point, °C)	ไม่สูงกว่า	10	16	ASTM D 97
5	กำมะถันร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.035	1.5	ASTM D 4294
6	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า	หมายเลข1	-	ASTM D 130
7	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ,กรัม/ลูกบาศก์เมตร (Oxidation Stability, g/m ³)	ไม่สูงกว่า	-	-	ASTM D 2274
8	กากถ่านร้อยละโดยน้ำหนัก (Carbon Residue, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.05	-	ASTM D 189
9	น้ำและตะกอนร้อยละโดยน้ำหนัก (Water and Sediment, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.05	0.3	ASTM D 2709
10	เถ้าร้อยละโดยน้ำหนัก (Ash, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.01	0.02	ASTM D 482
11	จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส (Flash Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า	52	52	ASTM D 93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล		วิธีทดสอบ *
			หมุนเร็ว	หมุนช้า	
12	การกลั่น องศาเซลเซียส (Distillation, °C) อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตรใน อัตราร้อยละเก้าสิบ (90% recovered)	ไม่สูงกว่า	357	-	ASTM D 86
13	โพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, % wt.)	ไม่สูงกว่า	11	-	ASTM D 2425
14	สี (Colour)	ไม่ต่ำกว่า	เหลือ	4.5	(1) เปรียบเทียบสี และปริมาณเนื้อสีกับ น้ำมันมาตรฐานที่ เตรียมขึ้นใหม่โดยใช้ สีละลายในน้ำมัน ก่อนการย้อมสีให้มี ปริมาณเท่ากับที่ กำหนด แล้วนำมา บรรจุแยกกันใน ภาชนะที่ใช้ในการวัด สีตามวิธีทดสอบ ASTM D 1500 แล้ว ตรวจพินิจด้วยสายตา หรือ
	14.1 ชนิดของสี (Hue)				
	14.2 เนื้อสี มิลลิกรัม/ลิตร (Dye, mg/l)	ไม่ต่ำกว่า	-	7.5	(2) ASTM D 2392
	14.3 ความเข้มของสี (Intensity)	ไม่สูงกว่า	4.0	-	ASTM D 1500
15	ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรด ไขมัน ร้อยละโดยปริมาตร (Methyl Ester of Fatty Acid, % vol.)	ไม่สูงกว่า	460	-	EN 14078
16	คุณสมบัติการหล่อลื่น ไมโครเมตร (Lubricity, μm)	ไม่สูงกว่า			CEC F-06-A-96
17	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน			

หมายเหตุ * วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

ที่มา : ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน พ.ศ. 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด		วิธีทดสอบ*
1	เมทิลเอสเทอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methyl Ester, % wt.)	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส กิโลกรัม/เมตร ³ (Density at 15°C, kg/m ³)	ไม่ต่ำกว่า	860	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เซนติสโตกส์ (Viscosity at 40°C, cST)	ไม่สูงกว่า	900	ASTM D 445
		ไม่ต่ำกว่า	3.5	
4	จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส (Flash Point, °C)	ไม่สูงกว่า	5.0	ASTM D 93
		ไม่ต่ำกว่า	120	
5	กำมะถันร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 2622
6	กากถ่านร้อยละโดยน้ำหนัก (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (Carbon Residue, on 10% distillation residue, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.30	ASTM D 4530
7	จำนวนซีเทน (Cetane Number)	ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D 613
8	เถ้าซัลเฟตร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulfated Ash, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
9	น้ำร้อยละโดยน้ำหนัก (Water, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.050	ASTM D 2709
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมดร้อยละโดยน้ำหนัก (Total Contaminate, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.0024	ASTM D 5452
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ชั่วโมง (Oxidation Stability at 110°C, hours)	ไม่ต่ำกว่า	6	EN 14112
13	ค่าความเป็นกรด มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม (Acid Value, mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน กรัมไอโอดีน/100 กรัม (Iodine Value, g Iodine/100 g)	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Linolenic Acid Methyl Ester, %wt.)	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
16	เมทานอล ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methanol, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
17	โมนอกลิเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Monoglyceride, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.80	EN 14105
18	ไดกลีเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูแลเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด		วิธีทดสอบ *
19	ไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Triglyceride, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Free glycerin, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105
21	กลีเซอรินทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก (Total glycerin, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโปแตสเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group I metals (Na+K) mg/kg)	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14108 และ EN 14109
	โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group II metals (Ca+Mg) mg/kg)	ไม่สูงกว่า	5.0	prEN 14538
23	ฟอสฟอรัส ร้อยละโดยน้ำหนัก (Phosphorus, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 4951
24	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดี กรมธุรกิจพลังงาน		

หมายเหตุ : * วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าได้ แต่ในกรณีที่มิข้อใดแย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

ที่มา : ประกาศกรมทะเบียนการค้า พ.ศ. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้