

การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันพืชในเมทานอลและไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤต



นางสาววิศนี สัตยานนท์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

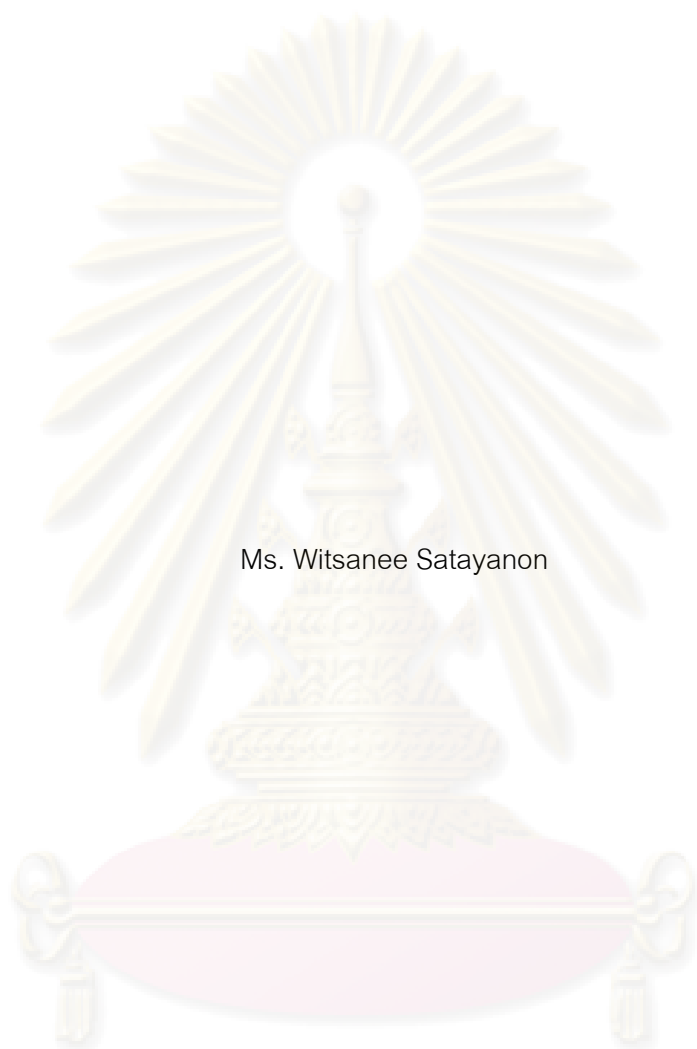
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTINUOUS PRODUCTION OF BIODIESEL FROM VEGETABLE OIL IN
SUPERCRITICAL METHANOL AND ISOPROPANOL



Ms. Witsanee Satayanon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันพืชในเมทานอลและ
ไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤต

โดย

นางสาววิศนี สัตยานนท์

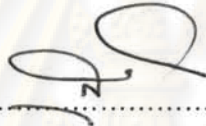
สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รองศาสตราจารย์ กัญจนา บุญเกียรติ

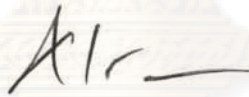
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

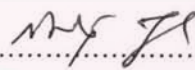
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



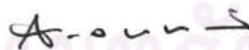
.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธารพงษ์ วิทิตสานต์)



.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)



.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ กัญจนา บุญเกียรติ)



.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)



.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.สุชาดา บุตรนาค)

วิชานี้ สัตยานนท์: การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันพืชในเมทานอลและ
 ไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤต (CONTINUOUS PRODUCTION OF BIODIESEL
 FROM VEGETABLE OIL IN SUPERCRITICAL METHANOL AND ISOPROPANOL)
 อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ , อ.ที่ปรึกษา
 วิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. กัญจนา บุญเกียรติ, 114 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันน้ำมันปาล์ม
 โอลีนเกรดบริโภคและน้ำมันปาล์มดิบในเมทานอลและไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤตใน
 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลระดับห้องปฏิบัติการ โดยการหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับร้อยละ
 เอสเทอร์โดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบ 2⁴ factorial design และ central composite
 design ภาวะที่ทำการทดลองคือ อุณหภูมิ 280-350 องศาเซลเซียส ความดัน 20-35 เมกะพาส
 คัล และอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืช 24-42 โดยใส่ไอโซโพรพานอลปริมาณ 25
 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อลดความหนืดของน้ำมันพืช โดยศึกษาผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อ
 ร้อยละเอสเทอร์ด้วยวิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k โดยพบว่า อุณหภูมิ ความดัน
 และอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืช มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละเอสเทอร์
 แต่ปริมาณไอโซโพรพานอล กลับไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละเอสเทอร์ จากผลการทดลอง
 พบว่าสมการถดถอยเชิงเส้นที่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละเอสเทอร์กับอุณหภูมิ ความดัน
 และอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืช ที่ภาวะที่เหมาะสมได้ผลิต Biodiesel ที่มีร้อยละเอสเทอร์
 เท่ากับ 81 ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 35 เมกะพาสคัล และอัตราส่วนโดยโมล
 เมทานอลต่อน้ำมันพืช 24

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต วิชา สัตยานนท์.....
 สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2552.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

4972487823 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: VEGETABLE OIL; BIODIESEL; TRANSESTERIFICATION;
SUPERCRITICAL METHANOL; ISOPROPANOL

WITSANEE SATAYANON : CONTINUOUS PRODUCTION OF BIODIESEL
FROM VEGETABLE OIL IN SUPERCRITICAL METHANOL AND
ISOPROPANOL. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.SOMKIAT
NGAMPRASERTSITH, Ph.D. , THESIS CO-ADVISOR: ASSOC.PROF.
KUNCHANA BUNYAKIAT., 114 pp.

The main purpose of this research is to study the biodiesel production from olein palm oil and crude palm oil in supercritical methanol and isopropanol by using lab-scale tubular flow reactor. Optimization of transesterification process was carried out with respected to esters content by 2^4 factorial and central composite design (CCD). The reaction conditions are investigated within the temperature range of 280-350 °C, the pressure range of 20-35 MPa and the molar ratio of methanol to vegetable oil of 24-42. To reduce vegetable oil viscosity, isopropanol was added at 25 and 50 %wt./wt._{oil}. It was found that temperature, pressure and molar ratio of methanol to vegetable oil had significant effect on esters content while amount of isopropanol had no significant effect on esters content. From the experimental results, linear regression models were obtained for correlating esters content response factor with temperature, pressure and molar ratio of methanol to oil. Esters content reached 81 %wt. at optimum condition at temperature of 350 °C, pressure of 35 MPa, and methanol to vegetable oil molar ratio of 24.

Department : Chemical Technology

Student's Signature : *Witsanee Satayanon*

Field of Study : Chemical Technology

Advisor's Signature : *Somkiat Ngamprasertsith*

Academic Year : 2009

Co-Advisor's Signature : *K. Bunyakiat.*

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ กัญญา บุญเกียรติ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำการทำวิจัย ตลอดจนให้ข้อคิดเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์ด้วยดียิ่ง รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในการวิจัยมาตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธรรมพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย และ ดร. สุชาดา บุตรนาถ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณเรืองวิทย์ สว่างแก้ว ที่ให้คำปรึกษาแนะนำการทำวิจัย และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและให้คำแนะนำต่างๆ ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจจนกระทั่งทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฎ |
| สารบัญรูป..... | ฐ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| 1.4 ขอบเขตงานวิจัย..... | 3 |
| 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... | 3 |
| 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.1 แนวคิดและทฤษฎี..... | 5 |
| 2.1.1 น้ำมันดีเซล..... | 5 |
| 2.1.2 ลักษณะเฉพาะทางเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซล..... | 5 |
| 2.2 ไบโอดีเซล..... | 11 |
| 2.2.1 วัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล..... | 12 |
| 2.2.2 มาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซล..... | 18 |
| 2.2.3 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันไบโอดีเซลที่มีผลต่อ เครื่องยนต์..... | 21 |
| 2.3 การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงทดแทน..... | 24 |
| 2.3.1 การใช้น้ำมันพืชโดยตรง..... | 24 |
| 2.3.2 การใช้น้ำมันพืชโดยปรับปรุงคุณภาพ..... | 24 |
| 2.3.3 การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน..... | 28 |
| 2.3.4 การเปรียบเทียบกระบวนการที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 35 |
| 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลในแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤต..... | 37 |

| บทที่ | ช หน้า |
|-------|---|
| 2.4.1 | คุณหมุมิ..... 37 |
| 2.4.2 | อัตราส่วนน้ำมันพืชหรือไขสัตว์ต่อแอลกอฮอล์..... 39 |
| 2.4.3 | ชนิดของแอลกอฮอล์..... 39 |
| 2.4.4 | ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา..... 41 |
| 2.4.5 | เสถียรภาพของภาวะเหนือวิกฤต..... 41 |
| 2.4.6 | ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมัน..... 42 |
| 2.4.7 | ปริมาณน้ำในน้ำมัน..... 42 |
| 2.5 | กระบวนการผลิต..... 42 |
| 2.5.1 | กระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง..... 42 |
| 2.5.2 | กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง..... 43 |
| 2.6 | งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 44 |
| 3 | เครื่องมือและวิธีการทดลอง..... 49 |
| 3.1 | เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง..... 49 |
| 3.2 | สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... 58 |
| 3.3 | ขั้นตอนการวิจัย..... 58 |
| 3.3.1 | วิเคราะห์สมบัติสารตั้งต้น..... 58 |
| 3.3.2 | การออกแบบการทดลอง..... 58 |
| 3.4 | การดำเนินการทดลอง..... 60 |
| 3.5 | การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์..... 60 |
| 3.6 | การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิง..... 61 |
| 4 | ผลการทดลองและการอภิปรายผล..... 62 |
| 4.1 | ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันพืชและน้ำมันดีเซล..... 62 |
| 4.1.1 | สมบัติทางกายภาพและเคมี..... 62 |
| 4.1.2 | ชนิดและปริมาณองค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันพืชตัวอย่าง..... 63 |
| 4.2 | ผลของปริมาณไอโซโพรพานอลต่อความหนืดของน้ำมันพืช..... 64 |
| 4.3 | ผลของปัจจัยที่มีต่อการผลิตไบโอดีเซล..... 66 |
| 4.3.1 | การเข้ารหัสปัจจัย (Code unit)..... 67 |
| 4.3.2 | การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแบบ 2 ⁴ แฟกทอเรียล..... 71 |

| บทที่ | ณ หน้า |
|---|-----------|
| 4.3.3 การวิเคราะห์ห้ส่วนตกค้าง (Residual) การออกแบบการทดลองแบบ 2 ⁴ แฟกทอเรียล..... | 73 |
| 4.3.4 การเพิ่มการทดลองด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบ Central composite design เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล... | 76 |
| 4.4 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อร้อยละเอสเทอร์..... | 80 |
| 4.4.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละเอสเทอร์..... | 80 |
| 4.4.2 ผลของความดันต่อร้อยละเอสเทอร์..... | 81 |
| 4.4.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอินต่อ ร้อยละเอสเทอร์..... | 82 |
| 4.5 การทดสอบสมการถดถอยและหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล... | 82 |
| 4.6 ผลการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลจากน้ำมัน ปาล์มดิบ..... | 84 |
| 4.7 ผลการศึกษาสมบัติของไบโอดีเซล..... | 85 |
| 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 88 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง..... | 88 |
| 5.1.1 ปัจจัยที่มีต่อร้อยละเอสเทอร์ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน..... | 88 |
| 5.1.2 สมการถดถอยสำหรับทำนายผลตอบสนองต่างๆ..... | 88 |
| 5.1.3 การหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลภาวะเหนือ วิกฤตจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน..... | 89 |
| 5.1.4 สมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอินและน้ำมัน ปาล์มดิบ..... | 89 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 89 |
| 5.2.1 การเพิ่มร้อยละเอสเทอร์..... | 89 |
| 5.2.2 ระบบชุดหล่อเย็นและการวัดอุณหภูมิ..... | 90 |
| 5.2.3 ระบบการวัดและควบคุมความแปรปรวนของความดัน..... | 90 |
| 5.2.4 ระบบการวัดและควบคุมอัตราการไหลของสารตั้งต้น..... | 90 |
| 5.2.5 การศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์..... | 91 |
| 5.2.6 ข้อพึงระวังในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบต่อเนื่อง..... | 91 |
| รายการอ้างอิง..... | 92 |
| ภาคผนวก..... | 97 |

| บทที่ | ญ | หน้า |
|---------------------------------|---|------|
| ภาคผนวก ก..... | | 98 |
| ภาคผนวก ข..... | | 101 |
| ภาคผนวก ค..... | | 105 |
| ภาคผนวก ง..... | | 107 |
| ภาคผนวก จ..... | | 110 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | | 114 |



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

| ตาราง | หน้า |
|--|------|
| 2.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันดีเซล..... | 6 |
| 2.2 สารมาตรฐานสำหรับเลขซีเทน..... | 7 |
| 2.3 ปริมาณการผลิตน้ำมันพืชของประเทศไทย(พินตัน)..... | 13 |
| 2.4 สมบัติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันพืช..... | 14 |
| 2.5 สมบัติและองค์ประกอบกรดไขมันหลักของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ ที่ใช้เพื่อการบริโภค | 15 |
| 2.6 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำมันพืช..... | 16 |
| 2.7 สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล | 18 |
| 2.8 มาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลของประเทศไทย..... | 19 |
| 2.9 ปัญหาและสาเหตุที่น่าจะเกิดขึ้นกับเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิง..... | 25 |
| 2.10 ร้อยละผลิตภัณท์ที่ได้จากการไพโรไลส์สบู่อุณหภูมิต่างๆ..... | 27 |
| 2.11 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีผลิตไบโอดีเซลที่ใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยากับวิธีที่ใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 33 |
| 2.12 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการผลิตไบโอดีเซลแบบปกติกับวิธีที่ผลิตโดยใช้แอลกอฮอล์ในภาวะเหนือวิกฤต..... | 37 |
| 3.1 ในการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณท์..... | 55 |
| 3.2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของการทดลองเบื้องต้นของการออกแบบการทดลองสำหรับการศึกษาการผลิตไบโอดีเซล..... | 59 |
| 3.3 การออกแบบแบบ 2^4 แฟกทอเรียล และค่ากลางของการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลและไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤต..... | 59 |
| 4.1 สมบัติของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มโอเลอิน..... | 63 |
| 4.2 ชนิดและองค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันพืชตัวอย่าง..... | 64 |
| 4.3 ความหนืดของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มโอเลอินที่อัตราส่วนผสมไอโซโพรพานอลต่างๆ..... | 65 |
| 4.4 ภาวะในการทดลองที่ออกแบบการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียลและค่ากลาง..... | 68 |
| 4.5 ภาวะในการทดลองจริงที่มีการเข้ารหัส..... | 69 |
| 4.6 ผลการทดลองของการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียล..... | 70 |

| ตาราง | หน้า |
|--|------|
| 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรอุณหภูมิ, ความดัน และ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน..... | 72 |
| 4.8 ค่าเฉลี่ยร้อยละเอสเทอร์ของการทดลองทั้งหมด (overall mean) ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ ความดัน และ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ต่อค่าร้อยละเอสเทอร์..... | 72 |
| 4.9 ค่าสถิติสำหรับสมการถดถอยเบื้องต้น..... | 75 |
| 4.10 ภาวะการทดลองเพิ่มและผลการทดลองสำหรับการออกแบบการทดลองแบบ Central composite design..... | 77 |
| 4.11 ค่าสถิติสำหรับสมการถดถอยของการออกแบบการทดลองแบบ CCD..... | 78 |
| 4.12 ข้อกำหนดสำหรับการหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง..... | 83 |
| 4.13 คำตอบของการหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง..... | 83 |
| 4.14 ภาวะการณ์ทดลองและผลการทดลองสำหรับการยืนยันข้อสรุปของสมการถดถอย... | 84 |
| 4.15 ค่าสูงสุดและต่ำสุดของผลตอบสนองที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95..... | 84 |
| 4.16 มาตรฐานน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล..... | 85 |
| 4.17 สมบัติทางเชื้อเพลิงของเอสเทอร์ที่ภาวะการผลิตที่ดีที่สุด (อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 35 เมกะพาสคัล อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืช 24 ปริมาณไอโซโพรพานอล 25 %wt./wt _{oil})..... | 86 |
| ก1 ความมีขี้ขั้วของตัวทำละลายชนิดต่างๆ..... | 98 |
| ก2 ความสามารถในการละลายของน้ำมันบาฮีราในตัวทำละลายชนิดต่างๆ..... | 98 |
| ก3 สมบัติวิกฤตของสารชนิดต่างๆ..... | 99 |
| ง1 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละเอสเทอร์ (A = อุณหภูมิ B= ความดัน C= อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืช D= ปริมาณไอโซโพรพานอล)..... | 107 |

สารบัญภาพ

| ภาพประกอบ | หน้า | |
|-----------|---|----|
| 2.1 | ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการกลั่นน้ำมันพืช, ผลิตภัณฑ์จากการทำ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชและการไพโรไลซิส..... | 27 |
| 2.2 | กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 30 |
| 2.3 | กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 31 |
| 2.4 | ปฏิกิริยาแซพอนิฟิเคชันและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส..... | 32 |
| 2.5 | กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤต..... | 35 |
| 2.6 | แผนผังแสดงการผลิตไบโอดีเซลจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท เบส..... | 36 |
| 2.7 | แผนผังแสดงการผลิตไบโอดีเซลจากกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 36 |
| 2.8 | ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตจากน้ำมันฮาเซลนัทกับเมทานอล อัตราส่วนโดย โมลของน้ำมันต่อแอลกอฮอล์ 1:41 ที่อุณหภูมิต่างๆ..... | 38 |
| 2.9 | ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ..... | 38 |
| 2.10 | ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมัน เมล็ดเรพต่อเมทานอล ที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆกัน..... | 39 |
| 2.11 | ร้อยละแอลคิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ..... | 40 |
| 2.12 | เปรียบเทียบร้อยละการแปรผันไปเป็นผลิตภัณฑ์ระหว่างการใช้เมทานอลและ เอทานอลในภาวะเหนือวิกฤตที่อุณหภูมิต่างๆ..... | 40 |
| 2.13 | โครมาโทแกรมของแอลคิลเอสเทอร์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมัน เมล็ดเรพกับแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ..... | 41 |
| 2.14 | ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน..... | 42 |
| 3.1 | แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่อง..... | 49 |
| 3.2 | ปั๊มแรงดันสูง..... | 50 |
| 3.3 | อ่างเกลือหลอมเหลว..... | 50 |
| 3.4 | เครื่องทำความร้อนไฟฟ้าแบบทรงกระบอกหุ้มเซรามิก..... | 51 |
| 3.5 | เกลือผสมของโซเดียมไนเตรต โซเดียมไนไตรต์ และโพแทสเซียมไนเตรต..... | 51 |
| 3.6 | ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 316 ขนาด 1/8 นิ้ว..... | 52 |
| 3.7 | อุปกรณ์หล่อเย็น..... | 52 |
| 3.8 | ตัวควบคุมค่าความดัน..... | 53 |

| ภาพประกอบ | หน้า |
|--|------|
| 3.9 จอภาพแสดงผลการวัดความดัน..... | 53 |
| 3.10 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี..... | 54 |
| 3.11 เครื่องระเหยแบบหมุน..... | 55 |
| 3.12 เครื่อง Bomb Calorimeter model 1341..... | 56 |
| 3.13 เครื่องวัดความหนืด..... | 56 |
| 3.14 เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ..... | 57 |
| 3.15 เครื่องวิเคราะห์จุดวาบไฟ..... | 57 |
| 4.1 ผลของปริมาณไอโซโพรพานอลต่อความหนืดของน้ำมันน้ำมันปาล์มดิบ และ น้ำมันปาล์มโอเลอิน..... | 66 |
| 4.2 ความน่าจะเป็นปกติแบบครึ่งของค่าประมาณของผลการทดลองสำหรับการ ผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลและ ไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤต A = อุณหภูมิ B = ความดัน C = อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอล..... | 71 |
| 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง (residuals) กับความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal % Probability)..... | 74 |
| 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายจากสมการถดถอย (predicted value) กับ ส่วนตกค้าง (residuals)..... | 74 |
| 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเก็บข้อมูล (run order) กับ ส่วนตกค้าง (residuals)..... | 75 |
| 4.6 พื้นผิวตอบสนองของร้อยละเอสเทอร์ (แกน x แสดงอุณหภูมิหน่วยองศา เซลเซียส และแกน Y แสดงความดันหน่วย บาร์)..... | 78 |
| 4.7 พื้นผิวตอบสนองของร้อยละเอสเทอร์ (แกน x แสดงความดันหน่วยบาร์ และ แกน Y แสดงอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน)..... | 79 |
| 4.8 ร้อยละเอสเทอร์ที่อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด (ที่ความดัน 27.5 เมกะพาสคัล อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 33 และปริมาณไอโซโพรพา นอลร้อยละ 25)..... | 80 |
| 4.9 ร้อยละเอสเทอร์ที่ความดันสูงสุดและต่ำสุด (ที่อุณหภูมิ 315 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 33 และปริมาณไอโซโพรพานอลร้อยละ 25)..... | 81 |

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| 4.10 ร้อยละเอสเทอร์ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันสูงสุดและต่ำสุด (ที่อุณหภูมิ 315 องศาเซลเซียส ความดัน 27.5 เมกะพาสคัล และปริมาณไอโซโพรพานอลร้อยละ 25)..... | 82 |
| ค1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมในการวิเคราะห์ปริมาณเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์..... | 105 |
| ง1 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง (residuals) กับความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal % Probability)..... | 108 |
| ง2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายจากสมการถดถอย (predicted value) กับส่วนตกค้าง (residuals)..... | 108 |
| ง3 ความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเก็บข้อมูล (run order) กับ ส่วนตกค้าง (residuals)..... | 109 |
| จ1 ค่า Desirability function ของ maximum value..... | 111 |
| จ2 ค่า Desirability function ของ minimum value..... | 111 |
| จ3 ค่า Desirability function ของ Target value..... | 112 |
| จ4 ค่า Desirability function ของ within range..... | 112 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันทุกประเทศในโลกรวมทั้งประเทศไทยต้องหาแหล่งพลังงานทดแทนพลังงานจากปิโตรเลียมที่กำลังจะหมดไป จึงทำให้มีการค้นคว้าพลังงานทดแทนกันอย่างต่อเนื่องและจริงจังไม่ว่าจะเป็น พลังงานแสงอาทิตย์ (solar energy) พลังงานลม (wind energy) พลังงานชีวมวล (biomass) ไบโอบีโกล (biogas) และที่กำลังกล่าวถึงกันมากที่สุดในตอนนี้นี้ก็คือไบโอดีเซล (biodiesel) ซึ่งรัฐบาลไทยกำลังให้การสนับสนุนเพื่อผลิตเป็นพลังงานทดแทนน้ำมันและลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศและยังเป็นการเพิ่มรายได้ให้กับภาคเกษตรกรรม แถมยังช่วยบรรเทาภาวะโลกร้อนอีกด้วย

ในอดีตได้มีการนำน้ำมันที่ได้จากพืชหรือสัตว์ไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรงโดยไม่มีการเติมสารเคมี หรือเปลี่ยนแปลงสมบัติของน้ำมันแต่อย่างใดซึ่งน้ำมันพืชมีความหนืดสูง ระเหยตัวกลายเป็นไอน้ำได้น้อยมาก (low volatility) ทำให้เมื่อป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้จุดระเบิดได้ช้ากว่าและมีกากของคาร์บอนหลงเหลือหลังจากการเผาไหม้สูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงเกิดปัญหากับเครื่องยนต์จึงเป็นเหตุให้ต้องทำการปรับปรุงน้ำมันเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้น โดยนำมาผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การเจือจางน้ำมันพืช (dilution) การทำเป็นของผสมไมโครอิมัลชัน (microemulsion) การแตกน้ำมันด้วยความร้อน (pyrolysis) แต่วิธีที่เป็นการแปรรูปโดยกระบวนการทางเคมีที่ดีที่สุด [Antolin et al., 2002] คือการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (transesterification) ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ของน้ำมันพืชเป็นโมโนแอลคิลเอสเทอร์ (mono alkyl ester) ด้วยแอลกอฮอล์โมเลกุลเล็กเช่น เมทานอล เอทานอลและโพรพานอล ทำให้ได้ไบโอดีเซลซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลหมุนช้าและได้กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ด้วย

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบ่งออกเป็นสองวิธีหลักๆก็คือวิธีที่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิไม่สูงนัก [Schuchardt et al., 1998] โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็น กรด เบส หรือเอนไซม์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดแก่ซึ่งให้ผลได้ (yield) ผลิตรวดเร็วสูงมากแต่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน [D'ippolito et al., 2007] ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสแก่มีข้อดีคือใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยลงมากเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด แต่มีข้อเสียคือมีสมบัติในการเลือกทำปฏิกิริยา (selectivity) ค่อนข้างต่ำและยังสามารถเกิดปฏิกิริยาแซพอนิฟิเคชัน (saponification reaction) กับกรดไขมันอิสระและความชื้นที่มีอยู่ในน้ำมันพืชได้ทำให้เกิดสบู่ ซึ่งมีสมบัติเป็น อิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) ทำให้ขั้นตอนการทำ

ผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์ทำได้ยากขึ้นด้วย ส่วนการเร่งปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์โดยเอนไซม์ที่นิยมใช้ในปฏิกิริยาได้แก่เอนไซม์ไลเปสซึ่งมีทั้งรูปแบบสารละลายหรือตรึงไว้บนวัสดุต่างๆ (emobilized lipase) ซึ่งมีสมบัติการเลือกทำปฏิกิริยาสูงจึงทำให้ไม่มีสบูเกิดขึ้นและไม่ต้องล้างผลิตภัณฑ์ แต่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานมากและเมื่อใช้เอนไซม์เป็นเวลานานทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาลดลงเนื่องจากแอลกอฮอล์ทำให้กรดอะมิโนในเอนไซม์เสื่อมสภาพ ส่วนวิธีที่ไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในภาวะเหนือวิกฤต (supercritical condition) ซึ่งเป็นภาวะที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ภาวะนี้แอลกอฮอล์มีสภาพขั้วลดลงทำให้ปฏิกิริยาระหว่างสารที่มีสภาพขั้วต่างกันเกิดได้ง่ายขึ้น โดยของไหลที่ภาวะดังกล่าวเรียกว่าของไหลภาวะเหนือวิกฤต (supercritical fluid) ซึ่งมีสมบัติอยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลว โดยเมทานอลมีอุณหภูมิวิกฤต 239 องศาเซลเซียส ความดันวิกฤต 8.09 เมกะพาสคัล โดยผลงานวิจัยที่ใช้หลักการดังกล่าวทั้งที่ใช้ในกระบวนการแบบแบตช์ (batch process) [Demirbas et al., 2000, Kusdiana et al.,2001] และแบบต่อเนื่อง [Bunyakiat et al.,2006, He et al., 2007] สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ดี โดยวิธีนี้มีข้อดีคือใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยมากและขั้นตอนในการทำผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์ทำได้ง่ายกว่ามากเพราะไม่ต้องเสียเวลาในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์และกลีเซอรอลที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงเนื่องจากไม่มีการปนเปื้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาข้างเคียง ประกอบกับได้มีการพัฒนากระบวนการดังกล่าวในระดับห้องทดลอง (lab scale) ในประเทศไทย [สุกัญญา มากมี, 2546] ซึ่งมีการวิจัยนำน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มซึ่งเป็นน้ำมันที่มีการผลิตสูงมากมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ดี อย่างไรก็ตามเมื่อมีการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์เพื่อเพิ่มกำลังการผลิตกลับพบว่าค่าความหนืดของน้ำมันพืชทำให้เกิดปัญหากับปั๊มแรงดันสูง ซึ่งสามารถแก้ไขโดยการเติมตัวทำละลายร่วมเพื่อช่วยลดความหนืดของน้ำมันพืชทำให้สามารถป้อนน้ำมันพืชในอัตราการใช้สูงได้และสามารถผลิตไบโอดีเซลที่กำลังการผลิตเพิ่มขึ้นได้ [เรืองวิทย์ สว่างแก้ว, 2547]

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อลดความหนืดของน้ำมันพืชโดยใช้แอลกอฮอล์ที่สามารถละลายได้ในน้ำมันพืชเช่นไอโซโพรพานอล (isopropanol) แทนการใช้ตัวทำละลายร่วมในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มโอเลอินเกรดบริโศคกับเมทานอล เนื่องจากไอโซโพรพานอลมีแนวโน้มที่จะเกิดเป็นไอโซโพรพิลเอสเทอร์ที่ภาวะเหนือวิกฤตซึ่งทำให้ไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการนี้มีร้อยละผลได้เอสเทอร์สูงและมีสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันพืชในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยใช้ไอโซโพรพานอลช่วยลดความหนืดของน้ำมันพืช

1.2.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้และหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชในเมทานอลและไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยกระบวนการแบบต่อเนื่อง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ได้ภาวะที่เหมาะสมในการใช้ไอโซโพรพานอลร่วมกับเมทานอลในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องในภาวะเหนือวิกฤต

1.3.2 ได้ไบโอดีเซลที่มีสมบัติตรงตามมาตรฐานซึ่งผลิตจากกระบวนการแบบต่อเนื่องโดยใช้เมทานอลและไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤต

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องโดยกระบวนการเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต

1.4.2 วิเคราะห์น้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบและไบโอดีเซลที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมจากเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

1.4.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องรวมถึงภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ศึกษาวิธีการหาร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ โมโนกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ และไดรกลีเซอไรด์ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

1.5.3 ศึกษาผลของปัจจัยที่มีต่อร้อยละโดยน้ำหนักของเอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มโอเลอินกับเมทานอลผสมไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤต ประกอบด้วย

- ความดัน 20-35 เมกะพาสคัล
- อุณหภูมิ 280-350 องศาเซลเซียส
- อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 24-42

- ปริมาณไอโซโพรพานอลที่ผสมลงในน้ำมันพืช 0-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ 2^4 fractional factorial design

1.5.4 วิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ที่มีร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากภาวะที่เหมาะสม

1.5.5 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาด้านราคาน้ำมันที่สูงขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้มีการศึกษาแหล่งเชื้อเพลิงอื่นๆ เพื่อทดแทนน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งเชื้อเพลิงจากแหล่งไม่รู้จักหมด (Renewable sources) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความสนใจนำไปใช้กับเครื่องยนต์ประเภทต่างๆ ทั้งเครื่องยนต์ทางการเกษตร และเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งการใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงโดยไม่ก่อให้เกิดเป็นปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์และสิ่งแวดล้อมสามารถทำได้หากน้ำมันพืชมีสมบัติตรงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้สำหรับน้ำมันดีเซล ดังนั้นจะขอกล่าวถึงลักษณะทางเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซลก่อน

2.1.1 น้ำมันดีเซล [ส่วนควบคุมคุณภาพ ปฏิบัติการคลัง ปตท.]

เครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์แรงอัดสูงและจุดระเบิดเอง (High Compression, Self Ignition Engine) ซึ่งการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นจากความร้อนจากแรงอัดสูงของอากาศในกระบอกสูบโดยไม่ต้องใช้หัวเทียน วงจรของเครื่องยนต์ประกอบด้วยขั้นตอนการส่งอากาศเข้าไปในห้องเผาไหม้ การอัดอากาศภายในกระบอกสูบ การฉีดเชื้อเพลิงเป็นฝอยเข้าไปซึ่งเผาไหม้ทันที แก๊สจากการเผาไหม้ขยายตัว และปล่อยแก๊สจากการเผาไหม้ออกไป

2.1.2 ลักษณะเฉพาะทางเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซล [ส่วนควบคุมคุณภาพ ปฏิบัติการคลัง ปตท.]

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันดีเซลแสดงดังตาราง 2.1 ซึ่งค่าที่แสดงในตารางมีความหมายและผลกระทบต่อพฤติกรรมกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่สามารถอธิบายได้ดังนี้

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันดีเซล [Song et al., 2000]

| Property | Standard method | Unit |
|----------------------|-----------------|-----------------------------|
| Cetane number | ASTM D613 | - |
| Density | ASTM D4052-91 | g/mL |
| Higher heating value | ASTM D2015-85 | MJ/kg |
| Kinematics viscosity | ASTM D445 | mm ² /s at 40 °C |
| Cloud point | ASTM D2500-91 | °C |
| Pour point | ASTM D97-93 | °C |
| Flash point | ASTM D93-94 | °C |
| Sulfur content | ASTM D5453-93 | % wt. |
| Carbon residue | ASTM D524 | % wt. |
| Ash content | ASTM D482-91 | % wt. |

1) คุณภาพการจุดติดไฟ (Ignition Quality)

การจุดระเบิดหรือติดไฟได้เองจะเร็วหรือช้าขึ้นกับประเภทของไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำมัน โดยพาราฟินติดไฟได้เร็วที่สุดตรงกันข้าม พวกแอมโรแมติกจะติดไฟได้ช้า โดยเฉพาะแอมโรแมติกที่มีจำนวนวงแหวนมาก การวัดจึงใช้ไฮโดรคาร์บอนสองประเภทดังกล่าวเป็นหลักเรียกว่า ค่าซีเทน

- ค่าซีเทน (Cetane number)

ค่าซีเทน คือ ค่าที่บอกถึงคุณภาพของการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงโดยจะใช้อุณหภูมิติดไฟได้เอง (Auto-ignition Temperature, AIT) ของน้ำมันเป็นตัววัด ซึ่งอุณหภูมินี้เป็นอุณหภูมิที่เชื้อเพลิงสามารถลุกไหม้ได้เองในบรรยากาศที่ปราศจากประกายไฟ เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลใช้หลักการ การจุดระเบิดด้วยการอัดอากาศให้มีอุณหภูมิสูงจนเชื้อเพลิงสามารถจุดระเบิดได้เองแทนการจุดระเบิดด้วยหัวเทียน ทำให้ค่านี้มีความสำคัญต่อน้ำมันดีเซล โดยเลขซีเทนจะมีสารอ้างอิงมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารมาตรฐานสำหรับเลขซีเทน [Song et al., 2000]

| Compound | Cetane number | Auto-ignition Temperature (°C) |
|-----------------------|---------------|--------------------------------|
| n-Hexadecane (Cetane) | 100 | 202 |
| 1-methylnaphthalene | 0 | 529 |
| Heptamethylnonane | 15 | 472 |

สำหรับซีเทน (Cetane) และ 1-เมทิลแนฟทาลีน (1-methylnaphthalene) เป็นสารมาตรฐานดั้งเดิม ซึ่งเลขซีเทนมีค่าเท่ากับร้อยละโดยปริมาตรของซีเทนที่ละลายในเมทิลแนฟทาลีนและให้สมบัติการเผาไหม้เหมือนกับน้ำมันที่มีเลขซีเทนเท่ากัน แต่เนื่องจากเมทิลแนฟทาลีนบริสุทธิ์สลายตัวง่ายระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงได้กำหนดสารมาตรฐานใหม่คือ เฮปตะเมทิลโนเนน (Heptamethylnonane) ซึ่งมีเลขซีเทนเท่ากับ 15 และเลขซีเทน (CN) จะมีค่าตามสมการ

$$\text{Cetane no.} = \text{vol\% of cetane} + (0.15)(\text{vol\% of Heptamethylnonane}) \quad (2.1)$$

โดยทั่วไปน้ำมันดีเซลมีองค์ประกอบเป็นสารไฮโดรคาร์บอนหลายชนิดผสมกันซึ่งอุณหภูมิติดไฟได้เองของสารประกอบต่างๆ มีค่าตามลำดับดังนี้ สารประกอบแอลโม่ติก < สารประกอบแอลเคนไซกิง < สารประกอบแอลเคนแบบวง < สารประกอบแอลเคนไซตรง โดยลำดับดังกล่าวตรงข้ามกับกรณีของค่าซีเทน

สำหรับสารที่มีค่าซีเทนต่ำทำให้การจุดระเบิดล่าช้า เนื่องจากเชื้อเพลิงต้องดูดความร้อนในปริมาณมากจนสามารถจุดระเบิดได้เอง ทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนไม่ถูกเผาไหม้ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการสะสม และจุดระเบิดพร้อมกันทีเดียว ส่งผลให้ความดันภายในกระบอกสูบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเครื่องยนต์หยุดชงก์เนื่องจากเสียดังหวะ ในทางตรงข้ามน้ำมันดีเซลมีเลขซีเทนสูงมากทำให้เครื่องยนต์มีกำลังต่ำเกินไป และยังทำได้ยากอีกด้วย ดังนั้นค่ามาตรฐานของเลขซีเทนจึงมักกำหนดเฉพาะค่าต่ำสุดเท่านั้น ซึ่งมีค่าประมาณ 45

- ดัชนีซีเทน (Calculated cetane index)

เนื่องจากการวัดเลขซีเทนต้องทำการวัดกับเครื่องยนต์จริงจึงทำให้ใช้เวลานานและใช้เชื้อเพลิงในปริมาณมาก ดังนั้นจึงใช้วิธีคำนวณ ซึ่งประมาณค่าจากค่าความถ่วงจำเพาะและช่วงอุณหภูมิการกลั่นที่ร้อยละ 50 ค่าที่ได้เรียกดัชนีซีเทน (Cetane Index, CI) ซึ่งใช้ในการประมาณค่า เลขซีเทน เมื่อไม่สามารถทดสอบค่าซีเทนของน้ำมันดีเซลโดยใช้เครื่องยนต์ทดสอบได้ มีค่าใกล้เคียงกับค่าซีเทนมาก สามารถใช้แทนกันได้ ซึ่งการคำนวณแสดงดังสมการ 2.2 และ 2.3

$$\begin{aligned}
 CI = & 45.2 + 0.0892(T_{10} - 215) + 0.131(T_{50} - 260) + 0.0523(T_{90} - 310) \\
 & + 0.901 B (T_{50} - 260) - 0.420 B (T_{90} - 310) + 0.0049(T_{10} - 215)^2 \\
 & - 0.0049(T_{90} - 310)^2 + 107.0 B + 60.0 B^2
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

โดย $B = e^{[-3.5(D-0.85)]} - 1$

T_{10} , T_{50} , T_{90} คือ ค่าอุณหภูมิการกลั่นที่ร้อยละ 10, 50, 90 ($^{\circ}\text{C}$) ตามลำดับ

D คือ ความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D4052 (กิโลกรัมต่อลิตร ที่ 15°C)

$$CI = -420.34 + 0.016 G^2 + 0.192 G \log T_{50} + 65.01 (\log T_{50})^2 - 1.809 \times 10^{-4} T_{50}^2 \tag{2.3}$$

โดย T_{50} คือ ค่าอุณหภูมิการกลั่นที่ร้อยละ 50 ($^{\circ}\text{F}$)

G คือ ค่าความถ่วงจำเพาะ API

2) ค่าเกี่ยวกับการไหล (Fluidity)

- ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นเป็นค่าที่บอกถึงน้ำหนักของเชื้อเพลิงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์โดยตรง กล่าวคือ การฉีดเชื้อเพลิงในแต่ละครั้งเครื่องยนต์จะวัดค่าในรูปของปริมาตร ดังนั้นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะทำให้กำลังและโอกาสที่จะเกิดควันได้มากกว่า เนื่องจากมีมวลของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้มากกว่า โดยทั่วไปความหนาแน่นที่ยอมรับได้จะมีค่าระหว่าง 0.80-0.86 กรัม/มิลลิลิตร

ความหนาแน่นอาจอยู่ในรูปความถ่วงจำเพาะ API สำหรับน้ำซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จะมีองศา API เท่ากับ 10.0 องศา ซึ่งจะเห็นว่าหากค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าสูงจะทำให้ความถ่วงจำเพาะ API มีค่าต่ำทำให้ความถ่วงจำเพาะ API นิยมใช้วัดความหนาแน่นของของเหลวที่เบากว่าน้ำ

- ค่าความหนืด (Viscosity)

ค่าความหนืดเป็นค่าแสดงความต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ดังนั้นน้ำมันที่มีค่าความหนืดสูงจึงมีความต้านทานการไหลมากกว่าน้ำมันที่มีค่าความหนืดต่ำ ความหนืดจะมีหน่วยเป็นพอยส์ (poise, P) ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงที่ใช้เคลื่อนของไหลขนาดพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตรต่อวินาที สำหรับความหนืดไคเนแมติก (kinematic viscosity) คือ อัตราส่วนระหว่างความหนืดต่อความหนาแน่นซึ่งมีหน่วย

เป็น สโตก (stoke, St) ค่าความหนืดทั้งสองนิยมนิยามรายงานเป็นเซนติพอยส์ (cP) และเซนติสโตก (cSt) ในหน่วย SI ดังสมการที่ 2.4

$$cP = cSt \times \text{Density of the fluid} \quad (2.4)$$

การวัดค่าความหนืดที่ใช้กันอย่างกว้างขวางตามมาตรฐาน ASTM D 445 ซึ่งใช้การจับเวลาที่ของไหลปริมาตรคงที่ค่าหนึ่งให้ไหลผ่านช่องเล็กๆ (capillary) ด้วยแรงโน้มถ่วง ณ อุณหภูมิคงที่สำหรับน้ำมันดีเซลความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญ เนื่องจากการฉีดน้ำมันที่มีความหนืดสูงจะได้น้ำมันที่มีขนาดใหญ่จนไม่สามารถเผาไหม้ได้หมดในการจุดระเบิดแต่ละครั้งซึ่งจะทำให้เกิดคราบคาร์บอนสะสมจนกระบอกสูบเกิดความเสียหายโดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำซึ่งความหนืดจะมีค่าสูง สำหรับค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D 975-91 สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไปมีค่า 1.3 - 4.1 เซนติสโตก และ 5.5-24 เซนติสโตก สำหรับเครื่องยนต์รอบต่ำ

- จุดเกิดหมอก (Cloud point)

จุดเกิดหมอก คือ อุณหภูมิที่ไขของน้ำมันดีเซลรวมตัวจนสามารถมองเห็นเป็นกลุ่มคล้ายหมอกได้ ซึ่งอาจจุดต้นไส้กรองของน้ำมันได้ สำคัญมากในเขตหนาว สำหรับประเทศไทยไม่มีข้อกำหนดนี้ จุดเกิดหมอกนี้มักจะสูงกว่าจุดเริ่มไหลเล็กน้อย หรือเท่ากันก็ได้ โดยทั่วไปจุดเกิดหมอกจะมีค่าประมาณ 10 – (-)20 องศาเซลเซียส

- จุดเริ่มไหล (Pour point)

จุดเริ่มไหลเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับปริมาณไขของน้ำมันดีเซลเช่นเดียวกับจุดเกิดหมอก แต่จะใช้ความสามารถในการไหลในการวัดแทน ซึ่งตามมาตรฐานกำหนดว่า จุดเริ่มไหลคือ อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเกิดหมอกประมาณ 5 -11 องศาเซลเซียส ซึ่งจุดเริ่มไหลจะมีค่าสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับปริมาณและลักษณะของไขที่มีอยู่ในน้ำมัน น้ำมันที่มีปริมาณไขสูงก็จะมีจุดเริ่มไหลสูง

จุดเกิดหมอกและจุดเริ่มไหลเป็นสมบัติทางเชื้อเพลิงที่สำคัญสำหรับน้ำมันดีเซลที่ต้องการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ หรือในประเทศเมืองหนาว เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำองค์ประกอบของพาราฟินของน้ำมันดีเซลอาจแยกออกเป็นไข ซึ่งจะอุดตันทางเดินของน้ำมันเชื้อเพลิงและหม้อกรองเชื้อเพลิง ทำให้เครื่องยนต์ผิดปกติและดับในที่สุด ซึ่งขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำมันดิบและอุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันนั้น

3) ค่าเกี่ยวกับการระเหย (Volatility)

- ค่าความร้อนขั้นสูง (Higher heating value)

ค่าความร้อนขั้นสูง คือ ปริมาณความร้อนที่เชื้อเพลิงปลดปล่อยออกมาเมื่อมีการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งค่าความร้อนจะรวมความร้อนจากการควบแน่นไอน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาและความชื้นของเชื้อเพลิงด้วย ค่านี้แสดงถึงพลังงานสูงสุดของเครื่องยนต์ที่สามารถเป็นไปได้ในทางทฤษฎี เนื่องจากในเครื่องยนต์จริงต้องมีการสูญเสียไม่ว่าจากแรงเสียดทาน การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ หรืออื่นๆ โดยทั่วไปค่านี้จะนิยามวัดด้วยมาตรฐาน ASTM D 4809 สำหรับน้ำมันดีเซลที่ใช้ในการขนส่งและตามมาตรฐาน ASTM D 4868 สำหรับน้ำมันดีเซลที่ใช้กับเครื่องจักรในโรงงานจะมีค่าความร้อนขั้นสูงประมาณ 13400-14800 Btu/gal

- จุดวาบไฟ (Flash point)

จุดวาบไฟ คือ อุณหภูมิที่น้ำมันดีเซลได้รับความร้อนแล้วสามารถทำให้เกิดของผสมระหว่างอากาศ และไอของน้ำมันเหนือของเหลวแล้วติดไฟได้เมื่อมีประกายไฟเพียงเล็กน้อย ซึ่งจุดวาบไฟเป็นค่าที่บอกถึง ความปลอดภัยในการเก็บรักษา มีความสำคัญในด้านอันตรายจากอัคคีภัยในการขนส่ง และการใช้งานเท่านั้น แต่ไม่มีความสำคัญโดยตรงต่อการเผาไหม้ และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ นอกจากนี้ยังใช้จุดวาบไฟสำหรับตรวจสอบหากน้ำมันชนิดเบาเจือปนอยู่ ซึ่งโดยมากค่ามาตรฐานจะมีค่าต่ำสุดในช่วง 38-52 องศาเซลเซียส

4) ค่าเกี่ยวกับความสะอาด

- ปริมาณคาร์บอนคงเหลือและปริมาณเถ้า (Carbon residue and Ash content)

ปริมาณคาร์บอนคงเหลือและปริมาณเถ้าเป็นค่าที่บอกถึง สารเหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ในรูปของกากคาร์บอนและสารอนินทรีย์ตามลำดับ

- ปริมาณกำมะถัน (Sulfur content)

ปริมาณกำมะถันส่วนใหญ่จะบอกเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของกำมะถันในน้ำมันดีเซล ซึ่งปริมาณกำมะถันที่สูงเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพของสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้น และมีการปล่อยแก๊ส SO_x (SO_2 และ SO_3) มาก ซึ่งแก๊สดังกล่าวนอกจากจะเป็นมลพิษแล้วยังทำให้เกิดการกัดกร่อนและเหนียวนำไปเกิดคราบคาร์บอนในกระบอกสูบอีกด้วย ดังนั้นในปัจจุบันปริมาณกำมะถันจึงถูกกำหนดให้มีค่าสูงไม่เกินร้อยละ 0.05

- สี (Color)

โดยปกติน้ำมันดีเซลหมุนเร็วธรรมดาปกติจะมีสีชาอ่อน แต่บางครั้งสีอาจเปลี่ยนไปบ้างเนื่องจากในกระบวนการกลั่นน้ำมันอาจใช้น้ำมันดิบจากแหล่งต่างกันแต่คุณสมบัติในการเผาไหม้ยังคงเหมือนเดิม ทั้งนี้สีไม่ได้เป็นตัวสำคัญที่กำหนดคุณภาพน้ำมัน ผู้ประกอบการได้กำหนดมาตรฐานสีที่มีค่าไม่เกิน 3 ซึ่งเป็นสีคล้ายสีชา สีของน้ำมันดีเซลอาจเข้มขึ้นหากเก็บไว้นานๆ แต่ในกรณีที่สีเปลี่ยนแปลงไปมากเช่นเป็นสีเขียวหรือสีดำคล้ำ ควรตั้งข้อสังเกตว่าอาจมีการปลอมปนของน้ำมันก๊าด น้ำมันเตา หรือน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้ว ส่วนน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว B5 มีสีเขียวเพื่อป้องกันการปลอมปนจึงมีการการปรับเปลี่ยนโครงสร้างสีน้ำมันเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว B5 จากสีเขียวเป็นสีแดง ทำให้จำแนกความแตกต่างของชนิดน้ำมันเชื้อเพลิงได้ชัดเจนขึ้น

2.2 ไบโอดีเซล [พิสมัย เจนวนิชปัญญกุล และ ลลิตา อัตนโก, 2549]

การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลไม่ใช่แนวคิดใหม่ แต่มีการใช้มาตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ในขณะนั้น น้ำมันปิโตรเลียมยังมีราคาสูงและหาได้ง่าย ทำให้เชื้อเพลิงจากน้ำมันพืชไม่ได้รับความสนใจ ต่อมาเกิดวิกฤตการณ์ขาดแคลนน้ำมันในปี ค.ศ.1971 เชื้อเพลิงจากน้ำมันพืชกลับมาได้รับความสนใจอีกครั้ง ทั้งนี้เพราะเป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สามารถหาได้ตามท้องถิ่นนั้นๆ ในต่างประเทศมีการนำน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันดอกทานตะวันและน้ำมันใช้แล้ว มาใช้ทดลองเดินเครื่องยนต์ สำหรับประเทศไทยได้เริ่มทำการวิจัยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524 โดยใช้น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันเมล็ดสบู่ดำ น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันปาล์ม รวมถึงเอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม แต่เมื่อวิกฤตการณ์น้ำมันผ่านพ้นไปความสนใจในการผลิตเชื้อเพลิงจากน้ำมันพืชก็ลดลง เป็นผลให้ข้อมูลการใช้้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงในประเทศไทยมีจำกัด จนกระทั่งเกิดวิกฤตการณ์น้ำมันขึ้นอีกครั้งเมื่อต้นปี พ.ศ. 2544

ไบโอดีเซลโดยทั่วไปคือ เชื้อเพลิงที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ เป็นน้ำมันที่มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ซึ่งสามารถใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ต้องทำการปรับแต่งเครื่องยนต์ เป็นเชื้อเพลิงสะอาดเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์และไม่มีกำมะถันกับสารก่อมะเร็ง เป็นส่วนประกอบซึ่งส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม เนื่องจากน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล มีองค์ประกอบและมีโครงสร้างที่ต่างกัน ทำให้ไบโอดีเซลมีสมบัติที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล ซึ่งบางสมบัติก็เป็นข้อได้เปรียบ และบางสมบัติก็เป็นข้อเสียเปรียบ โดยสามารถเปรียบเทียบสมบัติของไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซลได้ดังนี้

1. ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ทำให้ไอเสียที่ปล่อยออกจากเครื่องยนต์ไม่ก่อให้เกิดภาวะฝนกรด แต่น้ำมันดีเซลจะมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เมื่อถูกเผาไหม้แล้ว กำมะถันในน้ำมันดีเซล จะเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดซัลฟิวริก ตามลำดับ เกิดเป็นมลพิษทางอากาศ เมื่อฝนตกจะชะล้างมลพิษเหล่านี้เกิดเป็นฝนกรดได้
2. น้ำมันดีเซล ไม่มีออกซิเจนในโครงสร้างโมเลกุล และมีสารประกอบแโรแมติกถึงร้อยละ 20-40 ขณะที่ไบโอดีเซลไม่มีสารประกอบประเภทแโรแมติก แต่มีออกซิเจนอยู่ในโมเลกุลถึงร้อยละ 10-12 ทำให้เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ไอเสียที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก และมีควันดำต่ำกว่าการใช้น้ำมัน
3. ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงมีค่าการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ดีกว่าน้ำมันดีเซล
4. น้ำมันดีเซลไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุล ขณะที่ไบโอดีเซลมีพันธะคู่ในน้ำมันพืช ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างกันตามชนิดของน้ำมันพืช ทำให้ไบโอดีเซลไม่เสถียรเกิดออกซิเดชันได้เร็วกว่าน้ำมันดีเซล และมีระยะเวลาเก็บรักษาหลังการผลิตสั้นกว่าน้ำมันดีเซล
5. ไบโอดีเซลมีสมบัติในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ได้ดี

2.2.1 วัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

1) น้ำมันพืช

น้ำมันพืชเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สามารถผลิตได้ในหลายประเทศ สำหรับประเทศไทยสามารถผลิตน้ำมันพืชได้หลายชนิดและมีกำลังการผลิตรวมกว่าหกล้านตันต่อปีซึ่งปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่มีรายงานปริมาณการผลิตที่สูงสุด รองลงมาคือ มะพร้าว

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ได้รายงานปริมาณผลผลิตของพืชน้ำมัน แสดงดังตารางที่ 2.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

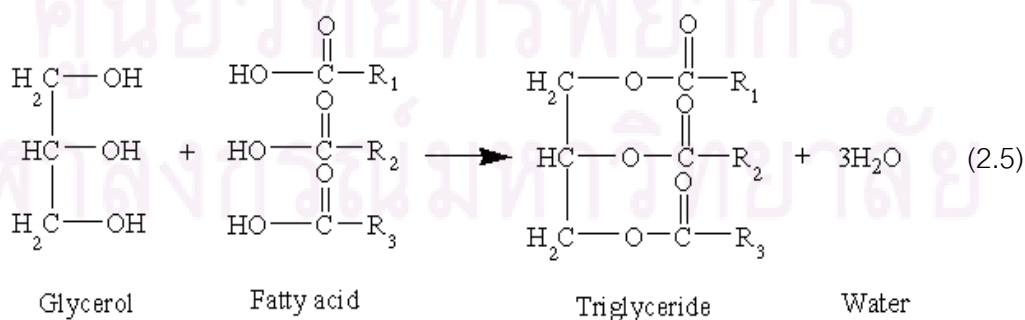
ตารางที่ 2.3 ปริมาณการผลิตน้ำมันพืชของประเทศไทย (พืชน้ำมัน) [สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2552 : ออนไลน์]

| พ.ศ. | ปาล์มน้ำมัน | มะพร้าว | ถั่วเหลือง | ถั่วลิสง | ละหุ่ง | งา |
|-----------|-------------|---------|------------|----------|--------|----|
| 2538/2539 | 2254 | 2362 | 386 | 147 | 6 | 34 |
| 2539/2540 | 2611 | 2291 | 359 | 147 | 6 | 34 |
| 2540/2541 | 2578 | 2064 | 338 | 126 | 6 | 35 |
| 2541/2542 | 2523 | 2005 | 321 | 135 | 7 | 36 |
| 2542/2543 | 3413 | 2110 | 319 | 138 | 7 | 37 |
| 2543/2544 | 3343 | 1400 | 312 | 132 | 9 | 39 |
| 2544/2545 | 4097 | 1396 | 261 | 107 | 9 | 39 |
| 2545/2546 | 4001 | 1418 | 260 | 117 | 10 | 40 |
| 2546/2547 | 4903 | 1432 | 231 | 76 | 10 | 40 |
| 2547/2548 | 5182 | 1499 | 218 | 76 | 10 | 41 |
| 2548/2549 | 5003 | 1450 | 221 | 67 | 10 | 41 |
| 2549/2550 | 6390 | 1540 | 201 | 54 | 11 | 41 |
| 2550/2551 | 9265 | ND | 187 | 53 | ND | ND |
| 2551/2552 | 8318 | ND | 190 | 52 | ND | ND |

ND ไม่พบ

- องค์ประกอบของน้ำมันพืช [นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545]

น้ำมันพืชเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 10 ถึง 30 อะตอม ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรอลกับกรดไขมันแสดงดังสมการที่ 2.5



เนื่องจากโมเลกุลของกลีเซอรอลมีตำแหน่งที่กรดไขมันจะเข้าทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันได้ถึง 3 ตำแหน่ง ทำให้ได้ไตรกลีเซอไรด์หลายชนิด โมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ที่ประกอบด้วยกรดไขมันชนิดเดียวกันทั้ง 3 ตำแหน่งเรียกว่า ไตรกลีเซอไรด์ชนิดเดี่ยว (simple triglycerides) ถ้าประกอบด้วยกรดไขมันต่างชนิดกันเรียกว่า ไตรกลีเซอไรด์ชนิดผสม (mixed triglycerides) ไตรกลีเซอไรด์ชนิดเดี่ยวพบได้น้อยมากในธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะเป็นไตรกลีเซอไรด์ผสม โดยสามารถจำแนกชนิดของกรดไขมันได้เป็น 2 ประเภท คือ กรดไขมันชนิดอิ่มตัวและชนิดไม่อิ่มตัว กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนอะตอม 1 แห่ง เรียกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว 1 พันธะ (monounsaturated fatty acid) หากมีมากกว่า 1 แห่งเรียกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายพันธะ (polyunsaturated fatty acid) กรดไขมันอิ่มตัวที่พบมากในธรรมชาติคือ กรดปาล์มิติก (C16:0) โดยสามารถพบได้ในไขมันและน้ำมันเกือบทุกชนิด ส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่พบมากคือกรดโอเลอิก (C18:1) ซึ่งไขมันและน้ำมันแต่ละชนิดจะมีสมบัติทางเคมีและกายภาพแตกต่างกันตามสมบัติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ เช่น น้ำมันมะพร้าวมีกรดไขมันอิ่มตัวโมเลกุลสั้นจำนวนมาก และมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวจำนวนน้อย จึงมีจุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้มีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ส่วนไขวัวมีกรดไขมันชนิดอิ่มตัวโมเลกุลยาวจำนวนมากเป็นองค์ประกอบ จึงมีลักษณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูง ตารางที่ 2.4 แสดงชนิดและสมบัติของกรดไขมันที่พบบ่อยในน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ ซึ่งนอกจากกรดไขมันเหล่านี้แล้ว ยังมีกรดไขมันอื่น ๆ อีกที่พบในน้ำมันพืชแต่มีในปริมาณน้อย

ตารางที่ 2.4 สมบัติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันพืช [Knothe, 1996]

| Fatty acid | Molecular Weight | Melting point (°C) | Boiling point (°C) | Heat of combustion (kg-cal/mol) |
|------------------------|------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|
| Caprylic acid (C8:0) | 144.2 | 16.5 | 240 | - |
| Capric acid (C10:0) | 172.3 | 31.6 | 271 | 1453.1 |
| Lauric acid (C12:0) | 200.3 | 44.8 | 130 | 1763.3 |
| Myristic acid (C14:0) | 228.4 | 54.4 | 149 | 2073.9 |
| Palmitic acid (C16:0) | 256.4 | 62.9 | 167 | 2384.7 |
| Stearic acid (C18:0) | 284.5 | 70.1 | 184 | 2696.1 |
| Oleic acid (C18:1) | 282.5 | 16.3 | 286 | 2657.4 |
| Linoleic acid (C18:2) | 280.4 | -5.0 | 229 | - |
| Linolenic acid (C18:3) | 278.4 | -11.0 | 231 | - |

น้ำมันพืชส่วนใหญ่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในกรดไขมันระหว่าง 12 ถึง 18 อะตอม และมีจำนวนคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลเป็นเลขคู่เสมอ โดยมีกรดไขมันทั้งประเภทอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในปริมาณที่แตกต่างกัน องค์ประกอบกรดไขมันหลักของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการบริโภค แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติและองค์ประกอบกรดไขมันหลักของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ ที่ใช้เพื่อการบริโภค [Hui et al., 1996]

| องค์ประกอบกรดไขมัน | น้ำมันพืช | | | | | | | | |
|--|-----------|--------------|-------|----------|----------|------------|----------|---------|--------|
| | มะพร้าว | เมล็ดในปาล์ม | ปาล์ม | ถั่วลิสง | เมล็ดเรพ | ถั่วเหลือง | ทานตะวัน | ข้าวโพด | รำข้าว |
| C<12:0 | 15.0 | 8.1 | - | - | - | - | - | - | - |
| C12:0 | 47.5 | 50.4 | 0.2 | - | - | 0.1 | - | - | - |
| C14:0 | 18.1 | 17.3 | 1.1 | - | 0.1 | 0.2 | 0.1 | - | 0.3 |
| C16:0 | 8.8 | 7.9 | 44.0 | 8.1 | 3.5 | 10.7 | 6.0 | 12.9 | 15.0 |
| C18:0 | 2.6 | 2.3 | 4.5 | 1.5 | 1.5 | 3.9 | 4.0 | 2.5 | 1.7 |
| อื่น ๆ (เช่น C20:0, C22:0, C24:0) | 0.1 | - | 0.4 | 4.2 | 0.9 | 0.2 | 1.1 | | 0.6 |
| ปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวทั้งหมด | 92.1 | 86 | 50.2 | 13.8 | 6.0 | 15.0 | 11.2 | 15.4 | 17.6 |
| C16:1 | - | - | 0.1 | - | 0.2 | 0.3 | < 1.0 | - | - |
| C18:1 | 6.2 | 11.8 | 39.2 | 49.9 | 60.1 | 22.8 | 16.5 | 33.1 | 43.0 |
| C18:2 | 1.6 | 2.1 | 10.1 | 35.4 | 20.1 | 50.8 | 71.7 | 48.8 | 37.4 |
| อื่น ๆ (เช่น C18:3, C20:1, C22:1, C24:1) | Trace | Trace | 0.4 | Trace | 11.2 | 6.8 | 0.6 | 2.6 | 1.5 |
| ปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวทั้งหมด | 7.8 | 13.9 | 49.7 | 85.3 | 91.6 | 80.7 | 88.8 | 84.5 | 81.9 |

- ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่ขึ้นในเขตร้อนชื้น ดังนั้นจึงเจริญเติบโตได้ดีในภาคใต้ของไทย และบริเวณที่ปลูกมากที่สุดอยู่ที่จังหวัดกระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร สตูลและตรัง ผลปาล์มมีส่วนที่ให้น้ำมันสองส่วน คือ เมล็ดใน (kernel) และเนื้อหุ้มเมล็ด น้ำมันเมล็ดในมีสมบัติคล้ายน้ำมันมะพร้าวคือ มีกรดลอริกสูง ส่วนน้ำมันปาล์มจากเนื้อหุ้มเมล็ดมีองค์ประกอบคล้ายน้ำมันหมู มีวิตามินเอ และอีสูงกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น ผลปาล์มสุกมีเอนไซม์ที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระในตัวเองสูงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเมื่อปาล์มสุกตัดจากต้นต้องส่งโรงงานสกัดโดยเร็ว การสกัดน้ำมันปาล์มมีหลายวิธี มีทั้งสกัดจากปาล์มทั้งผล (เนื้อผสมเมล็ด) สกัดเฉพาะเนื้อปาล์ม และสกัดจากเมล็ดใน โดยน้ำมันที่ได้จะมีสมบัติ และองค์ประกอบแตกต่างกัน น้ำมันจากเมล็ดในปาล์มมีร้อยละ 44-53 ของเมล็ดปาล์มแห้ง มักนำมาใช้ทำสบู่ และผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น มาร์การีน และเนย มีค่าไอโอดีนสูงกว่าน้ำมันมะพร้าว เพราะมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นส่วนประกอบมากกว่าและมีกรดไขมันชนิดอิ่มตัวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น caproic และ caprylic น้อยกว่าน้ำมันมะพร้าว จุดหลอมเหลวจะสูงกว่าน้ำมันมะพร้าว 2-3 องศาเซลเซียส น้ำมันเมล็ดในปาล์มประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ ชนิด trisaturated ร้อยละ 63 disaturated-monounsaturated ร้อยละ 26 และ monosaturated – diunsaturated ร้อยละ 11 เนื่องจากค่าไอโอดีนสูงกว่าน้ำมันมะพร้าว เมื่อทำการเติมไฮโดรเจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพมากกว่า น้ำมันเมล็ดในปาล์มสามารถแยกออกเป็นส่วนที่เป็นของเหลวได้ โดยการกรองและกดด้วยความร้อน ส่วนที่เป็นของแข็งเรียกว่า สเตียรินใช้ทำเนย ส่วนที่เป็นของเหลว เรียกว่า โอเลอิน ใช้ในการบริโภคและอุตสาหกรรมสบู่

- การวิเคราะห์สมบัติเฉพาะทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช [Formo, 1979]

การวิเคราะห์น้ำมันพืชที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้น อาจทำได้โดยใช้วิธีเดียวกับน้ำมันดีเซล (แต่ไม่ทุกรายการ) ซึ่งการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำมันพืชแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำมันพืช

| Property | Symbol | Standard method | Unit |
|----------------------|--------|-----------------|-------------------------|
| Iodine value | IV | AOCS Cd 1-25 | g I ₂ /g oil |
| Saponification value | SV | AOCS Cd 3b-73 | mg KOH/ g oil |
| Acid value | AV | AOCS Cd 3-63 | mg KOH/ g oil |

ความหมายของค่าต่างๆ สามารถอธิบายได้พอสังเขปดังนี้

1. ค่าไอโอดีน (Iodine value)

ค่าไอโอดีน หมายถึง จำนวนกรัมของไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยาโดยน้ำมัน 100 กรัม ค่าไอโอดีนบ่งชี้ให้ทราบถึงความไม่อิ่มตัวของกรดไขมันที่มีในน้ำมันพืช ซึ่งน้ำมันพืชที่มีความไม่อิ่มตัวสูงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ได้ เช่น ปฏิกิริยาการรวมตัวหรือถูกออกซิไดซ์ได้จากออกซิเจนในอากาศ ซึ่งเป็นปัญหาในการเก็บรักษาและการใช้เป็นเชื้อเพลิง

2. ค่าแซพอนิฟิเคชัน (Saponification value)

ค่าแซพอนิฟิเคชัน หมายถึง จำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับน้ำมันหรือไขมัน 1 กรัม บ่งชี้ให้ทราบถึงขนาดหรือน้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในโมเลกุลของน้ำมันหรือไขมัน น้ำมันหรือไขมันที่โมเลกุลประกอบด้วยกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือขนาดโมเลกุลเล็ก หรือมีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลน้อยจะมีค่าแซพอนิฟิเคชันสูง ในทางตรงกันข้าม น้ำมันหรือไขมันที่โมเลกุลประกอบด้วยกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง หรือขนาดโมเลกุลใหญ่ หรือมีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลมากจะมีค่าแซพอนิฟิเคชันต่ำ

3. ค่าของกรด (Acid value)

ค่าของกรด เป็นจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ทำให้กรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในไขมัน 1 กรัม สะเทินพอดี กรดไขมันอิสระที่มีในน้ำมัน เนื่องมาจากการสลายตัวของกลีเซอไรด์ทางเคมีหรือโดยการกระทำของแบคทีเรีย ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าไตรกลีเซอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำมันหรือไขมันถูกทำลายด้วยเอนไซม์ไลเปสเป็นกรดไขมันอิสระมากน้อยเพียงใด ถ้าค่าสูงแสดงว่าไตรกลีเซอไรด์ถูกทำลายได้เป็นกรดไขมันอิสระมาก

ตัวอย่างสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลแสดงในตารางที่ 2.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล [พิสมัย เจนวนิชปัญญกุล และ ลลิตา อัครนโถ, 2549]

| สมบัติ | น้ำมันพืช | | | |
|--|-----------|--------------|---------|--------|
| | ปาล์มดิบ | เมล็ดในปาล์ม | มะพร้าว | สบู่ดำ |
| 1. ความต้วงจำเพาะ | 0.89 | 0.92 | 0.92 | 0.91 |
| 2. ดัชนีหักเห | 1.49 | 1.45 | 1.45 | 1.46 |
| 3. ค่าของกรด (AV), มก. KOH/กรัมไขมัน | 6.66 | 3.18 | 10.76 | 0.99 |
| 4. ปริมาณกรดไขมันอิสระ % | 2.37 | 1.13 | 3.83 | n/a |
| 5. ค่าไอโอดีนแบบวิจส์, มก.KOH/กรัมไขมัน | 51.32 | 18.10 | 9.07 | 101.40 |
| 6. ค่าแซฟอนิฟิเคชัน, มก.KOH/กรัมไขมัน | 202.67 | 255.00 | 260.00 | 145.20 |
| 7. ปริมาณน้ำและสิ่งที่จะเหยยได้, % โดยน้ำหนัก | 0.46 | 0.18 | n/a | 0.14 |
| 8. ความหนืดที่ 40° ซ, เซนติสโตรก | 24.90 | 28.65 | 24.85 | 34.55 |

n/a ไม่มีข้อมูล

2.2.2 มาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซล [ศิริวรรณ ศิลป์สกุลสุข, 2549]

ปัจจุบันประเทศไทยได้มุ่งพัฒนากระบวนการผลิตไบโอดีเซลชนิดเมทิลเอสเทอร์อย่างกว้างขวาง ดังนั้นไบโอดีเซลที่ผลิตและจำหน่ายตามแหล่งบริการจึงต้องมีคุณภาพเป็นไปตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ซึ่งในข้อกำหนดจะบอกถึงวิธีทดสอบมาตรฐานที่ใช้ และกำหนดเครื่องมือที่ใช้ ทั้งขนาดรูปร่างอย่างละเอียด โดยข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2552 ของกรมธุรกิจพลังงาน ซึ่งประกาศในราชกิจจานุเบกษา เมื่อวันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2552 แสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 มาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลของประเทศไทย [กรมธุรกิจพลังงาน, 2552 : ออนไลน์]

| ข้อกำหนด | ข้อกำหนด ขั้นต่ำ | ข้อกำหนด ขั้นสูง | วิธีทดสอบ |
|--|---------------------|------------------------|-------------|
| เมทิลเอสเทอร์, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methyl ester, % wt.) | ไม่ต่ำกว่า 96.5 | - | EN 14103 |
| ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส, กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร (Density at 15 °C, kg/m ³) | ไม่ต่ำกว่า 860 | ไม่สูงกว่า 900 | ASTM D 1298 |
| ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส, เซนติสโตกส์ (Viscosity at 40 °C, cSt) | ไม่ต่ำกว่า 3.5 | ไม่สูงกว่า 5 | ASTM D 445 |
| จุดวาบไฟ, องศาเซลเซียส (Flash point, °C) | ไม่ต่ำกว่า 120 | - | ASTM D 93 |
| กำมะถัน, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur, % wt.) | - | ไม่สูงกว่า 0.0010 | ASTM D 2622 |
| กากถ่าน, ร้อยละโดยน้ำหนัก (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (Carbon residue, on 10% distillation residue, % wt.) | - | ไม่สูงกว่า 0.30 | ASTM D 4530 |
| จำนวนซีเทน (Cetane number) | ไม่ต่ำกว่า 51 | - | ASTM D 613 |
| เถ้าซัลเฟต, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulfated ash, % wt.) | - | ไม่สูงกว่า 0.02 | ASTM D 874 |
| น้ำ, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Water, wt%.) | - | ไม่สูงกว่า 0.050 | ASTM D 2709 |
| สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Total contaminate, % wt.) | - | ไม่สูงกว่า 0.0024 | ASTM D 5452 |
| การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper strip corrosion) | - | ไม่สูงกว่า หมายเลข1 | ASTM D 130 |
| เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส, ชั่วโมง (Oxidation stability at 110 °C, hours) | - | ไม่สูงกว่า 6 | EN 14112 |
| ค่าความเป็นกรด, มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม (Acid value, mg KOH/g) | - | ไม่สูงกว่า 0.50 | ASTM D 664 |
| ค่าไอโอดีน, กรัมไอโอดีน/100กรัม (Iodine value, g Iodine /100 g) | - | ไม่สูงกว่า 120 | EN 14111 |

ตารางที่ 2.8 มาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลของประเทศไทย (ต่อ)

| ข้อกำหนด | ข้อกำหนด ขั้นต่ำ | ข้อกำหนด ขั้นสูง | วิธีทดสอบ |
|--|---|----------------------|-----------------------------|
| กรดไลโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Linolenic acid methyl ester, % wt.) | - | ไม่สูงกว่า 12 | EN 14103 |
| เมทานอล, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methanol, % wt.) | - | ไม่สูงกว่า 0.20 | EN 14110 |
| โมโนกลีเซอไรด์, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Monoglyceride, % wt.) | - | ไม่สูงกว่า 0.80 | EN 14105 |
| ไดกลีเซอไรด์, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Diglyceride, % wt.) | - | ไม่สูงกว่า 0.20 | EN 14105 |
| ไตรกลีเซอไรด์, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Triglyceride, % wt.) | - | ไม่สูงกว่า 0.20 | EN 14105 |
| กลีเซอรินอิสระ, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Free glycerin, % wt.) | - | ไม่สูงกว่า 0.02 | EN 14105 |
| กลีเซอรินทั้งหมด, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Total glycerin, % wt.) | - | ไม่สูงกว่า 0.25 | EN 14105 |
| โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม), 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 |
| ฟอสฟอรัส, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Phosphorus, % wt.) | - | ไม่สูงกว่า 0.0010 | prEN 14538 |
| สารแต่งเติม (ถ้ามี) (Additive) | ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดี กรมธุรกิจพลังงาน | | |

2.2.3 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์ [พิสมัย เจนวินชัชปัญจกุล และ ลลิตา อัครนโถ, 2549]

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะต้องมีการควบคุมสมบัติต่าง ๆ ของไบโอดีเซลให้เป็นไปตามข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ตั้งไว้เช่น ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภท เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2550 ของกรมธุรกิจพลังงานซึ่งกำหนดตามมาตรฐาน EN14214 ของสหภาพยุโรป ส่วนสหรัฐอเมริกาใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM D 6751 ไม่ว่าจะข้อกำหนดของประเทศใดก็ตามจะพิจารณาถึงการนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายในการใช้งาน มีความปลอดภัย และไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ข้อกำหนดจึงแบ่งวิธีทดสอบออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทแรกเป็นการทดสอบสมบัติทางเคมี และกายภาพ เช่นการหาค่าความเป็นกรด ปริมาณกากคาร์บอน จุดวาบไฟ ความหนืด เป็นต้น อีกประเภทเป็นการทดสอบในการทำงานเช่น การหาจำนวนซีเทน เป็นต้น น้ำมันไบโอดีเซลที่มีสมบัติบางประการไม่เป็นไปตามมาตรฐานดังกล่าวอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้งานในระยะยาว

1) ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ คือค่าที่แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล หากมีปริมาณน้อยกว่าที่กำหนด แสดงถึงมีปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ หรือ ไตรกลีเซอไรด์อยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณสูงกว่าที่กำหนด ส่งผลให้ความหนืดของไบโอดีเซลมีค่าสูง เป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตันในหัวฉีดหรือกระบอกสูบของเครื่องยนต์

2) ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง เมื่อมีค่ามากก็จะให้พลังงานความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย ความหนาแน่นของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน นอกจากนี้ปริมาณเมทานอลที่ตกค้างในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำด้วย

3) ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับการไหล การฉีดเป็นฝอยของหัวฉีดในห้องเผาไหม้ การฉีดเป็นฝอยขนาดเล็กจะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ ความหนืดของไบโอดีเซลขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบ

4) จุดวาบไฟ คืออุณหภูมิต่ำสุดเมื่อเปลวไฟผ่านเหนือไอของน้ำมัน แล้วทำให้น้ำมันติดไฟ ปริมาณเมทานอลที่หลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลเป็นสาเหตุให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานได้ จุดวาบไฟมีผลต่อการขนส่ง เคลื่อนย้าย และการจัดเก็บ ปริมาณเมทานอลที่ยังคงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณมากกว่า 0.2 % ส่งผลให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส

5) ปริมาณกำมะถัน ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ เนื่องจากน้ำมันมีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำกว่า 15 ส่วนในล้านส่วน องค์ประกอบของกำมะถันในน้ำมันเมื่อถูก

เผาไหม้จะเปลี่ยนเป็นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งถูกปล่อยออกมาพร้อมไอเสียของรถยนต์ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

6) ปริมาณกากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) เป็นค่าที่สัมพันธ์กับปริมาณกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ สบู่ ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ยังหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล หากมีปริมาณกากถ่านสูงกว่าข้อกำหนด แสดงถึงการมีสารต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้นหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล นอกจากนี้ยังแสดงถึงแนวโน้มของปริมาณกากถ่านที่เหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ กากถ่านมีผลต่อการอุดตันในหัวฉีดหรือที่ลูกสูบ ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง เครื่องยนต์สกปรกและต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องบ่อยครั้ง

7) ปริมาณเถ้าซัลเฟต เป็นค่าที่มีผลต่อการอุดตันในเครื่องยนต์ ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เนื่องจากการตกค้างของสบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยา

8) ปริมาณน้ำ เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หัวฉีดอุดตัน เนื่องจากเป็นตัวเร่งให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังน้ำมัน นอกจากนี้ น้ำในน้ำมันทำให้การเผาไหม้ไม่ดี และยังเป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับเอสเทอร์ เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนในเครื่องยนต์

9) ปริมาณสิ่งปนเปื้อนทั้งหมด มีผลเสียต่อเครื่องยนต์หลายด้าน เช่น สมบัติด้านเสถียรภาพของไบโอดีเซลระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกระบวนการทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสบู่ของกรดไขมันอิสระ และตัวเร่งปฏิกิริยาเบส กรดไขมันอิสระ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน แอลกอฮอล์อย่างแข็ง สารประกอบแคโรทีน วิตามิน และอื่น ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของวัตถุดิบน้ำมันพืชเริ่มต้น โดยทั่วไปสิ่งปนเปื้อนทั้งหมดจะถูกกำจัดออกจากไบโอดีเซลในขั้นตอนการล้างน้ำ

10) การกัดกร่อนแผ่นทองแดง เป็นค่าที่แสดงถึงการกัดกร่อนของน้ำมันต่อโลหะที่ใช้เป็นส่วนในเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากปริมาณกรด เช่น กรดไขมันอิสระ และสารประกอบซัลเฟตในน้ำมัน ซึ่งค่าการกัดกร่อนนี้มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์

11) ค่าของกรด เป็นค่าที่แสดงความเป็นกรดในน้ำมันไบโอดีเซล เป็นผลมาจากปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช และปริมาณกรดที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีผลต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ ทำให้อายุการใช้งานของปั๊มและไส้กรองน้ำมันลดลง

12) ปริมาณกรดไลโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ เป็นค่าที่แสดงถึงพันธะคู่และความไม่อิ่มตัวของไบโอดีเซล ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดพอลิเมอไรเซชันในเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการอุดตัน และการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง ซึ่งปริมาณกรดไลโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์จะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เลือกมาใช้เป็นวัตถุดิบ

13) ค่าไอโอดีน เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณพันธะคู่ในน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ค่าไอโอดีนสูง แสดงถึงมีแนวโน้มที่จะเกิดออกซิเดชัน ได้มาก นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังมีความสัมพันธ์กับจุดเกิดหมอก ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มเกิดไข หรือจับตัวเป็นก้อนแข็งไบโอดีเซลที่มีค่าไอโอดีนต่ำจะมีจุดเกิดหมอกสูง ซึ่งมีผลต่อการใช้งานสภาพอากาศเย็น

14) ปริมาณเมทานอล เป็นค่าที่เกี่ยวข้องจุดวาบไฟ เนื่องจากเมทานอลมีจุดวาบไฟต่ำ ถ้ามีเมทานอลปนอยู่ในไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟต่ำลงด้วย ซึ่งมีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษา การขนส่งและการนำมาใช้ในเครื่องยนต์ และหากเมทานอลมีค่าความเข้มข้นมากกว่า 5% จะมีผลกระทบต่อค่าซีเทน และการหล่อลื่นของน้ำมัน

15) ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ เป็นค่าที่แสดงถึงคุณสมบัติของปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีด กระบอกสูบและวาล์วภายในเครื่องยนต์

16) ปริมาณกลีเซอรินอิสระ คือปริมาณกลีเซอรินที่ยังเหลืออยู่ในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการแยกกลีเซอรินไม่สมบูรณ์ ทำให้มีปัญหาการแยกชั้นของกลีเซอรินในการจัดเก็บไบโอดีเซล รวมถึงการสะสมที่บริเวณด้านล่างของถังน้ำมัน กลีเซอรินมีผลต่อการอุดตัน ที่หัวฉีดและระบบลำเลียงน้ำมัน

17) ปริมาณกลีเซอรินทั้งหมด คือปริมาณของกลีเซอรินอิสระ และปริมาณกลีเซอรินในโมเลกุลของ โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ที่เจือปนในองค์ประกอบไบโอดีเซล ซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันไม่สมบูรณ์ มีผลก่อให้เกิดการอุดตันที่บริเวณหัวฉีดและไส้กรอง และปัญหาการใช้งานในสภาพอากาศเย็น

18) ปริมาณโลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) และโลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) เป็นค่าที่ได้จากการวัดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบส สบู่และโลหะหนักจากน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลที่หลงเหลือในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล นอกจากนี้แคลเซียมยังมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีสำหรับกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของเอสเทอร์อีกด้วย

19) ปริมาณฟอสฟอรัส โดยปกติแล้วฟอสฟอรัสเป็นสารปนเปื้อนอยู่ในวัตถุดิบน้ำมันพืช ตั้งแต่เริ่มต้น หากไม่ทำการกำจัดออกจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีฟอสฟอรัสปนอยู่ด้วย และหากมีปริมาณเกินกว่าที่กำหนด จะทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์คะตะไลติกคอนเวอร์เตอร์ (catalytic converter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการปล่อยมลพิษ จากการที่มาตรฐานของการปล่อยมลพิษเป็นกฎข้อบังคับมากขึ้น อุปกรณ์คะตะไลติกคอนเวอร์เตอร์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล

2.3 การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงทดแทน

น้ำมันพืชดิบนอกจากจะมีองค์ประกอบหลักเป็นไตรกลีเซอไรด์แล้วยังประกอบด้วยกรดไขมันอิสระ น้ำ สเตอรอยด์ ยาง กลิ่น ฟอสโฟลิปิด และสิ่งปลอมปนอื่น นอกจากนี้ใช้น้ำมันพืชแต่ละชนิดยังมีปริมาณกรดไขมันที่มีความไม่อิ่มตัวต่างกัน

2.3.1 การใช้น้ำมันพืชโดยตรง [Demirbas 2003, Srivastava et al., 2000, Ail et al.,1994]

การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงทดแทนโดยตรงเกิดขึ้นเมื่อประมาณ 20 ปีมาแล้ว พบว่าการใช้น้ำมันพืชโดยตรงก่อให้เกิดปัญหาแก่เครื่องยนต์ เนื่องจากน้ำมันพืชมีความสามารถในการระเหยต่ำทำให้การจุดระเบิดต้องใช้อุณหภูมิสูงตอนเริ่มเดินเครื่อง และความหนืดสูงของน้ำมันพืชทำให้ระบบหัวฉีดของเครื่องยนต์ทำงานหนัก และได้หยดของน้ำมันขนาดใหญ่ไม่สามารถเผาไหม้ได้หมดในการจุดระเบิดแต่ละครั้ง ซึ่งทำให้เกิดคราบสะสมเป็นคราบเขม่าที่ลูกสูบ นอกจากนี้ระหว่างเผาไหม้จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างพันธะคู่ในโมเลกุลของน้ำมันพืชทำให้เกิดยางเหนียวจนทำให้ลูกสูบเกิดความเสียหายได้

2.3.2 การใช้น้ำมันพืชโดยปรับปรุงคุณภาพ [Demirbas 2003, Ma et al.,1999]

ปัญหาหลักของการใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงคือ ความหนืดซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 10 – 20 เท่า ซึ่งการแก้ปัญหาดังกล่าวอาจทำได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้

1) การเจือจางน้ำมันพืช (Diluting) [Ma et al.,1999]

เป็นการนำน้ำมันพืชมาผสมกับน้ำมันดีเซลโดยตรง ตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนและแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่คาร์บอนสั้น ๆ ในอัตราส่วนโดยโมลต่างๆ เพื่อให้ความหนืดของน้ำมันพืชลดลง สามารถผสมน้ำมันพืชได้ตั้งแต่ร้อยละ 10 ขึ้นไปตามความเหมาะสมของน้ำมันพืชที่ใช้ เช่น Ziejewski และคณะ (1986) มีการศึกษาเกี่ยวกับการเจือจางของน้ำมันดอกทานตะวันโดยใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลเป็นตัวทำละลายในอัตราส่วน 1:3 โดยปริมาตร และความหนืดที่ได้มีค่าเท่ากับ 4.88 เซนติสโตก ที่ 40 องศาเซลเซียส ในขณะที่มาตรฐาน ASTM มีค่าเท่ากับ 4.0 เซนติสโตก ที่ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งของผสมดังกล่าวมีสมบัติไม่เหมาะสมกับเครื่องยนต์แบบ Direct injection ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ที่ใช้กับรถยนต์ สำหรับการใช้เป็นระยะเวลาสั้น เนื่องจากจุดเดือดของตัวทำละลายต่ำกว่าน้ำมันพืชมาก ทำให้มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมไม่หมด ทำให้เกิดการสะสมของคราบคาร์บอน ซึ่งเมื่อทดสอบกับเครื่องยนต์พบว่าเชื้อเพลิงชนิดนี้ทำให้เกิดคราบเขม่า

ที่หัวฉีด และแหวนลูกสูบมาก และอาจมีปัญหาล้างจากการนำไปใช้ต่างๆ มากมายแสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ปัญหาและสาเหตุที่น่าจะเกิดขึ้นกับเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิง [Harwood,1984]

| ปัญหาที่เกิดขึ้น | สาเหตุอาจมาจาก |
|--|---|
| <u>ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ในระยะเวลาสั้น</u> | |
| การติดเครื่องที่ภาวะอากาศหนาวเย็น | น้ำมันพืชมีความหนืดสูง มีค่าซีเทนและค่าจุดวาบไฟ (flash point) ที่ต่ำ |
| การอุดตันและเกิดยางเหนียวของไส้กรองน้ำมันและหัวฉีดเครื่องยนต์ดับ | ยางเหนียว(คือ phosphatide) ที่มีตามธรรมชาติในน้ำมันพืช ค่าซีเทนที่ต่ำมากในน้ำมันพืชบางชนิด |
| <u>ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ในระยะเวลายาว</u> | |
| การเกิดตะกอนที่มาจากกาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของหัวฉีดที่กระบอกสูบ | ความหนืดที่สูงของน้ำมันพืช การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงและการเผาไหม้ที่ไม่ดีนักในบางส่วนของน้ำมันพืช |
| เกิดคราบเขม่าที่กระบอกสูบ | ความหนืดที่สูงของน้ำมันพืช การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงและการเผาไหม้ที่ไม่ดีนักในบางส่วนของน้ำมันพืช |
| การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ | การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของน้ำมันพืชไม่อิ่มตัวสะสมในข้อเหวี่ยงใต้ห้องเครื่องยนต์ |

2) การทำเป็นของผสมไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) [Ma et al.,1999]

การทำไมโครอิมัลชัน เป็นการกระจายของอนุภาคของเหลวที่แขวนลอยในตัวกลางของเหลวอีกชนิดหนึ่งอย่างสมดุล ด้วยการผสมน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่สั้น เช่น เมทานอล หรือเอทานอล ซึ่งของเหลวทั้งสองชนิดไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แต่จะกระจายตัวอยู่ได้ด้วยสารลดแรงตึงผิว ทำให้ได้สารคอลลอยด์ที่เสถียร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-150 มิลลิเมตร วิธีนี้สามารถปรับปรุงลักษณะที่เป็นละอองฝอยจากหัวฉีด เนื่องจากตัวทำละลายมีจุดเดือดต่ำเมื่อเทียบกับน้ำมันพืช

Goering และคณะ (1982) ศึกษาการเตรียมน้ำมันผสมที่มีลักษณะใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลเบอร์ 2 แม้ว่าน้ำมันผสมนี้จะมีเลขซีเทนต่ำกว่าไมโครอิมัลชัน แต่เชื้อเพลิงผสมที่มีน้ำมันพืช

อยู่มีความหนืดต่ำ การทำไมโครอิมัลชัน จะให้เลขซีเทน และค่าความร้อนต่ำ เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลเบอร์ 2

แม้ไมโครอิมัลชันจะสามารถแก้ปัญหาเรื่องความหนืด และใช้กับเครื่องยนต์ได้ดี แต่ก็ยังไม่สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นเช่น การเกิดเขม่าเกาะเครื่องยนต์เป็นจำนวนมาก เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และทำให้น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์มีความหนืดเพิ่มขึ้น [Ziejewski et al., 1984]

2) การแตกตัวน้ำมันพืชด้วยความร้อน (Pyrolysis or Thermal cracking) [Fangrui et al., 1999]

การแตกตัวน้ำมันพืชด้วยความร้อน เป็นการเปลี่ยนสารหนึ่งไปเป็นสารอื่น ๆ มากกว่าหนึ่งสาร โดยให้ความร้อนเพียงอย่างเดียว หรือมีตัวเร่งปฏิกิริยาช่วย เพื่อทำให้น้ำมันที่มีมวลโมเลกุลใหญ่แตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน กรดคาร์บอนิก และสารประกอบเอโรแมติก [Srivastava et al., 2000]

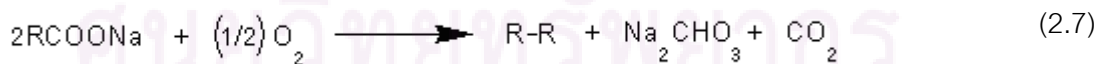
ข้อดีของวิธีนี้คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะทางเคมีคล้ายคลึงกับน้ำมันปิโตรเลียม และน้ำมันดีเซล แต่ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาค่อนข้างสูงประกอบกับต้องใช้อุณหภูมิสูงมากในการทำปฏิกิริยา ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมาก

จากการค้นคว้าพบว่าการแตกตัวของสบู่ 68 กิโลกรัมจะให้ผลิตภัณฑ์เหลวประมาณ 50 ลิตร ซึ่งเมื่อนำไปกลั่นแยกแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์หลัก เป็นน้ำมันดีเซล และน้ำมันก๊าดรวมกับน้ำมันเบนซินอีกเล็กน้อย ซึ่งกระบวนการเป็นไปตามสมการที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ

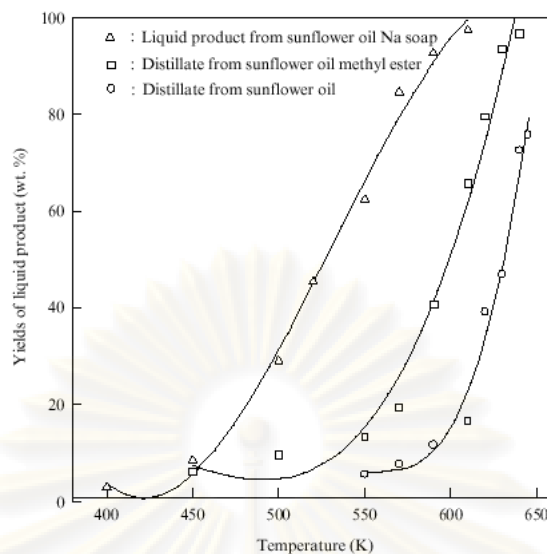
แซพอนิฟิเคชัน (Saponification)



การแตกตัวสบู่ (Soap pyrolysis or decarboxylation)



สำหรับผลิตภัณฑ์จากกระบวนการนี้สัมพันธ์กับอุณหภูมิและปัจจัยอื่นเช่นเดียวกับการไพโรไลส์น้ำมันพืชโดยตรงแสดงดังตารางที่ 2.10 ร้อยละผลิตภัณฑ์มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับน้ำมันพืชแต่ละชนิดเช่นเดียวกับการไพโรไลส์น้ำมันพืชโดยตรง



รูปที่ 2.1 ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการกลั่นน้ำมันพืช, ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชและการไพโรไลส์สบู่ [Badal et al.,1996]

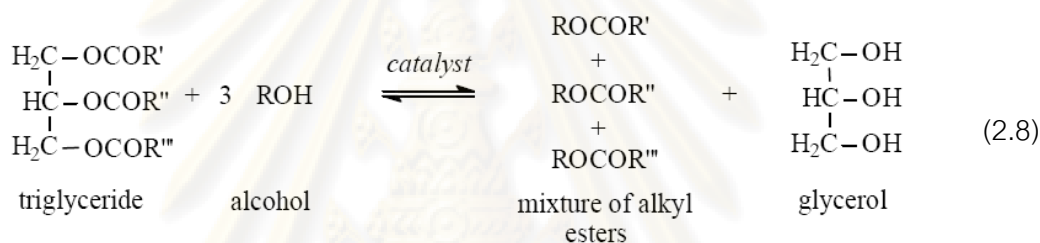
จากรูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.10 ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการกลั่นน้ำมันพืช การไพโรไลส์สบู่ และผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืช (กล่าวในหัวข้อถัดไป) ให้เส้นโค้งการกลั่นแตกต่างกัน โดยผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลส์สบู่มีช่วงจุดเดือดต่ำและกว้างที่สุด แสดงว่ามีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลสูง ต่างจากผลิตภัณฑ์จากน้ำมันพืชที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจึงไม่สามารถกลั่นได้หมดและมีการกระจายตัวต่ำ

ตารางที่ 2.10 ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลส์สบู่ที่อุณหภูมิต่างๆ [Badal et al.,1996]

| Temperature(K) | Sunflower oil | Corn oil | Cottonseed oil | Soybean oil |
|----------------|---------------|----------|----------------|-------------|
| 400 | 2.8 | 2.3 | 3.1 | 2.9 |
| 450 | 8.4 | 8.6 | 8.5 | 8.8 |
| 500 | 29 | 28.5 | 31.5 | 32.6 |
| 520 | 45.4 | 46.2 | 48 | 49.2 |
| 550 | 62.4 | 65.5 | 67.2 | 68 |
| 570 | 84.6 | 84 | 83.9 | 85.1 |
| 590 | 92.7 | 93 | 93.5 | 93.4 |
| 610 | 97.5 | 97.1 | 97.5 | 97.8 |

2.3.3 การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน [Badal et al.,1996, Fangrui et al.,1999, Ail et al., 1994, Demirbas, 2003]

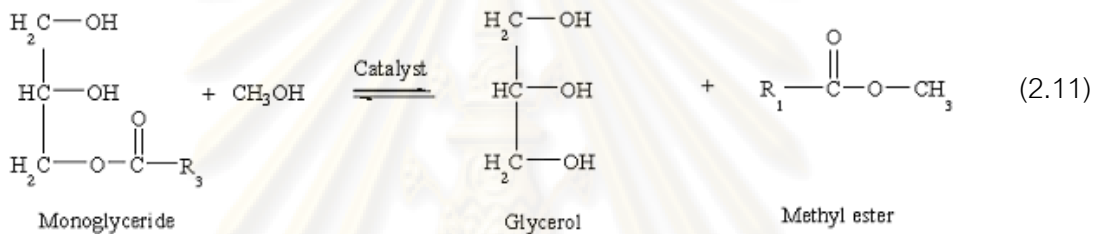
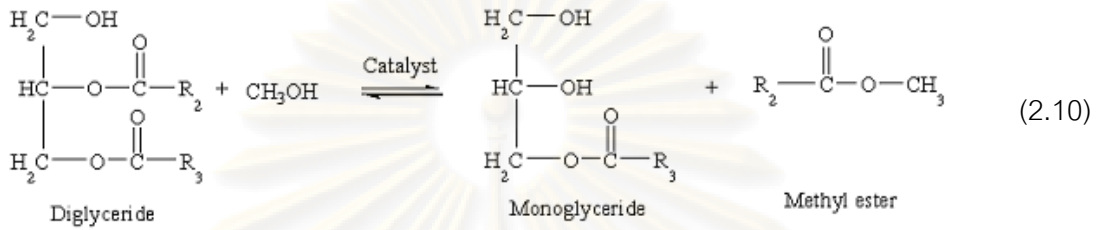
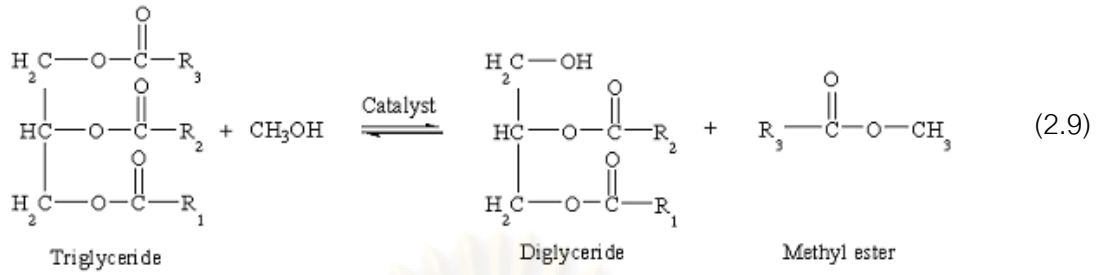
จากที่กล่าวมาในขั้นต้นจะเห็นว่าการใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงหรือผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการต่างๆ ทำให้ได้เชื้อเพลิงที่มีสมบัติคล้ายน้ำมันดีเซลบางส่วน สำหรับวิธีการที่สามารถทำให้ได้เชื้อเพลิงทดแทนจากน้ำมันพืชที่มีสมบัติตรงกับค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานมากที่สุดคือการนำน้ำมันพืชมาผลิตเป็นไบโอดีเซลโดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (transesterification reaction) มีความหมายในเชิงเคมีคือ ปฏิกิริยาการเปลี่ยนหมู่แอลคอกซิล (alkoxyl group, RO-) ของเอสเทอร์ด้วยแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลเล็กกว่า ทำให้ได้กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ หรืออาจเรียกว่า ปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยแอลกอฮอล์ (alcoholysis reaction) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.8



จากปฏิกิริยาพบว่า 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยาพอดีกับ 3 โมลของแอลกอฮอล์ แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ในทางปฏิบัติจึงต้องใช้ปริมาณแอลกอฮอล์ให้มากเกินพอ เพื่อให้สมดุลเลื่อนไปทางขวาทำให้ได้ร้อยละของผลผลิตสูง

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังแสดงในสมการที่ 2.9 2.10 และ 2.11 โดยขั้นตอนแรก ไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเมทานอล เกิดเป็นเมทิลเอสเทอร์กับไดกลีเซอไรด์ ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุด จึงเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยา จากนั้นไดกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยาต่อกับเมทานอลเกิดเป็นเมทิลเอสเทอร์กับโมโนกลีเซอไรด์ ขั้นตอนสุดท้ายโมโนกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยาต่อกับเมทานอลเกิดเป็นเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล

ศูนย์วิจัยทรัพยากรชีวภาพ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



แอลกอฮอล์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลเป็นแอลกอฮอล์โมเลกุลขนาดเล็ก เช่น เมทานอล เอทานอล โพรพานอล และบิวทานอล แต่ที่นิยมใช้คือเมทานอล เนื่องจากขนาดโมเลกุลที่เล็กที่สุด จึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้ง่าย ปฏิกิริยาจึงเกิดได้เร็ว และมีราคาถูก ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดได้ด้วยความดันบรรยากาศ ตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึงจุดเดือดของแอลกอฮอล์ ในภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีทั้งที่เป็นกรด เบสและเอนไซม์ แต่กระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยทั่วไปมักใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสมากกว่าชนิดกรด เนื่องจากสามารถเร่งปฏิกิริยาได้เร็วกว่าและไม่ก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเอนไซม์ แม้ผลิตภัณฑ์แอลคิลเอสเทอร์ที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูงแต่ต้องใช้เวลาในการเร่งปฏิกิริยานานกว่าการใช้กรดและเบสมาก

กระบวนการนี้นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เพื่อปรับปรุงคุณภาพทางเชื้อเพลิงที่พัฒนาจากไตรกลีเซอไรด์ให้ดีขึ้น โดยเฉพาะลดค่าความหนืดของเชื้อเพลิง ในกระบวนการปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ส่วนใหญ่จะใช้แอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น เมทานอล เอทานอล โพรพานอล และบิวทานอล แต่ที่นิยมใช้คือเมทานอล เนื่องจากขนาดโมเลกุลที่เล็กที่สุด จึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้ง่ายทำให้มีอัตราในการทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับแอลกอฮอล์ชนิดอื่นๆ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถเพิ่มอัตราเร็วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาหลายชนิด เช่น กรด เบส หรือเอนไซม์ก็ได้ ซึ่งมีการศึกษากันมาก

นอกจากนี้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันยังเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความดันและอุณหภูมิวิกฤตของแอลกอฮอล์ที่ใช้

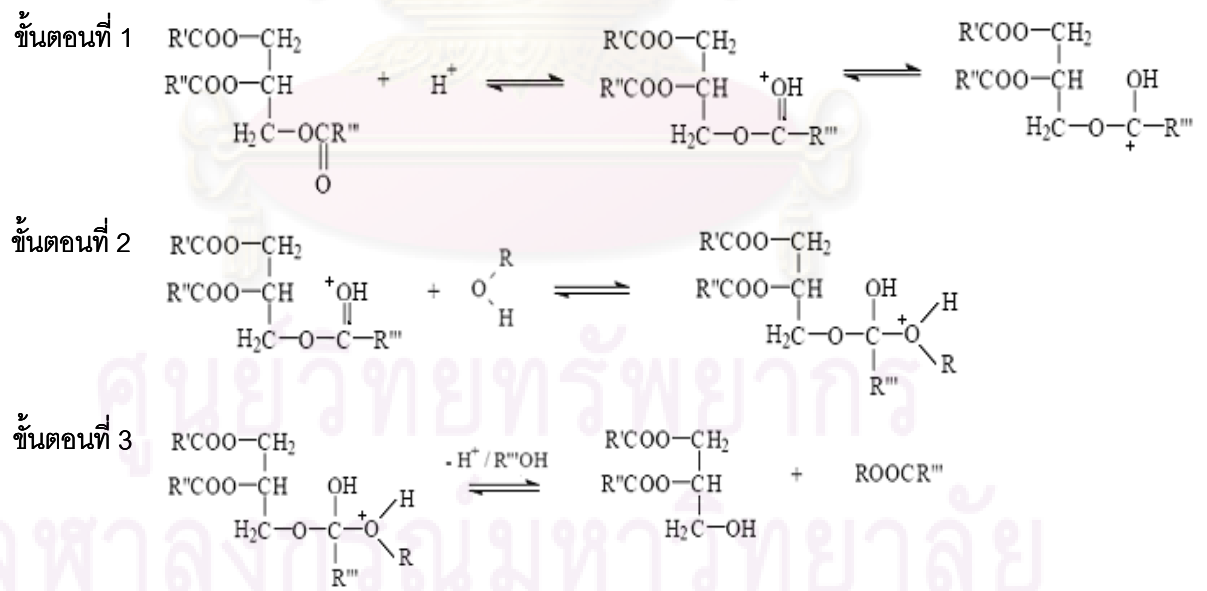
1) กระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

- ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด (acid catalyst) [Schuchardt et al., 1998]

วิธีนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติเป็นกรดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มักจะใช้กัน ได้แก่ กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นต้น

กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.2 ขั้นตอนที่ 1 หมู่คาร์บอนิลของเอสเทอร์จะถูกโปรโตเนตเกิดเป็นคาร์โบแคตไอออน ขั้นตอนที่ 2 แอลกอฮอล์จะเข้ามาทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งคาร์โบแคตไอออนได้เป็น tetrahedral intermediate และขั้นตอนที่ 3 จะเกิดการจัดเรียงโครงสร้างใหม่เป็นเมทิลเอสเทอร์และไดกลีเซอไรด์

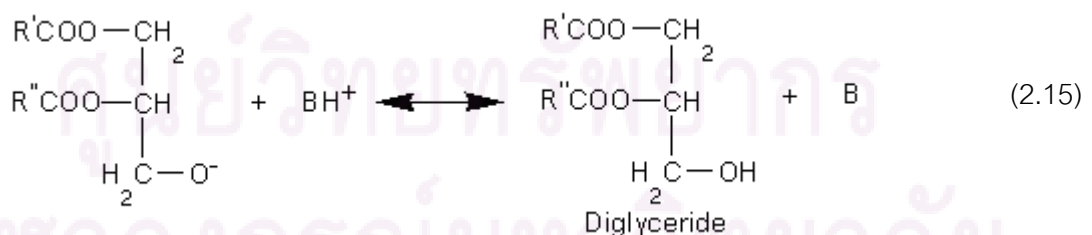
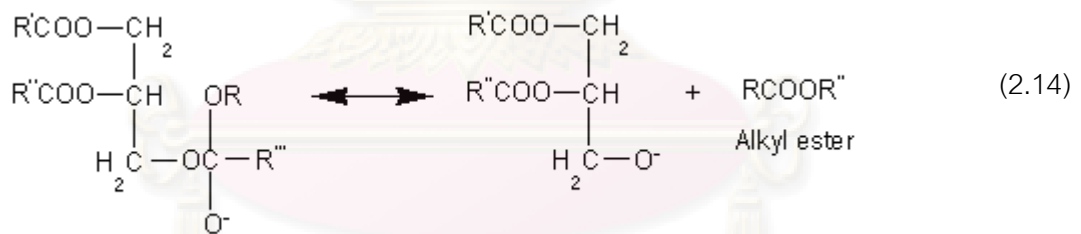
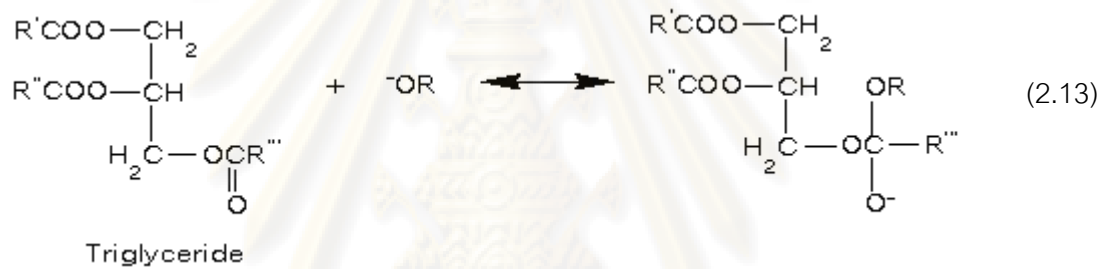
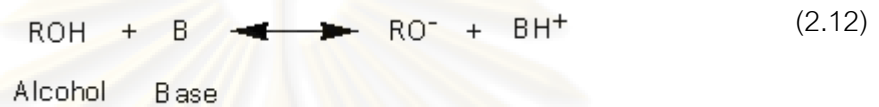
ข้อเสียที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้คือ ต้องใช้เวลานานมากในการทำปฏิกิริยา อีกทั้งการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยายังไม่ค่อยเหมาะสมสำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรมเพราะว่าความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถสร้างความสึกกร่อนต่ออุปกรณ์ต่างๆ ได้มากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส อย่างไรก็ตามการเร่งปฏิกิริยาด้วยกรดใช้ได้กับน้ำมันตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันอิสระหรือน้ำในปริมาณมาก



รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

- ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบส (alkaline catalyst) [Schuchardt et al., 1998]

วิธีนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติเป็นเบส โดยทั่วไปมักจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นต้น โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูก และกลีเซอรอลที่ได้เป็นที่ต้องการของโรงงานกลีเซอรอลมากกว่าด้วย โดยกลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่มีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.3



เมื่อ B คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส

R', R'', R''' คือ สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนของกรดไขมันอิสระ

R คือ หมู่แอลคิลของแอลกอฮอล์

รูปที่ 2.3 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่มีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

- **ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเอนไซม์** [Fukuda et al., 2001, Schuchardt et al., 1998]

เอนไซม์ที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ซิฟิเคชันคือเอนไซม์ไลเปส ซึ่งมีหลายชนิดตามสายพันธุ์ของจุลินทรีย์ที่ทำการสกัด โดยเอนไซม์ไลเปสแต่ละชนิดจะมีสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาต่างกัน กล่าวคือ เอนไซม์ไลเปสชนิด extracellular lipase จะไม่เหมาะสมกับการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ซิฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล (methanolysis) เนื่องจากเมทานอลจะทำให้โปรตีนในเอนไซม์เสื่อมสภาพ แต่หากใช้แอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอนยาวขึ้น เช่น เอทานอล หรือ บิวทานอล จะทำให้อัตราผลได้ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 15.0 เป็น 72.0 และ 86.8 ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง ส่วนเอนไซม์ไลเปสชนิด intracellular lipase ต้องผ่านกระบวนการทำให้เอนไซม์บริสุทธิ์ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ยุ่งยากทำให้เอนไซม์ชนิดนี้มีราคาแพง นอกจากนี้ยังไม่สามารถใช้เร่งปฏิกิริยาได้โดยตรง ต้องผ่านกระบวนการตรึงเอนไซม์บนตัวรองรับ (immobilization) ก่อน แต่ข้อดีคือให้อัตราผลผลิตเอสเทอร์สูงถึงร้อยละ 90 แม้จะมีน้ำในน้ำมันตั้งต้นสูงถึงร้อยละ 20 เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 70 ชั่วโมง โดยข้อดี-ข้อเสียของการเร่งปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์ไลเปสเปรียบเทียบกับ กรด และ เบส แสดงดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีผลิตไบโอดีเซลที่ใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยากับวิธีที่ใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [Fukuda et al., 2001]

| | วิธีผลิตที่ใช้กรดหรือเบสเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา | วิธีผลิตที่ใช้เอนไซม์ (เอนไซม์ ไลเปส) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา |
|---|--|--|
| เวลาในการทำปฏิกิริยา | นาน (1-8 ชม.) | นานมาก (4-80 ชม.) |
| อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา | สูง (ประมาณ 60-70 °C) | ต่ำ (ประมาณ 30-40 °C) |
| การมีกรดไขมันอิสระใน น้ำมันพืชหรือสัตว์ | ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาในทางลบ เมื่อใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา | ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาในทางบวก เพราะกรดไขมันอิสระจะ เปลี่ยนไปเป็นไบโอดีเซล |
| การมีน้ำในน้ำมัน การแยกสารเพื่อทำให้ ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์ | ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาในทางลบ ต้องทำการแยกหลายขั้นตอน | ไม่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยา ไม่ต้องแยกหลายขั้นตอน เหมือนวิธีที่ใช้กรดหรือเบส |
| ราคาของตัวเร่งปฏิกิริยา | ถูก | ค่อนข้างแพง |
| ร้อยละผลได้ของเอสเทอร์ | ปกติ | สูงกว่าวิธีที่ใช้กรดหรือเบส |

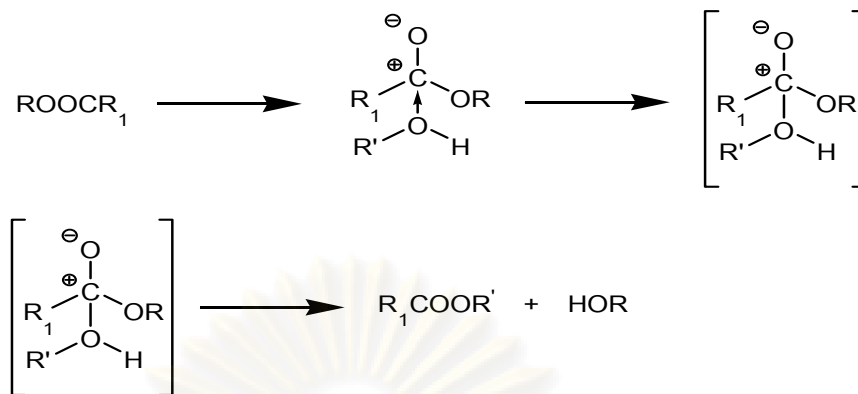
จากตารางพบว่าการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติเด่นกว่า กรด และ เบส หลายประการ เช่น คุณหมุ่มีในการทำปฏิกิริยาต่ำกว่า ไม่มีสบู่เกิดขึ้นแม้ น้ำมันตั้งต้นจะมีน้ำและกรดไขมันอิสระมาก เนื่องจากเอนไซม์ไเลเปสสามารถเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันได้ และยังช่วยลดปริมาณน้ำเสียได้ เนื่องจากไม่ต้องล้างผลิตภัณฑ์ แต่อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานานกว่าการเร่งปฏิกิริยาด้วยกรดและเบสมาก นอกจากนี้แอลกอฮอล์ยังทำให้เอนไซม์เสื่อมสภาพได้ จึงต้องมีการฟื้นฟูสภาพเมื่อใช้เป็นเวลานาน และมีราคาแพง ทำให้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์ยังไม่เป็นที่แพร่หลายในปัจจุบัน

2) กระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้ในภาวะเหนือวิกฤต (supercritical condition) ของแอลกอฮอล์โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แอลกอฮอล์ที่มีรายงานว่าสามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำมันพืชได้ คือ เมทานอล (methanol), เอทานอล (ethanol), 1-โพรพานอล (1-propanol), 1-บิวทานอล (1-butanol) และ 1-ออกทานอล (1-octanol) ซึ่งได้ผลสรุปว่าการเพิ่มอุณหภูมิและปริมาณแอลกอฮอล์จะช่วยให้ได้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่สูงขึ้นในเวลาอันสั้น ส่วนปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระไม่มีผลต่อผลได้ซึ่งแตกต่างจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ก็ลิเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการนี้จะบริสุทธิ์กว่ากระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

กลไกในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยในขั้นตอนแรกโมเลกุลของแอลกอฮอล์ที่อยู่ในภาวะเหนือวิกฤตเข้าไปทำปฏิกิริยาที่คาร์บอนอะตอมของหมู่คาร์บอนิลในไตรกลีเซอไรด์อันเป็นผลมาจากการที่อยู่ในภาวะที่มีความดันสูงดังรูป ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์คือ แอลคิลเอสเทอร์และไดกลีเซอไรด์ออกมา ต่อจากนั้นโมเลกุลของแอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยากับไดกลีเซอไรด์ต่อไปจนสุดท้าย ได้กัลิเซอรอลและ แอลคิลเอสเทอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ROH = diglyceride

R₁ = long chain hydrocarbon

R' = alkyl group

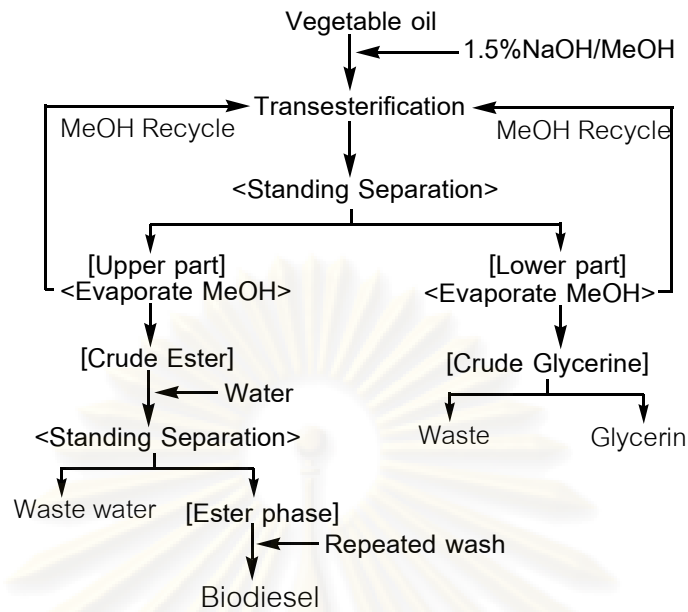
รูปที่ 2.5 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤต [Schuchardt et al., 1998]

2.3.4 การเปรียบเทียบกระบวนการที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

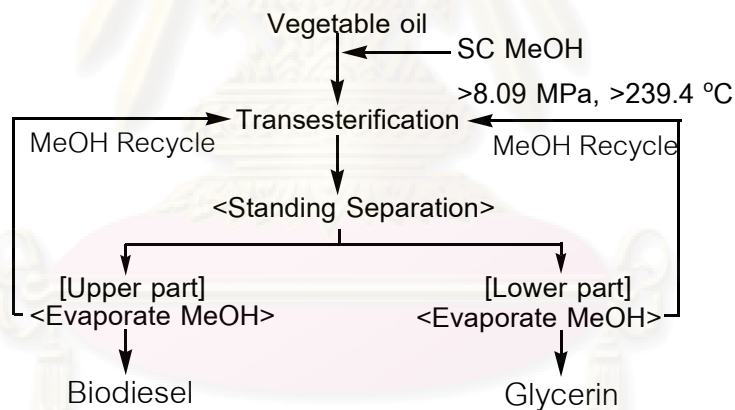
[Saka et al., 2001]

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่ากระบวนการที่ใช้หรือไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างมีข้อดีและข้อเสียที่ต่างกัน แม้ว่ากระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้อุณหภูมิและความดันที่สูงกว่ากระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามาก แต่กระบวนการนี้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาจากปฏิกิริยาข้างเคียงได้ซึ่งช่วยลดขั้นตอนการทำผลิตภัณฑ์และผลพลอยได้ให้บริสุทธิ์ลงได้มาก และทำให้เกิดของเสียออกจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลน้อยลงเช่นกัน ซึ่งแสดงเปรียบเทียบดังแผนภูมिरูปที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 แผนผังแสดงการผลิตไบโอดีเซลจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบส [Saka et al., 2001]



รูปที่ 2.7 แผนผังแสดงการผลิตไบโอดีเซลจากกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา [Saka et al., 2001]

ข้อดีและข้อเสียของการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้แอลกอฮอล์ในภาวะเหนือวิกฤตเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถสรุปและเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการผลิตไบโอดีเซลแบบปกติกับวิธีที่ผลิตโดยใช้ แอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤต [Saka et al., 2001]

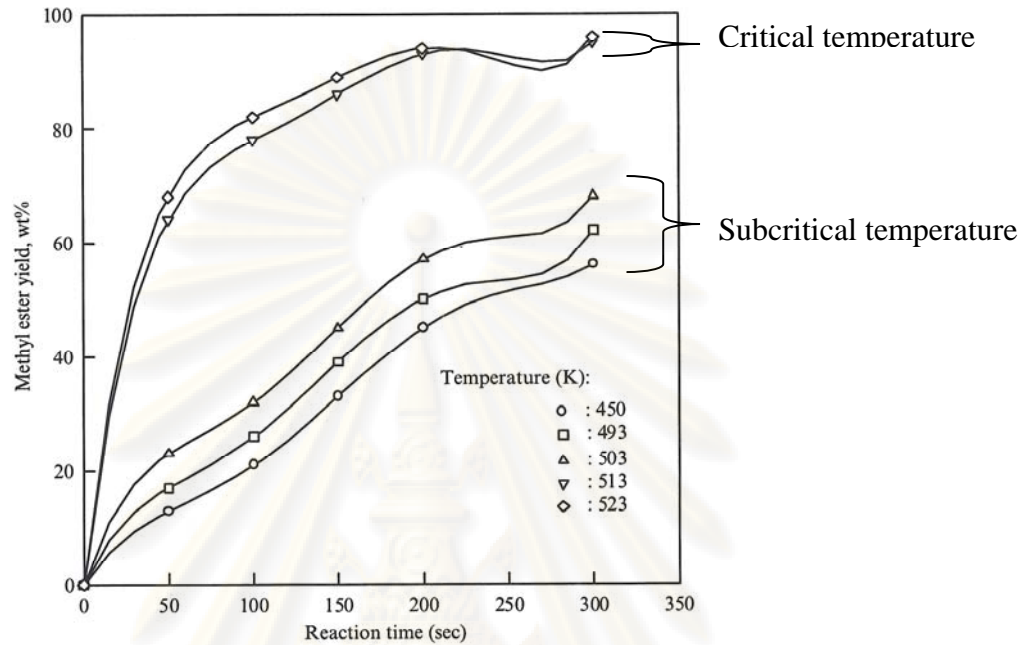
| | วิธีการผลิตแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา | วิธีการผลิตโดยใช้แอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤต |
|--|--|---|
| เวลาในการทำปฏิกิริยา | 1-8 ชั่วโมง | 5-30 นาที |
| การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา | ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา(จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด เบส หรือที่มาจากสิ่งมีชีวิต) | ไม่ต้องใช้ |
| การมีกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชหรือสัตว์ | ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาในทางลบ และในการผลิตโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการเกิดขึ้น | ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาในทางบวก เพราะกรดไขมันอิสระจะเปลี่ยนไปเป็นไบโอดีเซล |
| ผลิตภัณฑ์ที่ได้ | ปกติ | สูงกว่าวิธีปกติ |
| การแยกสารเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์ | ต้องทำการแยกแอลกอฮอล์ตัวเร่งปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการที่เกิดขึ้นออก | ต้องทำการแยกแอลกอฮอล์ออกเพียงอย่างเดียว |
| กระบวนการผลิต | ซับซ้อนและยุ่งยาก | ไม่ซับซ้อน |

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลในแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤต

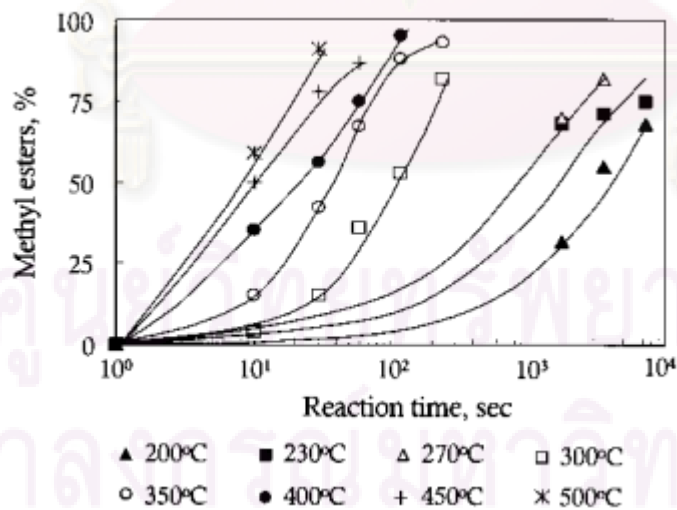
2.4.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้ที่ภาวะเหนือวิกฤต Demirbas และคณะ (2003) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดในของฮาเซลนัทในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิวิกฤตของแอลกอฮอล์ที่ใช้ทำปฏิกิริยา ทำให้ได้ปริมาณไบโอดีเซลมากกว่าการผลิตที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดวิกฤตแสดงดังรูปที่ 2.8 แต่การเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สูงก็ไม่ได้ส่งผลดีเสมอไป Kusdiana และคณะ (2001) รายงานการใช้อุณหภูมิที่สูงมากในการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันเมล็ดเรพในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตซึ่งไม่สามารถทำให้ได้ปริมาณไบโอดีเซลเพิ่ม ทั้งยังทำให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ลดลงดังรูปที่ 2.9 จากรูปเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณไบโอดีเซลมากที่สุด แต่ถ้าอุณหภูมิที่ใช้เกิน 400 องศาเซลเซียส คือ 450 องศาเซลเซียส

และ 500 องศาเซลเซียส กลับได้ปริมาณไบโอดีเซลลดลง สาเหตุมาจากน้ำมันที่ใช้ในการทดลองเกิดการสลายตัวอันเนื่องมาจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.8 ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตจากน้ำมันสาเซลนัทกับเมทานอล อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อแอลกอฮอล์ 1:41 ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน [Demirbas, 2003]

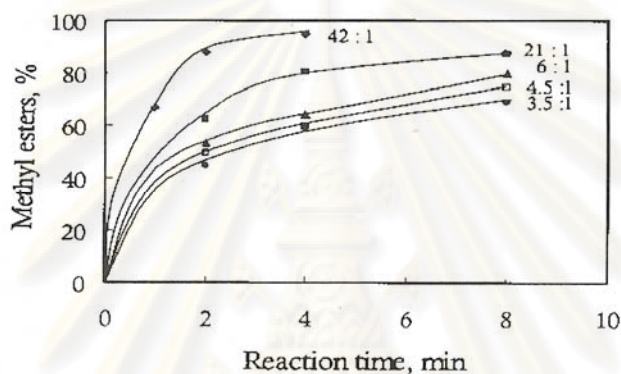


รูปที่ 2.9 ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ

[Kusdiana et al., 2001]

2.4.2 อัตราส่วนน้ำมันพืชหรือไขมันต่อแอลกอฮอล์

อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อแอลกอฮอล์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อแอลกอฮอล์เท่ากับ 1:3 แต่สำหรับการผลิตไบโอดีเซลในแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤต [Kusdiana et al., 2001] พบว่า การใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดเรพที่ 42:1 แสดงดังรูปที่ 2.10 ได้ปริมาณไบโอดีเซลสูงสุด เพราะการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อแอลกอฮอล์ เป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสในการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์และเมทานอล



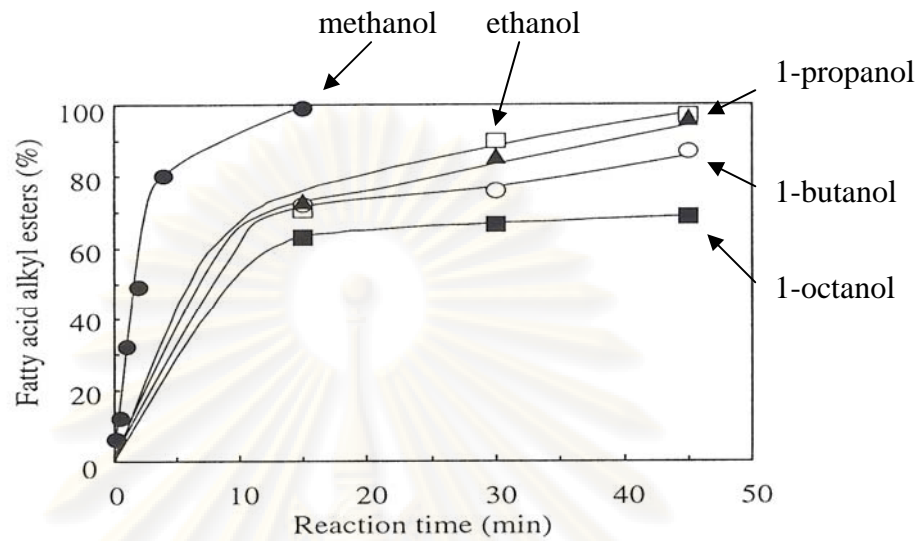
รูปที่ 2.10 ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันเมล็ดเรพต่อเมทานอลต่างๆ กัน [Kusdiana et al., 2001]

2.4.3 ชนิดของแอลกอฮอล์

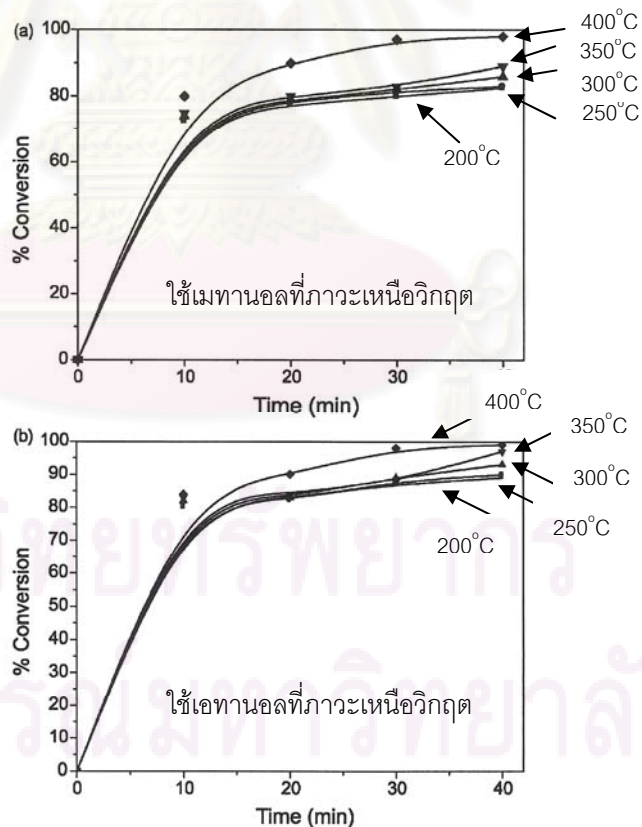
ชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันนั้นก็ก็เป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ส่งผลต่อปริมาณไบโอดีเซล Warabi และคณะ (2004) ศึกษาทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพกับแอลกอฮอล์ 5 ชนิด ได้แก่ เมทานอล เอทานอล 1-โพรพานอล 1-บิวทานอล และ 1-ออกทานอล พบว่า ในบรรดาแอลกอฮอล์ทั้ง 5 ชนิด ได้ปริมาณไบโอดีเซลมากที่สุดเมื่อใช้เมทานอลในการทำปฏิกิริยา แสดงดังรูปที่ 2.11 ส่วนเหตุผลนั้นเป็นเพราะว่าเมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ที่สั้นที่สุดในบรรดาแอลกอฮอล์ทั้ง 5 ชนิดซึ่งแอลกอฮอล์ที่มีสายสั้นมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่ยาว

Madras และคณะ (2004) ค้นพบสิ่งที่แตกต่างไปจาก Warabi และคณะ (2004) โดยพบว่า การใช้เอทานอลในภาวะเหนือวิกฤตจากการผลิตไบโอดีเซลในน้ำมันทานตะวันให้ปริมาณไบโอดีเซลมากกว่าการใช้เมทานอลในภาวะเหนือวิกฤตที่เวลาการทำปฏิกิริยาเท่ากัน ดังรูปที่ 2.12 เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการใช้เมทานอลและเอทานอลในภาวะเหนือวิกฤตแล้ว การใช้เอทานอลในภาวะเหนือวิกฤตให้ ไบโอดีเซลมากกว่าเมทานอลที่ทุกๆ อุณหภูมิ โดย Madras และคณะ

(2004) อธิบายว่า เอทานอลสามารถละลายเข้ากับน้ำมันทานตะวันได้ดีกว่าเมทานอลเพราะค่าการละลาย (solubility parameter) ของเอทานอลและน้ำมันมีค่าใกล้เคียงกัน



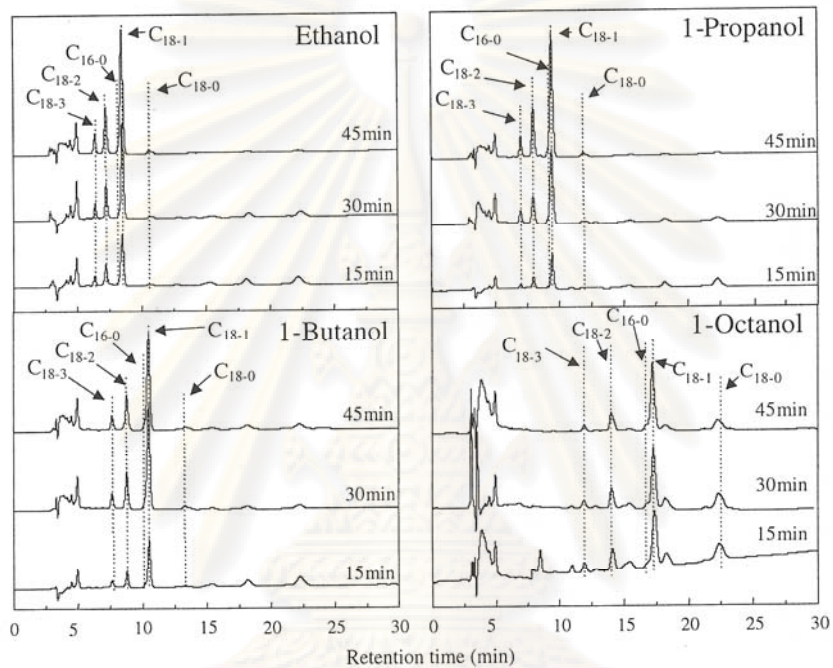
รูปที่ 2.11 ร้อยละแอลคิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ [Warabi et al., 2004]



รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ระหว่างการใช้เมทานอลและเอทานอลในภาวะเหนือวิกฤตที่อุณหภูมิต่างๆ [Madras et al., 2004]

2.4.4 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาสามารถส่งผลต่อปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้เช่นกัน Warabi และคณะ (2004) พบว่า การใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ปริมาณของไบโอดีเซลจะเพิ่มขึ้น จากโครมาโทแกรมของเครื่อง HPLC ดังรูปที่ 2.13 เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันเมล็ดเรพกับแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ในภาวะเหนือวิกฤตให้มากขึ้นจาก 15 นาที ไปเป็น 30 และ 45 นาที โครมาโทแกรมที่แสดงปริมาณแอลคิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น



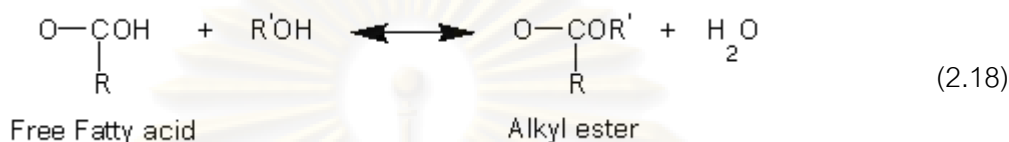
รูปที่ 2.13 โครมาโทแกรมของแอลคิลเอสเทอร์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันเมล็ดเรพกับแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ [Warabi et al., 2004]

2.4.5 เสถียรภาพของภาวะเหนือวิกฤต

เสถียรภาพของภาวะเหนือวิกฤตของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการผลิตสามารถส่งผลต่อปริมาณไบโอดีเซลได้ Kusdiana และคณะ (2001) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต พบว่าความไม่เสถียรของเมทานอลในภาวะเหนือวิกฤตส่งผลให้เมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อย ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.9 อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่ เมทานอลในภาวะเหนือวิกฤตมีความไม่เสถียร มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ใกล้เคียงกับอุณหภูมิต่ำกว่าวิกฤต (อุณหภูมิวิกฤตของเมทานอลอยู่ที่ 239 องศาเซลเซียส) นั่นคืออุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และ 230 องศาเซลเซียส

2.4.6 ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมัน

ปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันมีผลอย่างมากต่อการผลิตไบโอดีเซลที่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส [Kusdiana et al., 2004] แต่ปริมาณของกรดไขมันอิสระจะส่งผลดีต่อการผลิตเมื่อใช้แอลกอฮอล์ในภาวะเหนือวิกฤต เนื่องจากกรดไขมันอิสระสามารถเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับเมทานอลกลายเป็นเมทิลเอสเทอร์ดังสมการที่ 2.18



รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

2.4.7 ปริมาณน้ำในน้ำมัน

ปริมาณน้ำในน้ำมันที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันก็สามารถส่งผลต่อปริมาณไบโอดีเซลได้เช่นเดียวกับกรดไขมันอิสระ [Kusdiana et al., 2004] การมีน้ำในน้ำมันที่ใช้ทำปฏิกิริยาจะยิ่งส่งผลต่อการผลิตไบโอดีเซลเกือบทุกวิธี ยกเว้นการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้แอลกอฮอล์ในภาวะเหนือวิกฤต แต่การที่มีน้ำจะยิ่งทำให้ขั้นตอนในการแยกไบโอดีเซลหลังจากการทำปฏิกิริยาสะควงยิ่งขึ้น นอกจากนี้การใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้ประโยชน์จากน้ำ [Kaieda et al., 1999] ซึ่งมีงานวิจัยพบว่า การเพิ่มปริมาณน้ำสามารถเพิ่มเมทิลเอสเทอร์ได้ถึงร้อยละ 80-90

2.5 กระบวนการผลิต [สมชาย ไชยวรรณ, 2532]

สามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ การผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง และกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ซึ่งแต่ละกระบวนการผลิตจะใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่แตกต่างกัน รายละเอียดของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละกระบวนการผลิตเป็นดังนี้

2.5.1 กระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง

1) เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ อาจเป็นภาชนะรูปถังแบบง่ายๆที่บรรจุสารตั้งต้นและให้เกิดปฏิกิริยาในอัตราเร็วพอสมควรกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ภาชนะดังกล่าวอาจมีฝาปิดแบบง่ายๆเพื่อกันฝุ่นละอองลงไป เรียกว่า หม้อปฏิกิริยา (reaction kettle) ฝาปิดอาจทำอย่างแข็งแรง

ยึดแน่นติดกับตัวเครื่องปฏิกรณ์ ถ้าหากว่าปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นที่ความดันสูงหรือต่ำกว่าบรรยากาศ ในกรณีนี้เรียกภาชนะดังกล่าวว่า หม้อหนึ่ง (autoclave)

เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ส่วนใหญ่มักมีเครื่องกวนอยู่ด้วย ชนิดของเครื่องกวนขึ้นอยู่กับ ความหนืดของของผสม

ปฏิกิริยาเคมีมักเกิดขึ้นควบคู่ไปกับการดูดหรือคายความร้อนออกมา ดังนั้นจะต้องมี วิธีการให้ความร้อนหรือความเย็นกับตัวหม้อปฏิกรณ์หรือหม้อหนึ่ง เพื่อควบคุมอุณหภูมิของของผสมที่ระดับที่ต้องการ การให้ความร้อนกับของผสมในกรณีที่เป็นปฏิกิริยาชนิดดูดความร้อนอาจทำได้โดยการให้ความร้อนผ่านแผ่นความร้อนไฟฟ้า (electric heating pads) หรือ เครื่องให้ความร้อนแบบจุ่มลงในของผสม หรือโดยการให้ผ่านแจคเก็ตไอน้ำ (steam jacket) หรือขดไอน้ำ (steam coil) การให้ความเย็นกับของผสมก็อาจทำได้โดยวิธีคล้ายคลึงกัน

2.5.2 กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง

1) เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้มีลักษณะเป็นท่อ ทำงานอย่างต่อเนื่อง สารตั้งต้นไหลเข้าทางด้าน หนึ่งของเครื่องและผลิตภัณฑ์ไหลออกทางปลายอีกด้านหนึ่ง ลักษณะการไหลเป็นไปในทิศทาง เดียวไม่มีการผสมกันระหว่างของผสมที่ไหลตามกัน ในสถานะคงตัวองค์ประกอบของของผสม ณ จุดใดๆ ตามความยาวของท่อจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา เครื่องปฏิกรณ์อาจมีความยาวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน เช่น สำหรับปฏิกิริยาที่มีความเร็วต่ำอาจจะต้องใช้เครื่องปฏิกรณ์ ยาวมาก เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ขึ้น เครื่องปฏิกรณ์ลักษณะเช่นนี้จึงเหมาะสำหรับปฏิกิริยา ในวัฏภาคแก๊สด้วย ปฏิกิริยาที่มีจำนวนโมลของผลิตภัณฑ์ต่างไปจากสารตั้งต้นหรือมีความหนาแน่น ไม่คงที่ก็เหมาะที่จะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ การให้ความร้อนหรือดึงความร้อนออกจากปฏิกิริยาทำ ได้โดยให้ผ่านผนังท่อ ซึ่งสามารถทำได้ง่ายสำหรับปฏิกิริยาที่ต้องการถ่ายโอนความร้อนที่ตำแหน่ง ต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ไม่เท่ากัน

2) เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้มีรูปร่างเป็นถังรูปทรงกระบอก มีเครื่องกวนติดอยู่ด้านบนโดยแกน ของใบพัดกวนทะลุฝาปิด นอกจากนี้อาจมีอุปกรณ์ช่วยควบคุมอุณหภูมิและความดันด้วย นิยมใช้ สำหรับปฏิกิริยาในวัฏภาคของเหลว ในการใช้งานโดยทั่วไปสารตั้งต้นถูกสูบผ่านเข้าไปในเครื่อง ปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง ส่วนผลิตภัณฑ์จะไหลล้นออกมาทางท่อด้านข้างของเครื่องปฏิกรณ์ ถ้าเครื่องกวนมีประสิทธิภาพดีจะทำให้องค์ประกอบของสารผสมในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากันทุกๆ จุด ซึ่งก็หมายความว่าองค์ประกอบของส่วนที่ไหลล้นออกมามีค่าเท่ากับที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ด้วย

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kusdiana และคณะ (2001) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต โดยกระบวนการแบบแบตช์ (batch process) ซึ่งศึกษาทั้งภาวะต่ำกว่าวิกฤตและเหนือวิกฤต โดยอุณหภูมิอยู่ในช่วง 200-500 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันเมล็ดเรพต่อเมทานอล 1:3.5-1:42 เครื่องปฏิกรณ์ทำด้วยโลหะประเภท Inconel -625 ขนาด 5 มิลลิลิตร ทำงานได้สูงสุด 500 องศาเซลเซียส และ 200 เมกะพาสคัล ในช่วงต่ำกว่าจุดวิกฤตให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์โดยใช้น้ำมัน ส่วนภาวะเหนือวิกฤตใช้อ่างดีบุก (tin bath) ผลการศึกษาอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 19 เมกะพาสคัล เวลา 240 วินาที อัตราส่วนโดยโมล 1:42 ได้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ 95 โดยน้ำหนัก ในขณะที่อัตราส่วนโดยโมล 1:6 และ 1:3.5 เกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ สำหรับผลของอุณหภูมิพบว่าที่อุณหภูมิ 200 และ 230 องศาเซลเซียส ให้อัตราการเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ต่ำ เนื่องจากอยู่ในช่วงต่ำกว่าจุดวิกฤตสภาพความมีขั้วของเมทานอลยังคงสูงอยู่ และอุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ให้อัตราการเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ยังคงต่ำอยู่ ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับเสถียรภาพของภาวะเหนือวิกฤต เพราะอุณหภูมินี้มีความดัน 14 เมกะพาสคัล ซึ่งอยู่ใกล้จุดวิกฤต เป็นไปได้ที่เมทานอลในภาวะนี้ยังมีสภาพความมีขั้วสูงจึงเกิดปฏิกิริยาได้น้อย ในขณะที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียสให้ผลได้สูงถึงร้อยละ 80 และ 95 โดยน้ำหนัก ซึ่งถือเป็นภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง และเพื่อหาค่าคงที่อัตราเร็วได้สมมติให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและกำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอลเป็น 1:42 จากนั้นหาค่าคงที่อัตราเร็วโดยติดตามการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบที่ไม่ใช่เมทิลเอสเทอร์ในแต่ละช่วงเวลา พบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยค่าคงที่อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลิตเมทิลเอสเทอร์ คือ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอล 1:42 เวลาในการทำปฏิกิริยา 240 วินาที

Kusdiana และคณะ (2004) ศึกษาผลของปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต เปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด คือ H_2SO_4 และ เบสคือ NaOH พบว่าปริมาณน้ำและกรดไขมันที่สูงขึ้นไม่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอล แต่ทำให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดลดลง โดยปริมาณน้ำจะมีผลลบต่อตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรดมากกว่าเนื่องจากจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันพืชมากขึ้น ส่วนปริมาณกรดไขมันมีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบสมากกว่าเนื่องจากกรดไขมันจะเกิดปฏิกิริยาแซฟอนิฟิเคชันกับเบส ซึ่งทำให้ตัวเร่ง

ปฏิกิริยาไม่สามารถใช้งานได้ นอกจากนี้พบว่ากระบวนการภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอลที่มีการเพิ่มน้ำลงไปในสารตั้งต้นร้อยละ 5-10 ทำให้ผลิตภัณฑ์แยกชั้นเร็วขึ้น

Warabi และคณะ (2004) ศึกษาความว่องไวของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification reaction) กับกรดไขมัน และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกับน้ำมันจากเมล็ดเรพในภาวะเหนือวิกฤตของแอลกอฮอล์ คือ เมทานอล เอทานอล 1- โพรพานอล 1- บิวทานอล และ 1-ออกทานอล ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ชุดเดียวกับงานวิจัยของ Kusdiana และคณะ (2001) พบว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันว่องไวกว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืช และไม่ขึ้นกับชนิดของกรดไขมัน เนื่องจากกรดไขมันสามารถละลายในแอลกอฮอล์ได้ดีกว่าน้ำมันพืช จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ความว่องไวจะขึ้นกับชนิดของแอลกอฮอล์ ซึ่งเมทานอลจะมีความว่องไวสูงสุด และ 1-ออกทานอลมีความว่องไวน้อยที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะจุดวิกฤตของแอลกอฮอล์โมเลกุลใหญ่มีค่าสูงกว่าแอลกอฮอล์โมเลกุลเล็ก ซึ่งอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 1- ออกทานอลยังอยู่ในภาวะต่ำกว่าวิกฤต

Demirbas (2002) ศึกษาการเตรียมเมทิลเอสเทอร์โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต ใช้น้ำมันพืช 4 ชนิด คือ น้ำมันเมล็ดฝ้าย (cotton seed) น้ำมันเมล็ดในถั่วเฮเซล (hazelnut kernel) น้ำมันเมล็ดดอกคำฝอย (safflower seed) และน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน (sunflower seed) ในกระบวนการแบบแบตช์ ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 100 มิลลิลิตร และให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอลที่เหมาะสม คือ 1:41 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลา 300 วินาที ได้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ 95

Saka และคณะ (2001) ศึกษาการเตรียมไบโอดีเซลในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต โดยกระบวนการแบบแบตช์ ใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 5 มิลลิลิตรทำจากโลหะประเภท Inconel -625 ทำงานได้สูงสุด 200 เมกะพาสคัล และ 550 องศาเซลเซียส โดยใช้เมล็ดเรพ (rapeseed) กับเมทานอล อัตราส่วนโดยโมล 1:42 จากผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอล 1:42 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 19 เมกะพาสคัล เวลา 240 วินาที ได้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ถึง 95 โดยน้ำหนัก

Cao และคณะ (2005) ศึกษาการเตรียมไบโอดีเซลในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตจากน้ำมันถั่วเหลืองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยใช้สารตั้งต้นเป็นน้ำมันถั่วเหลืองปริมาตร 50-70 มิลลิลิตร เมทานอลปริมาตร 60-80 มิลลิลิตร และโพรเพน (propane) เป็นตัวทำละลายร่วม เนื่องจากน้ำมันพืชสามารถละลายได้ดีที่ภาวะเหนือวิกฤตของโพรเพน พบว่า

การเติมตัวทำละลายร่วมทำให้สมบัติวิกฤตของสารผสมในระบบมีค่าลดลง ช่วยทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ง่ายขึ้น อัตราส่วนโดยโมลของโพเพนต่อเมทานอล ต้องมีค่าสูงกว่า 0.05 เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นสมบูรณ์ได้ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอลสูงกว่า 1:24 และอุณหภูมิสูงกว่า 280 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่ากระบวนการที่ไม่มีการเติมตัวทำละลายร่วมถึง 70 องศาเซลเซียส จึงส่งผลให้การใช้พลังงานในการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลเหนือวิกฤตลดลง

Yin และคณะ (2008) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตจากน้ำมันถั่วเหลืองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยมีเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลายร่วม พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 42 อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที กรณีสที่ใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายร่วม ในอัตราส่วนเมทานอลต่อเฮกเซน 2.5 ทำให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์เพิ่มจาก 67.7 เป็น 85.5 ส่วนการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลายร่วม ในอัตราส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเมทานอล 0.2 ทำให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์เพิ่มจาก 67.7 เป็น 90.6 ซึ่งการเติมเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์ช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายระหว่างเมทานอลและน้ำมันได้

Sawangkeaw และคณะ (2007) ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากน้ำมันในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ขนาด 250 มิลลิลิตรและ 5.5 มิลลิลิตร โดยใช้เตตระไฮโดรฟูแรนและเฮกเซนเป็นตัวทำละลายร่วม ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 12-42 อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อตัวทำละลายร่วม 0-5 อุณหภูมิ 290-350 องศาเซลเซียส พบว่า ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ขนาด 250 มิลลิลิตร ปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 42 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ส่วนในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ขนาด 5.5 มิลลิลิตร ปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 42 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที และตัวทำละลายร่วมทั้ง 2 ชนิดไม่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์แต่สามารถลดความหนืดของน้ำมันพืชได้

Bunyakiat และคณะ (2005) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยกระบวนการแบบต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล ทดลองที่อุณหภูมิ 270 300 และ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 19 เมกะพาสคัล อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 6-42 และศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชทั้งสองเพื่อหาค่าคงที่อัตราเร็ว พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลิตเมทิลเอสเทอร์ จากน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มคืออุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืช 42 โดยกรณีสใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสาร

ตั้งต้นได้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ 90 ส่วนน้ำมันเมล็ดในปาล์มได้ได้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ 85 ที่เวลาสเปซ 400 วินาที สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งโดยอัตราเร็วของปฏิกิริยาของน้ำมันพืชทั้งสองเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ โดยเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีสมบัติทางเชื้อเพลิงอยู่ในส่วนกำหนดของมาตรฐานไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลหมุนช้า

He และคณะ (2007) ศึกษาการเตรียมไบโอดีเซลในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตจากน้ำมันถั่วเหลืองโดยกระบวนการแบบต่อเนื่อง จากน้ำมันถั่วเหลืองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อขนาด 75 มิลลิเมตร โดยใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 240-340 องศาเซลเซียส ความดัน 10-40 เมกะพาสคัล อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเป็น 5:1-80:1 residence time 12.5-50 นาที โดยพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนของเมทานอล อุณหภูมิและความดันในปฏิกิริยาทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นและเมื่ออุณหภูมิในปฏิกิริยาสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ทำให้กรดไขมันอิสระที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid methyl ester) เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงเป็นผลให้ร้อยละผลได้มีค่าลดลง และพบว่าภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิต่ำคืออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเป็น 40 residence time 25 นาที ความดัน 35 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 310 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละผลได้เพียง 77 เท่านั้น จึงแก้ปัญหาโดยการให้ความร้อนแบบเป็นลำดับขั้น ซึ่งสามารถลดการสูญเสียของกรดไขมันอิสระที่ไม่อิ่มตัวที่เกิดจากปฏิกิริยาข้างเคียงที่อุณหภูมิสูงได้ ทำให้ได้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีค่ามากกว่า 96

Mangesh และคณะ (2007) ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันคาร์โนลา (canola oil) กับเมทานอลและของผสมระหว่างเมทานอลและเอทานอลที่หลายอัตราส่วนโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 และใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการใช้ของผสมระหว่างแอลกอฮอล์ทั้งสองชนิดสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ดีเท่ากับเอทิลเอสเทอร์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากความสามารถในการละลายของน้ำมันในของผสมในปฏิกิริยาดีกว่า เนื่องจากเอทานอลมีสมบัติตัวทำละลายที่ดีกว่าเมทานอล ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อเอทานอล 3:3 เกิดเอทิลเอสเทอร์ร้อยละห้าสิบของเมทิลเอสเทอร์

เรืองวิทย์ (2004) ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันน้ำมันเมล็ดในปาล์มและน้ำมันมะพร้าวในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลระดับนำร่องที่ช่วงอุณหภูมิ 250-300 องศาเซลเซียส ความดัน 10-15 เมกะพาสคัล โดยใช้เตตระไฮโดรฟูแรนเป็นตัวทำละลายร่วมเพื่อลดความหนืดของน้ำมันพืช อัตราการไหลของสารป้อนคือ น้ำมันพืช เตตระไฮโดร

ฟูแรนและเมทานอลเท่ากับ 0.01-0.03 ,0.06-0.10 และ 0.30-0.70 โมลต่อหน้าที่ตามลำดับ การหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับร้อยละเมทิลเอสเทอร์และสมบัติทางเชื้อเพลิงใช้วิธีออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1} fractional factorial design และ central composite design สมการถดถอยกำลังสองที่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละเมทิลเอสเทอร์กับอุณหภูมิที่ภาวะเหมาะสมได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 70 ± 5 ที่อุณหภูมิช่วง 300-350 องศาเซลเซียส ความดันช่วง 10-15 เมกะพาสคัล และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชมากกว่า 12 อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์สูงสุด 0.03 ± 0.005 โมลต่อหน้าที่ เมื่อเปรียบเทียบภาวะการทดลองงานวิจัยกับภาวะการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการที่งานวิจัยนี้นำข้อมูลมาขยายขนาด พบว่าที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 12 เทียบกับ 24 ได้เวลาสเปซเท่ากับ 600 วินาที เทียบกับ 400 วินาที ตามลำดับ แต่ผลิตภัณฑ์ของงานวิจัยนี้มีร้อยละความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ต่ำกว่า ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการขยายขนาดหรือตัวทำละลายรวม

Meei และคณะ (2009) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง โดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 20-30 นาที อัตราส่วนโดยโมลเอทานอลต่อน้ำมันพืช 5-50 และทำการหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโดยใช้ response surface methodology ควบคู่ไปกับ central composite design จากผลการทดลองที่ได้พบว่าภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการนี้คือ อุณหภูมิ 349 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที อัตราส่วนโดยโมลเอทานอลต่อน้ำมันพืช 33 ซึ่งได้ไบโอดีเซลร้อยละ 79.2

Bera และคณะ (2006) ได้ทำการทดลองสกัดน้ำมันที่กินได้จากเมล็ดบาฮีรา (bahera seed) และ เมล็ดเฟลกซ์ (flax seed) โดยใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ และตัวทำละลายผสมอะซิโโทโรพชนิดต่างๆ จากการทดลองพบว่าตัวทำละลายชนิดโปรติก ได้แก่ เมทานอล เอทานอล ไอโซโพรพานอล เอทิลอะซิเตต และของผสมของเอทานอลกับเอทิลอะซิเตต สามารถสกัดน้ำมันได้น้ำมันที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การสกัดน้ำมันโดยใช้ตัวทำละลายชนิดอะโปรติก โดยอุณหภูมิมีผลต่อการสกัดน้ำมัน และคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมัน เช่น ดัชนีการหักเห ความหนาแน่น แชนพอนิฟิเคชัน และค่าของกรด ถูกพบว่าส่งผลต่อการเลือกใช้ตัวทำละลายในกระบวนการสกัดน้ำมัน

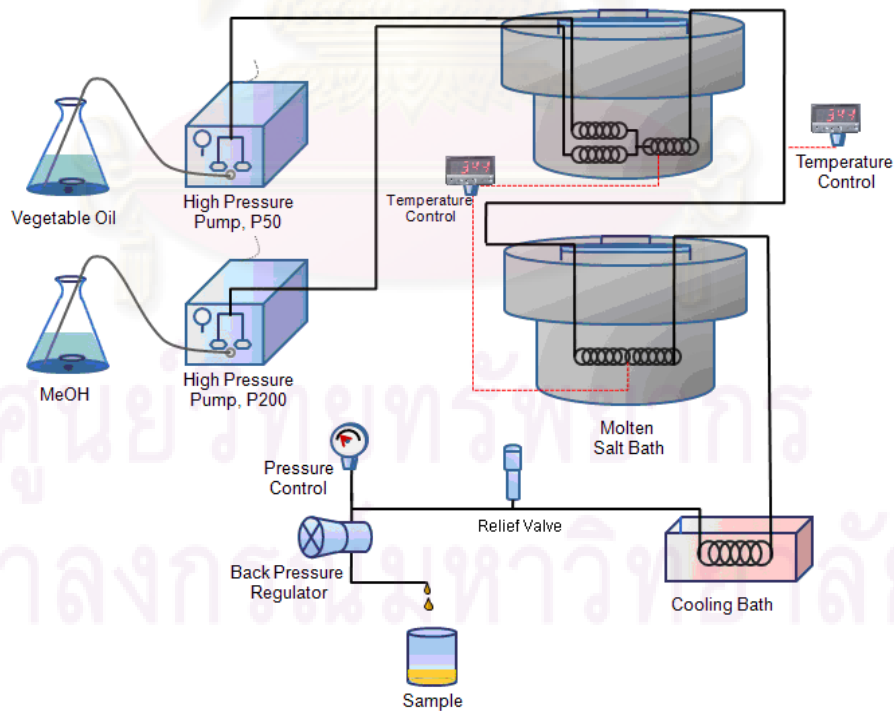
บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องในเมทานอลและไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤต และศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละเอสเทอร์ พร้อมทั้งทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงของเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากภาวะที่เหมาะสม

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันพืชเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (tubular flow reactor) ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้บรรจุอยู่ในถัง 2 ใบ ถังที่หนึ่งมีท่อขดอยู่ยาว 65 เมตร ถังที่สองมีท่อขดอยู่ยาว 30 เมตร ให้ความร้อนโดยใช้เกลือหลอมเหลว สามารถควบคุมอุณหภูมิแต่ละถังได้อย่างอิสระ ทำให้สามารถกำหนดอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้เท่ากันหรือไม่เท่ากันระหว่างถังทั้งสองได้ โดยประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง

3.1.1 ปั๊มแรงดันสูง (High Pressure Pump)



รูปที่ 3.2 ปั๊มแรงดันสูง

ปั๊มแรงดันสูงจากบริษัท Thar Technology รุ่น P50 และ P200 ซึ่งสามารถทำความดันสูงสุดได้ 600 บรรยากาศ เท่ากัน แต่รุ่น P50 สามารถตั้งค่าการป้อนของเหลวได้สูงสุด 50 กรัมต่อนาที ส่วนรุ่น P200 สามารถป้อนได้ 200 กรัมต่อนาที อัตราการไหลสูงสุดดังกล่าวเป็นอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวซึ่งมีความหนืดต่ำกว่าน้ำมันพืชและเมทานอลมาก ดังนั้นก่อนทำการทดลองจึงต้องมีการเทียบมาตรฐาน (Calibration) อัตราการไหลของน้ำมันพืชและเมทานอลทุกครั้ง

3.1.2 อ่างเกลือหลอมเหลว (Nitrate/Nitrite Molten Salt Bath)



รูปที่ 3.3 อ่างเกลือหลอมเหลว

ถังและฝาปิดทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 304 หนา 1 มิลลิเมตร โดยถังมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 30 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร แต่ถังให้ความร้อนด้วยเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าแบบทรงกระบอกหุ้มเซรามิกสูง 20 เซนติเมตร จากภายนอก โดยต่อกับชุดควบคุมอุณหภูมิจากบริษัท Sigma Co., Ltd. รุ่น SF48 และหุ้มฉนวนทำจากเส้นใยเซรามิกหนา 10 เซนติเมตร



รูปที่ 3.4 เครื่องทำความร้อนไฟฟ้าแบบทรงกระบอกหุ้มเซรามิก

ภายในอ่างบรรจุเกลือ 3 ชนิด คือโซเดียมไนเตรต (NaNO_3) โซเดียมไนไตรต์ (NaNO_2) โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) ผสมกันด้วยอัตราส่วน 1 : 5 : 6 โดยน้ำหนัก แต่ละถังมีเกลือน้ำหนักรวม 24 กิโลกรัม ขณะที่ใช้เกลือหลอมเหลวมีการผ่านอากาศเข้าทางด้านล่างเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศช่วยทำให้เกลือหลอมเหลวหมุนเวียนส่งผลให้อุณหภูมิภายในถังใกล้เคียงกัน โดยมีเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) จำนวน 2 ชุด วัดอุณหภูมิที่เครื่องทำความร้อนและภายในอ่างเกลือหลอมเหลวตลอดเวลา



รูปที่ 3.5 เกลือผสมของโซเดียมไนเตรต โซเดียมไนไตรต์ และโพแทสเซียมไนเตรต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.3 ชุดทำให้อุ่นล่วงหน้าและเครื่องปฏิกรณ์ (Preheater and Reactor)



รูปที่ 3.6 ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 316 ขนาด $\frac{1}{8}$ นิ้ว

ชุดทำให้อุ่นล่วงหน้าทำจากท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel Tube) เบอร์ 316 เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก $\frac{1}{8}$ นิ้ว หนา 0.028 นิ้ว ทนแรงดันได้สูงสุด 8,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ยาว 5.0 เมตร ซึ่งมีสองชุดสำหรับน้ำมันพืชและเมทานอล

เครื่องปฏิกรณ์ทำจากท่อเหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 316 เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก $\frac{1}{8}$ นิ้ว หนา 0.028 นิ้ว ทนแรงดันได้สูงสุด 8,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยในถังที่หนึ่งมีท่อขดอยู่ยาว 60.0 เมตร และถังที่สองมีท่อขดอยู่ยาว 30.0 เมตร ซึ่งมีปริมาตรรวมทั้งหมด 217 มิลลิลิตร

ชุดทำให้อุ่นล่วงหน้าและเครื่องปฏิกรณ์ถูกจุ่มอยู่ในอ่างเกลือหลอมเหลว โดยด้านทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งต่อกับชุดทำให้อุ่นล่วงหน้าทั้งสองชุดมีเทอร์โมคัปเปิล เพื่อวัดอุณหภูมิของสารป้อนขณะผสมกัน โดยอุปกรณ์ทั้งหมดต่อกันด้วยข้อต่อสี่ทาง (Union Cross)

3.1.4 อุปกรณ์หล่อเย็น (Cooling Bath)



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์หล่อเย็น

อุปกรณ์หล่อเย็นทำจากท่อเหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 316 ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก $\frac{1}{8}$ นิ้ว หนา 0.028 นิ้ว ยาว 3.0 เมตร โดยแช่อยู่ในอ่างน้ำเย็น เพื่อหยุดปฏิกิริยาและควบแน่นตัวทำละลายไม่ให้กลายเป็นไอเมื่อออกมาที่ความดันบรรยากาศ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันอันตรายที่อาจเกิดกับตัวกรอง ตัวแปลงสัญญาณค่าความดันและตัวควบคุมค่าความดันซึ่งอยู่ถัดจากอุปกรณ์หล่อเย็นเนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้ไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้

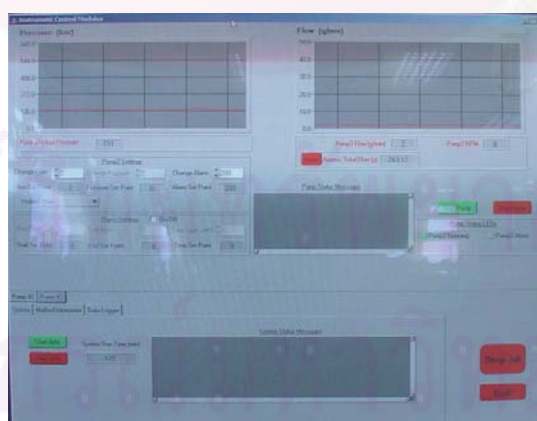
3.1.5 ตัวควบคุมค่าความดัน (Back Pressure Regulator)



รูปที่ 3.8 ตัวควบคุมค่าความดัน

ตัวควบคุมค่าความดันจากบริษัท Go-regulator Co., Ltd. รุ่น BP-66 สามารถควบคุมความดันในระบบให้อยู่ในช่วง 1 – 414 บรรยากาศ

3.1.6 ตัวแปลงสัญญาณค่าความดันและจอภาพ (Pressure Transducer and Monitor)



รูปที่ 3.9 จอภาพแสดงผลการวัดความดัน

ตัวแปลงสัญญาณค่าความดันจากบริษัท Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น รุ่น PGM – 500 KE โดยต่อกับจอภาพจากบริษัท Hengstler Process Indicator Co., Ltd. รุ่น 0735A60000 ซึ่งแสดงผลการวัดความดันออกมาในหน่วย บรรยากาศ

3.1.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas Chromatograph, GC)



รูปที่ 3.10 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟที่ใช้วัดร้อยละเมทิลเอสเทอร์และไอโซโพรพิลเอสเทอร์จากบริษัท Shimadzu จำกัด รุ่น GC-14 B SPL ประกอบกับ เครื่องฉีดตัวอย่างอัตโนมัติ (Auto injector) รุ่น AOC-17 โดยใช้ Capillary column รุ่น DB – Wax จากบริษัท Phenomenex จำกัด ขนาด 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร ซึ่งใช้ Polyethylene glycol (PEG) หนา 0.25 ไมโครเมตรเป็นวัฏภาคนิ่ง (Stationary phase) ซึ่งสามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิ 20 – 250 องศาเซลเซียส โดยใช้ FID (Flame Ionization Detector) เป็นดีเทคเตอร์ โดยภาวะในการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.1 สำหรับการหาร้อยละเมทิลเอสเทอร์และไอโซโพรพิลเอสเทอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

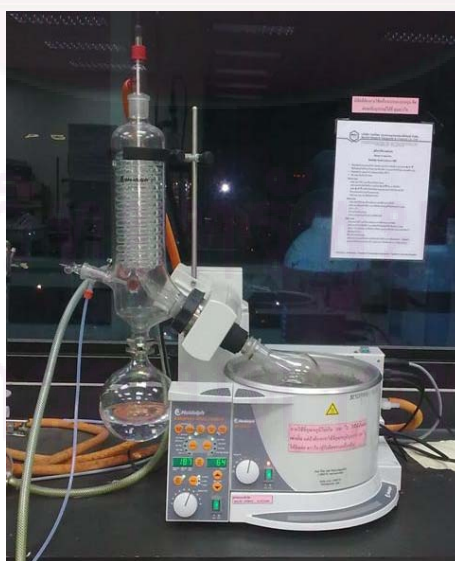
ตารางที่ 3.1 ภาวะในการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์

| Condition | Value |
|-------------------------------------|----------------------|
| Carrier Gas (He) Flow rate | 1.0 mL/min |
| Make Up Gas (He) Pressure | 80 kPa |
| Hydrogen and Air Pressure (for FID) | 60 and 10 kPa |
| Detector Temperature | 250 °C |
| Spilt Ratio | 1 : 20 |
| Injection Temperature | 250 °C |
| Inject Volume | 0.2 μ L |
| Column Initial Temperature | 180 °C |
| Temperature Program Rate | 10 °C/min hold 5 min |
| Column Final Temperature | 200 °C |

โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.1 ใช้วิเคราะห์เฉพาะเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอน C8:0-C18:2 และไม่สามารถวิเคราะห์เอสเทอร์ของกรดไขมันที่มีคาร์บอนสูงกว่า C18 ได้ เนื่องจากข้อจำกัดของข้อกำหนดในการใช้อุณหภูมิสูงสุดของคอลัมน์

3.1.8 เครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary Evaporator)

เครื่องระเหยแบบหมุน ยี่ห้อ Heidolph รุ่น Labarota 4003 แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องระเหยแบบหมุน

3.1.9 เครื่องวัดค่าความร้อน (Heating value)

ค่าความร้อน วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Parr Model 1341 Bomb Calorimeter เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณความร้อนของสารอินทรีย์ที่เกิดจากการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งเป็นการวัดปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบปิดไม่สูญเสียความร้อน (adiabatic) วัดอุณหภูมิด้วยเทอร์มิสเตอร์ที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.0001°C แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่อง Bomb Calorimeter model 1341

3.1.10 เครื่องวัดความหนืด (Viscometer)

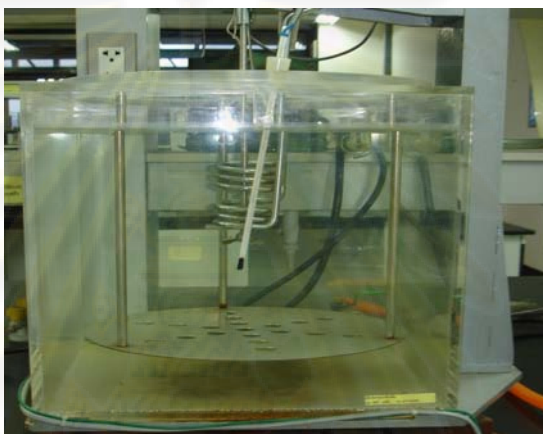
เครื่องวัดความหนืด ใช้หลักการวัดความหนืดด้วย Capillary Viscometer เป็นเครื่องวัดความหนืดที่วัดโดยให้ตัวอย่างไหลผ่าน Capillary และจับเวลาการไหลจากขีดด้านบนของหลอด capillary เหนือกระเปาะลงจนถึงขีดล่างของกระเปาะ ระหว่างจุดที่ 1 และจุดที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่องวัดความหนืด

3.1.11 เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ API (API Gravity)

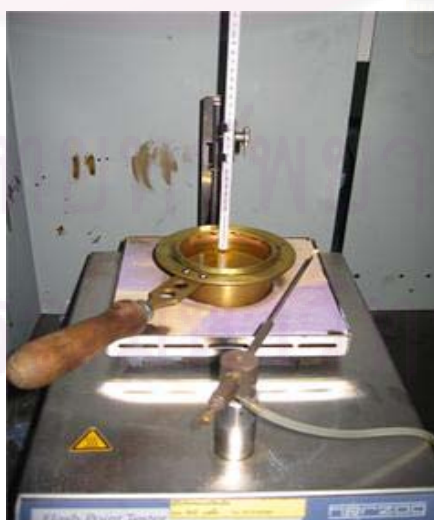
เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ API การวัดค่าความถ่วง เอ พี ไอ (API Gravity) โดยวิธีไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Method) ครอบคลุมถึงการหาค่าความหนาแน่น (Density) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และความถ่วง เอ พี ไอ ของน้ำมันดิบ ผลิตภัณฑ์น้ำมันปิโตรเลียม และรวมถึงส่วนผสมของปิโตรเลียมกับของเหลวที่ไม่ใช่ปิโตรเลียม โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่าไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) และค่าที่ได้จากระบบหนึ่งระบบใดจากในสามระบบนี้สามารถเปลี่ยนแปลงกลับไปยังอีกสองระบบที่เหลือได้



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ

3.1.10 เครื่องวิเคราะห์จุดวาบไฟ

เครื่องวิเคราะห์จุดวาบไฟ แบบ Pensky Martens opened Cup Tester วิธีทดสอบของเหลวที่มีจุดวาบไฟ (Flash point) วัดโดยเครื่องมือ Pensky Martens opened Cup tester



รูปที่ 3.15 เครื่องวิเคราะห์จุดวาบไฟ

3.2 สารที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil)
3. น้ำมันปาล์มโอเลอินเกรดบริโภค (Olein palm oil)
4. เมทานอล (Methanol commercial grade, 98.0%)
5. ไอโซโพรพานอล (Isopropanol commercial grade, 99.5%)
6. Methyl heptadecanoate ($C_{18}H_{36}O_2$ 95%): ACROS Organics

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

3.3.1 วิเคราะห์สมบัติสารตั้งต้นประกอบด้วย

- จุดวาบไฟ (Flash Point) ตามมาตรฐาน ASTM D 93
- ค่าความหนืด (Kinematics Viscosity) ตามมาตรฐาน ASTM D 445
- ค่าความร้อน (Heating Value) ตามมาตรฐาน ASTM D 240
- ความถ่วงจำเพาะ API (API Gravity) ตามมาตรฐาน ASTM D 2052
- ค่าดัชนีซีเทน (Cetane Index) ตามมาตรฐาน ASTM D 976 ซึ่งใช้ค่าความถ่วงจำเพาะ API และค่าอุณหภูมิการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D 2052 และ D2887 ตามลำดับ
- ค่ากรด (Acid Value) ตามมาตรฐาน AOCS Cd – 3D-63
- ชนิดและปริมาณกรดไขมัน (fatty acid composition) ตามมาตรฐาน AOCS Ce-2-66 (ส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์วิทยาศาสตร์ฮาลาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.3.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยส่วนแรกเป็นการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ เพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่ให้เหลือน้อยลง โดยวิเคราะห์ผลการทดลองใช้โปรแกรม Design Expert เวอร์ชัน 6.0.10 โดยปัจจัยที่นำมาศึกษาในการทดลองเบื้องต้นของการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลและไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤต คือ อุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันพืชต่อเมทานอลและปริมาณไอโซโพรพานอล โดยตารางที่ 3.2 และ 3.3 แสดงปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียล และค่ากลาง

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของการทดลองเบื้องต้นของการออกแบบการทดลองสำหรับการศึกษาการผลิตไบโอดีเซล

| Factor | Low Level (-) | High Level (+) |
|--|---------------|----------------|
| อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), A | 280 | 350 |
| ความดัน (เมกะพาสคัล), B | 20 | 35 |
| อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช, C | 24 | 42 |
| ปริมาณไอโซโพรพานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก), D | 0 | 50 |

ตารางที่ 3.3 การออกแบบแบบ 2^4 แฟกทอเรียล และค่ากลางของการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลและไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤต

| Run order | Factorial Design | Factor | | | |
|-----------|------------------|------------------|----------------|--------------------------------|---------------------|
| | | Temperature (°C) | Pressure (MPa) | Molar ratio of Methanol to oil | Isopropanol (% wt.) |
| 1 | (1) | 280 | 20 | 24 | 0 |
| 2 | a | 350 | 20 | 24 | 0 |
| 3 | b | 280 | 35 | 24 | 0 |
| 4 | ab | 350 | 35 | 24 | 0 |
| 5 | c | 280 | 20 | 24 | 0 |
| 6 | ac | 350 | 20 | 24 | 0 |
| 7 | bc | 280 | 35 | 42 | 0 |
| 8 | abc | 350 | 35 | 42 | 0 |
| 9 | d | 280 | 20 | 24 | 50 |
| 10 | ad | 350 | 20 | 24 | 50 |
| 11 | bd | 280 | 35 | 24 | 50 |
| 12 | abd | 350 | 35 | 24 | 50 |
| 13 | cd | 280 | 20 | 42 | 50 |
| 14 | acd | 350 | 20 | 42 | 50 |
| 15 | bcd | 280 | 35 | 42 | 50 |
| 16 | abcd | 350 | 35 | 42 | 50 |
| 17 | - | 315 | 27.5 | 33 | 25 |

ตารางที่ 3.3 การออกแบบแบบ 2^4 แฟกทอเรียล และค่ากลางของการผลิตไบโอดีเซลใน เมทานอลและไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤต

| Run order | Factorial Design | Factor | | | |
|-----------|------------------|------------------|----------------|--------------------------------|---------------------|
| | | Temperature (°C) | Pressure (MPa) | Molar ratio of Methanol to oil | Isopropanol (% wt.) |
| 18 | - | 315 | 27.5 | 33 | 25 |
| 19 | - | 315 | 27.5 | 33 | 25 |
| 20 | - | 315 | 27.5 | 33 | 25 |

3.4 การดำเนินการทดลอง

3.4.1 ผสมน้ำมันพืชและไอโซโพรพานอลในอัตราส่วนที่กำหนดในส่วนการออกแบบการทดลอง (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ก.) และให้ความร้อนกับเกลือหลอมเหลวจนกระทั่งได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ โดยดูจากอุณหภูมิภายในอ่างเกลือหลอมเหลวควบคู่กับเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล

3.4.2 เมื่ออุณหภูมิได้ตามที่กำหนดจึงป้อนน้ำมันพืชผสมไอโซโพรพานอลและเมทานอลด้วยอัตราส่วนโดยโมลที่กำหนดโดยให้อัตราการไหลรวมขาเข้าของสารทั้งสามชนิดทั้งหมดมีค่าประมาณ 5 กรัมต่อนาที ทุกการทดลอง

3.4.3 เมื่ออัตราการไหลรวมของสารทั้งสามชนิด ทางขาออกมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการไหลทางขาเข้า หมุนวาล์วปรับค่าความดันเพื่อเพิ่มความดันของระบบ เมื่อความดันของระบบคงที่จึงปล่อยให้ระบบอยู่ในสถานะคงตัว (steady state) เวลาประมาณหนึ่งชั่วโมงครึ่ง หลังจากนั้นจึงทำการเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 15 นาที ทุกการทดลอง ทำให้ได้ตัวอย่างปริมาตรประมาณ 30 มิลลิลิตร

3.4.5 นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งหมดไปชั่งน้ำหนักก่อนนำมาระเหยเมทานอลกับไอโซโพรพานอลออกด้วยเครื่องระเหยแบบหมุน แล้วนำไปหาปริมาณเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีต่อไป

3.5 การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์

การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) ยี่ห้อ Shimadzu จำกัด รุ่น GC-14 B SPL ซึ่งภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.1 เนื่องจากน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มโอเลอิน มีปริมาณองค์ประกอบกรดไขมันโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกัน

การทำ Calibration curve ของเมทิลเอสเทอร์จึงใช้สารมาตรฐาน ซึ่งมีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ เทียบเคียงกับปริมาณองค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันทั้งสองชนิด โดยการหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ใช้วิธีวิเคราะห์แบบ Internal standard ซึ่งใช้ methyl heptadecanoate ($C_{18}H_{36}O_2$) เป็น Internal standard และใช้นอร์มอลเฮปเทน ($n-C_7H_{16}$) เป็นตัวทำละลาย ตัวอย่างโครมาโทแกรม ที่ได้ แสดงในภาคผนวก ค

3.6 การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิง

ไบโอดีเซลที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมนำมาวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงดังต่อไปนี้ ซึ่ง รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข

1. ค่าความหนืด (Kinematics Viscosity) ตามมาตรฐาน ASTM D 445
2. ค่าความร้อน (Heating Value) ตามมาตรฐาน ASTM D 240
3. ความถ่วงจำเพาะ API (API Gravity) ตามมาตรฐาน ASTM D 2052
4. ค่าดัชนีซีเทน (Cetane Index) ตามมาตรฐาน ASTM D 976 ซึ่งใช้ค่าความถ่วงจำเพาะ API และค่าอุณหภูมิการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D 2052 และ D 2887 ตามลำดับ
5. จุดวาบไฟ (Flash Point) ตามมาตรฐาน ASTM D 93

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลขนาดห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอินและน้ำมันปาล์มดิบในเมทานอลและไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤต เริ่มจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ (2^k factorial design) คือ ระดับสูงและระดับต่ำ ตัวแปรที่นำมาศึกษา ได้แก่

- 1) อุณหภูมิ (280-350 องศาเซลเซียส)
- 2) ความดัน (20-35 เมกะพาสคัล)
- 3) อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน (24:1-42:1)
- 4) ปริมาณไอโซโพรพานอล (0-50 %wt./wt._{oil})

ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับสามารถแสดงผลกระทบที่มีนัยสำคัญของตัวแปรแต่ละตัวต่อค่าร้อยละเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ (% ester content) ซึ่งถือเป็นผลตอบสนอง (respond) ที่ใช้ทดลองงานวิจัยนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันพืชและน้ำมันดีเซล

4.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี

น้ำมันพืชที่นำมาศึกษา คือ น้ำมันปาล์มโอเลอิน (olein palm oil, OPO) และน้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil, CPO) ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันพืชเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ได้แก่ Kinematic Viscosity, °API Gravity, Cetane Index, Flash Point, Heating Value และ Acid Value ตามมาตรฐาน ASTM D 445, ASTM D 2052, ASTM D 976, ASTM D 93, ASTM D 240 และ AOCS Cd – 3D-63 ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 สมบัติของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มโอเลอินเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

| Properties | High speed Diesel | Low speed Diesel | Olein palm oil | Crude palm oil |
|---|-------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Kinematic Viscosity at 40 °C (mm ² /s) | 4.10 | 5.32 | 51.62 | 56.08 |
| °API Gravity | 33.20 | 26.11 | 24.85 | 24.32 |
| Cetane Index | 54.24 | 46.24 | 34.30 | 32.00 |
| Flash Point (°C) | 75.00 | 78.00 | 217.00 | 210.00 |
| Heating Value (MJ/kg) | 43.70 | 42.10 | 32.40 | 33.50 |
| Acid Value (g I ₂ /100 g oil) | - | - | 0.69 | 11.34 |

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าน้ำมันปาล์มโอเลอินและน้ำมันปาล์มดิบมีสมบัติทางเชื้อเพลิงทางกายภาพและทางเคมีใกล้เคียงกันแต่เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืชทั้งสองกับน้ำมันดีเซลพบว่า ด้อยกว่าน้ำมันดีเซลเนื่องจากมีดัชนีซีเทน และค่าความร้อนต่ำกว่า ยกเว้นจุดวาบไฟที่มีค่าสูงกว่าซึ่งถือเป็นข้อได้เปรียบในเรื่องความปลอดภัยในการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามตามความหนืดของน้ำมันพืชมีค่าสูงกว่ามาตรฐานมาก แสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำมันพืชตัวอย่างทั้งสองเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงจะก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์

4.1.2 ชนิดและปริมาณองค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันพืชตัวอย่าง

การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณองค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันพืชตัวอย่างทั้งสองตามมาตรฐาน AOCS Ce-2-66 ที่ศูนย์วิทยาศาสตร์ฮาลาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ชนิดและองค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันพืชตัวอย่าง

| Fatty acid | Carbon Number | Degree of Unsaturation | MW | OPO | CPO |
|--------------------------|---------------|------------------------|-----|-------|-------|
| | | | | % wt. | % wt. |
| Lauric acid | 12 | 0 | 200 | 0.20 | 0.19 |
| Myristic acid | 14 | 0 | 228 | 0.78 | 0.80 |
| Palmitic acid | 16 | 0 | 256 | 40.81 | 44.14 |
| Stearic acid | 18 | 0 | 284 | 2.08 | 3.49 |
| Oleic acid | 18 | 1 | 282 | 46.70 | 41.53 |
| Linoleic acid | 18 | 2 | 280 | 9.20 | 9.65 |
| Linolenic acid | 18 | 3 | 278 | 0.23 | 0.20 |
| Total | | | | 100 | 100 |
| Average Molecular weight | | | | 850 | 847 |

จากตารางที่ 4.2 น้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มโอเลอิน มีองค์ประกอบของกรดปาล์มิติก (C16:0) และ กรดโอเลอิก (C18:1) รวมร้อยละ 85.67 และ 87.51 ตามลำดับ และสามารถคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันปาล์มดิบได้เท่ากับ 847 และน้ำมันปาล์มโอเลอินได้เท่ากับ 850

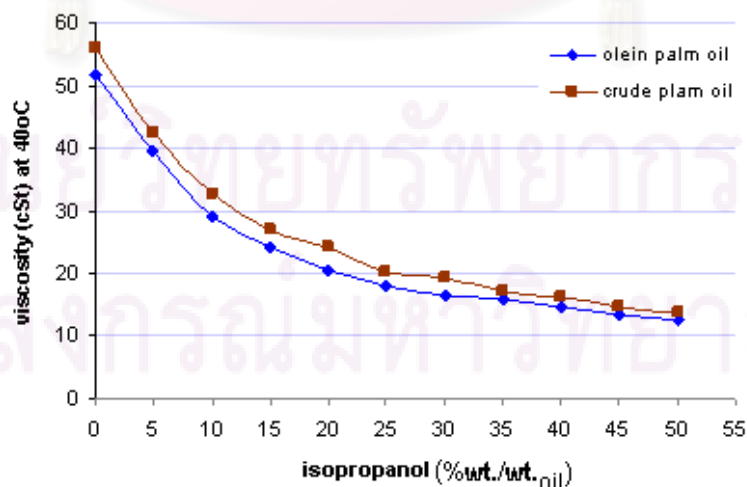
4.2 ผลของปริมาณไอโซโพรพานอลต่อความหนืดของน้ำมันพืช

เนื่องจากน้ำมันปาล์มโอเลอินและน้ำมันปาล์มดิบมีความหนืดสูงดังนั้นการป้อนน้ำมันพืชเข้าสู่ระบบแบบต่อเนื่องด้วยปั๊มแรงดันสูงจึงเกิดปัญหาการแกว่งขึ้น-ลงของความดันตามจังหวะการทำงานของลูกสูบส่งผลให้ความดันของระบบและอัตราการไหลของน้ำมันพืชไม่คงที่ จึงทำให้ต้องมีการลดความหนืดของน้ำมันพืชลง งานวิจัยนี้เลือกใช้ไอโซโพรพานอลมาช่วยลดความหนืดเนื่องจากไอโซโพรพานอลมีความมีขั้วต่ำและสามารถละลายในน้ำมันพืชได้ดีที่อุณหภูมิห้องที่ 30 องศาเซลเซียส [Bera et al., 2006] ซึ่งความสามารถในการละลายของน้ำมันพืชในตัวทำละลายชนิดต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ ก1 ซึ่งแสดงในภาคผนวก ก. และไอโซโพรพานอลมีจุดเดือด 82 องศาเซลเซียส ซึ่งมีจุดเดือดใกล้เคียงกับเมทานอลที่ 65 องศาเซลเซียส ทำให้สามารถกลั่นแยกจากผลิตภัณฑ์ได้โดยใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกลั่นเมทานอลไม่มากนัก นอกจากนี้ไอโซโพรพานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำมันพืชที่ภาวะเหนือวิกฤตได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไอโซโพรพิลเอสเทอร์ของกรดไขมันซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติทางเชื้อเพลิง ด้าน cold flow ของไบโอดีเซลได้อีกทางหนึ่ง [Lee et al., 1995]

การทดลองหาค่าความหนืดของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มโอเลอินที่ผสมไอโซโพรพานอลตั้งแต่ 0-50 % wt./wt._{oil} โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.3 ความหนืดของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มโอเลอินที่อัตราส่วนผสมไอโซโพรพานอลต่างๆ

| ปริมาณ isopropanol (%wt./wt. _{oil}) | Viscosity olein palm oil at 40 °C (cSt) | Viscosity crude palm oil at 40 °C (cSt) |
|---|---|---|
| 0 | 51.62 | 56.08 |
| 5 | 39.52 | 42.65 |
| 10 | 29.05 | 32.77 |
| 15 | 24.32 | 27.08 |
| 20 | 20.54 | 24.31 |
| 25 | 18.01 | 20.23 |
| 30 | 16.42 | 19.23 |
| 35 | 15.94 | 17.23 |
| 40 | 14.63 | 16.16 |
| 45 | 13.39 | 14.81 |
| 50 | 12.64 | 13.84 |



รูปที่ 4.1 ผลของปริมาณไอโซโพรพานอลต่อความหนืดของน้ำมันน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันปาล์มโอเลอิน

จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณไอโซโพรพานอลที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 25 %wt./wt._{oil} เป็นอย่างน้อย โดยให้ค่าความหนืดของน้ำมันประมาณ 20 เซนติสโตก ซึ่งจะทำให้อัตราการไหลของปั๊มไม่เกิดปัญหา

นอกจากนี้จะเห็นว่าไอโซโพรพานอลสามารถลดความหนืดของน้ำมันปาล์มโอเลอินจาก 51.62 เหลือ 12.64 เซนติสโตก ที่อัตราส่วนไอโซโพรพานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 50 %wt./wt._{oil} และสามารถลดความหนืดของ น้ำมันปาล์มดิบจาก 56.08 เหลือ 13.84 เซนติสโตก ที่อัตราส่วนไอโซโพรพานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบ 50 %wt./wt._{oil}

4.3 ผลของปัจจัยที่มีต่อการผลิตไบโอดีเซล

การศึกษาผลของปัจจัยที่มีต่อร้อยละเอสเทอร์ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบ 2⁴ แฟกทอเรียล ทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 280-350 องศาเซลเซียส ความดัน 20-35 เมกะพาสคัล อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 24-42 และอัตราส่วนไอโซโพรพานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 0-50 %wt./wt._{oil} โดยทดลองที่ค่ากลาง (center run) เพื่อตรวจสอบความเป็นเส้นตรงของสมการถดถอยหากพบส่วนโค้งจะทำการทดลองเพิ่มเพื่อแก้ไขสมการเชิงเส้นให้เป็นสมการกำลังสองได้ จากค่ากลาง 4 ค่า ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง ผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อสรุปว่าปัจจัยใดที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละเอสเทอร์ โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง เป็นไปตามลำดับดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.1 การเข้ารหัสปัจจัย (Code unit)

การปรับค่าของปัจจัยให้เท่ากับระดับของปัจจัยที่กำหนดไว้ในตารางที่ 4.4 ให้พอดีทำได้ยาก เนื่องจากความแปรปรวนของเครื่องมือวิจัย และระดับของปัจจัยดังกล่าวได้มีการเข้ารหัส (encoding) ให้มีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 ซึ่งตัวอย่างสมการเข้ารหัสสำหรับคุณหมุมิแสดงดังสมการที่ 4.1

$$T' = \frac{T - \frac{(High + Low)}{2}}{\frac{(High - Low)}{2}} \quad (4.1)$$

เมื่อ T คือ คุณหมุมิที่ปรับได้ และ T' คือ คุณหมุมิที่มีการเข้ารหัส

การเข้ารหัสดังกล่าวจะช่วยกำจัดผลของขนาด (magnitude) และหน่วยเต็มหน้า (Prefix) ที่ต่างกันของปัจจัยที่อาจทำให้การตีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นในการทำการทดลองแต่ละครั้งระดับของปัจจัยที่ได้จากการทดลองจริงจะถูกแก้ไข และเปลี่ยนแปลงค่าในส่วนออกแบบการทดลอง

ตัวอย่างหากคุณหมุมิที่กำหนดในส่วนออกแบบการทดลองเท่ากับ 280 องศาเซลเซียส แต่เมื่อทำการทดลองคุณหมุมิที่ปรับได้เท่ากับ 283 องศาเซลเซียส คุณหมุมิในส่วนออกแบบการ

ทดลองจากเดิมมีค่าเท่ากับ -1 จะเปลี่ยนเป็น $T' = \frac{283 - \frac{(350 + 280)}{2}}{\frac{(350 - 280)}{2}} = -0.91$ โดยค่าของ

ปัจจัยจริงที่ปรับได้ซึ่งมีการเข้ารหัสแล้วของการทดลองทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ภาวะในการทดลองที่ออกแบบการทดลองแบบ 2⁴ แฟกทอเรียลและค่ากลาง

| Run order | Temperature (°C) | Pressure (MPa) | Molar ratio Methanol to OPO | Isopropanol %wt./wt. _{oil} |
|-----------|------------------|----------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 350 | 35.0 | 42 | 50 |
| 2 | 350 | 20.0 | 24 | 50 |
| 3 | 280 | 35.0 | 24 | 0 |
| 4 | 280 | 20.0 | 24 | 0 |
| 5 | 350 | 35.0 | 24 | 0 |
| 6 | 315 | 27.5 | 33 | 25 |
| 7 | 280 | 20.0 | 24 | 50 |
| 8 | 315 | 27.5 | 33 | 25 |
| 9 | 315 | 27.5 | 33 | 25 |
| 10 | 280 | 20.0 | 42 | 50 |
| 11 | 350 | 35.0 | 42 | 0 |
| 12 | 350 | 20.0 | 24 | 0 |
| 13 | 280 | 20.0 | 42 | 0 |
| 14 | 280 | 35.0 | 24 | 50 |
| 15 | 280 | 35.0 | 42 | 50 |
| 16 | 315 | 27.5 | 33 | 25 |
| 17 | 350 | 20.0 | 42 | 50 |
| 18 | 280 | 35.0 | 42 | 0 |
| 19 | 350 | 20.0 | 42 | 0 |
| 20 | 350 | 35.0 | 24 | 50 |

ตามทฤษฎีของการออกแบบการทดลองแบบ 2⁴ แฟกทอเรียล ลำดับของการทดลองต้องเป็นแบบสุ่ม โดยการพิสูจน์ว่าข้อมูลที่ได้ไม่ขึ้นกับลำดับของการเก็บข้อมูลจะกล่าวในส่วนการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง

ตารางที่ 4.5 ภาวะในการทดลองจริงที่มีการเข้ารหัส

| Run order | Temperature | Pressure | Molar ratio Methanol to OPO | Isopropanol |
|-----------|-------------|----------|-----------------------------|-------------|
| 1 | 1.03 | 1.07 | 1.66 | 1 |
| 2 | 1.06 | -0.93 | -0.77 | 1 |
| 3 | -0.97 | 1.07 | -1.22 | -1 |
| 4 | 0.86 | -0.97 | -1.22 | -1 |
| 5 | 1 | 1 | -0.44 | -1 |
| 6 | 0 | 0 | -0.44 | 0 |
| 7 | -1 | -0.91 | -1 | 1 |
| 8 | 0.08 | 0.04 | -0.44 | 0 |
| 9 | -0.08 | 0.01 | -0.33 | 0 |
| 10 | -1 | -1 | 1.33 | 1 |
| 11 | 1 | 1 | 1 | -1 |
| 12 | 1.08 | -0.93 | -0.44 | -1 |
| 13 | -1 | -0.95 | 0.88 | -1 |
| 14 | -1 | 1.07 | -1 | 1 |
| 15 | -1.06 | 1.13 | 1.33 | 1 |
| 16 | 0.06 | -0.04 | 0.22 | 0 |
| 17 | 1.06 | -0.93 | 0.77 | 1 |
| 18 | -1.06 | 1.07 | 1.11 | -1 |
| 19 | 1 | -1 | 1.11 | -1 |
| 20 | 1.06 | 1.13 | -0.88 | 1 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

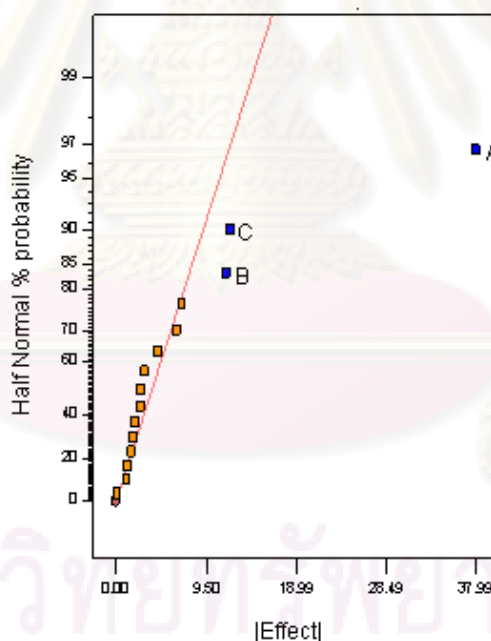
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองของการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียล

| Run order | Temperature (°C) | Pressure (MPa) | Molar ratio Methanol to OPO | Isopropanol %wt./wt. _{oil} | Esters Content % wt. |
|-----------|------------------|----------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 1 | 351 | 35.5 | 48 | 50 | 66 |
| 2 | 352 | 20.5 | 26 | 50 | 67 |
| 3 | 281 | 35.5 | 22 | 0 | 42 |
| 4 | 285 | 20.2 | 22 | 0 | 33 |
| 5 | 350 | 35.0 | 29 | 0 | 81 |
| 6 | 315 | 27.5 | 29 | 25 | 57 |
| 7 | 280 | 20.7 | 24 | 50 | 22 |
| 8 | 318 | 27.8 | 29 | 25 | 65 |
| 9 | 312 | 27.6 | 30 | 25 | 47 |
| 10 | 280 | 20.0 | 45 | 50 | 15 |
| 11 | 350 | 35.0 | 42 | 0 | 66 |
| 12 | 353 | 20.5 | 29 | 0 | 74 |
| 13 | 280 | 20.4 | 41 | 0 | 27 |
| 14 | 280 | 35.5 | 24 | 50 | 32 |
| 15 | 278 | 36.0 | 45 | 50 | 25 |
| 16 | 317 | 27.2 | 35 | 25 | 53 |
| 17 | 352 | 20.5 | 40 | 50 | 43 |
| 18 | 278 | 35.5 | 43 | 0 | 31 |
| 19 | 350 | 20.0 | 43 | 0 | 51 |
| 20 | 352 | 36.0 | 25 | 50 | 76 |

จากผลการทดลองที่แสดงดังตารางที่ 4.6 สามารถนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อรูปแบบของสมการถดถอย โดยจะวิเคราะห์ความแปรปรวนของพจน์ต่างๆในสมการถดถอยก่อน ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยหลัก (main effect) ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

4.3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียล

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอย โดยมีสมมติฐานหลักคือค่าสัมประสิทธิ์ทุกตัวเท่ากับศูนย์ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ผลการวิเคราะห์สำหรับร้อยละเอสเทอร์ โดยนำผลการทดลองค่าร้อยละเอสเทอร์มาคำนวณด้วยโปรแกรม Design Expert เวอร์ชัน 6.0.10 รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลกระทบ (effect) ของตัวแปร กับค่าความน่าจะเป็นปกติแบบครึ่ง (halfnormal % probability) จะเห็นว่าตัวแปร A, B และ C ซึ่งคือ อุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน ตามลำดับ มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณเอสเทอร์ เนื่องจากค่า effect estimate ของตัวแปรเบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง แต่ปริมาณ isopropanol ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละเอสเทอร์ซึ่งคาดว่าเนื่องจากไอโซโพรพานอลมีความว่องไวต่ำกว่าเมทานอลทำให้ปริมาณไอโซโพรพิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าเมทิลเอสเทอร์และไม่ทำให้ร้อยละเอสเทอร์ที่ได้เปลี่ยนแปลงมาก



รูปที่ 4.2 ความน่าจะเป็นปกติแบบครึ่งของค่าประมาณของผลการทดลองสำหรับการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลและไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤต A = อุณหภูมิ B = ความดัน C = อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน

จากนั้นจึงนำคุณสมบัติ ความดัน และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอินมาวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยตัดตัวแปรอื่นๆ ออกจากสมการถดถอย โดยเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.7 ที่แสดงค่าทางสถิติต่างๆ จะเห็นว่าค่า P Value ของตัวแปรทั้งสามตัวมีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่าสัมประสิทธิ์ของ คุณสมบัติ ความดัน และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอินไม่เท่ากับศูนย์ แสดงว่า คุณสมบัติ ความดัน และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอินมีผลต่อค่าร้อยละเอสเทอร์

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรคุณสมบัติ, ความดัน และ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน

| Source | Sum of Square | Degree of Freedom | Mean Square | F value | P Value |
|----------|---------------|-------------------|-------------|---------|---------|
| Model | 6670.28 | 3 | 2223.43 | 43.87 | <0.0001 |
| A | 5914.89 | 1 | 5914.89 | 116.70 | <0.0001 |
| B | 557.04 | 1 | 557.04 | 10.99 | 0.0044 |
| C | 599.20 | 1 | 599.20 | 11.82 | 0.0034 |
| Residual | 810.93 | 16 | 50.68 | | |
| Total | 7481.21 | 20 | | | |

และเมื่อพิจารณาค่า coefficient estimate จากตารางที่ 4.8 จะเห็นว่าค่าของคุณสมบัติและความดันจะมีผลสูงสุดในทางบวก อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอินมีผลสูงสุดในทางลบ ซึ่งสามารถใช้เป็นสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยเบื้องต้นเพื่อใช้ทำนายค่าของร้อยละเอสเทอร์ได้

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยร้อยละเอสเทอร์ของการทดลองทั้งหมด (overall mean) ค่าสัมประสิทธิ์ของ คุณสมบัติ ความดัน และ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ต่อค่าร้อยละเอสเทอร์

| Factor | Coefficient Estimate | Standard Error |
|--------------|----------------------|----------------|
| Overall mean | 48.30 | 1.60 |
| A | 18.99 | 1.76 |
| B | 5.84 | 1.76 |
| C | -5.72 | 1.66 |

ดังนั้นสมการถดถอยเบื้องต้นจะใช้ค่าของ อุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอินซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

$$\text{Esters content (\%wt.)} = 48.3 + 18.99T' + 5.84P' - 5.72M' \quad (4.2)$$

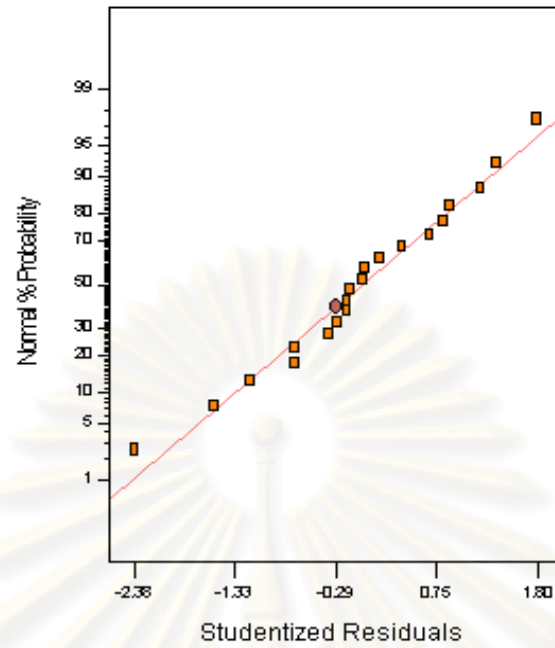
โดย T, P' และ M' เป็นตัวแปรที่มีการเข้ารหัสอยู่ระหว่าง -1 และ 1

$$\text{Esters content (\%wt.)} = -123.092 + 0.542T + 0.077P - 0.635M \quad (4.3)$$

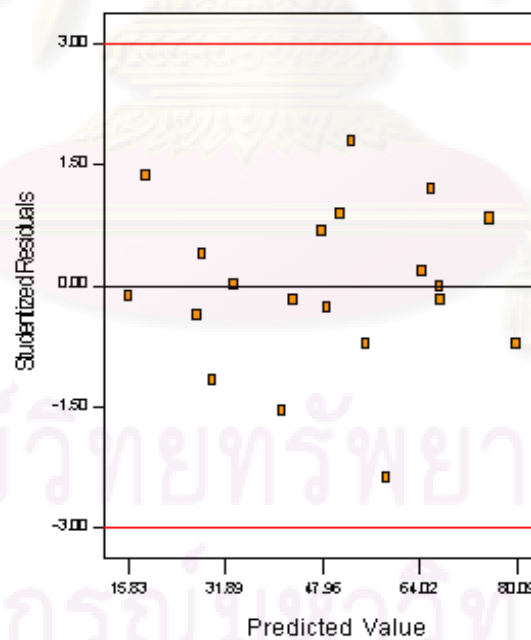
โดย T, P และ M เป็นตัวแปรที่แสดงถึงอุณหภูมิ ความดัน และ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส และ บาร์ ตามลำดับ

4.3.3 การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (residual) การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียล

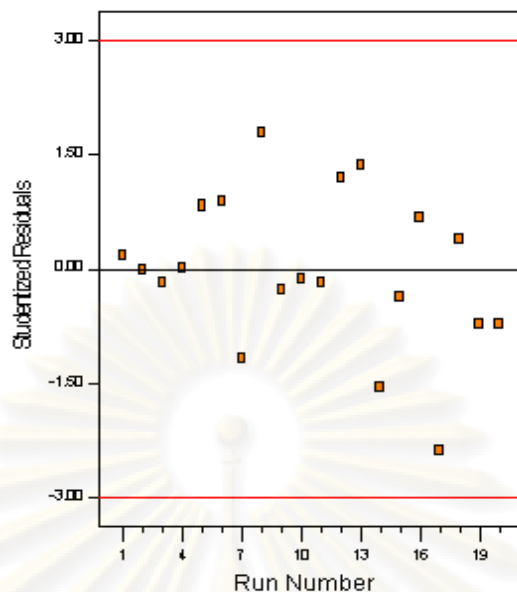
การตรวจสอบความถูกต้องของสมการถดถอยทำได้โดยการวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่เหลือจากข้อมูลที่สมการทำนายได้ โดยส่วนตกค้างหาได้จากการนำค่าจริงจากการทดลองลบด้วยค่าจากสมการถดถอย ซึ่งจะเห็นว่าส่วนตกค้างนี้ต้องเป็นความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (random error) โดยมีข้อตกลงคือ มีการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution) ไม่มีแนวโน้มหรือโครงสร้าง (structureless) มีความแปรปรวนคงที่ (constant variation) และไม่ขึ้นกับลำดับการเก็บข้อมูล [Montgomery, 2001] ซึ่งข้อตกลงทั้งหมดสามารถวิเคราะห์ได้จากการพล็อตส่วนตกค้างกับ Normal % probability ค่าที่ทำนายจากสมการถดถอย (predicted value) และลำดับการทดลอง (run order) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ถึง 4.5



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง (residuals) กับความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal % Probability)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายจากสมการถดถอย (predicted value) กับ ส่วนตกค้าง (residuals)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเก็บข้อมูล (run order) กับ ส่วนตกค้าง (residuals)

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ รูปที่ 4.4 พบว่าส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่และไม่มีแนวโน้ม และรูปที่ 4.5 ส่วนตกค้างไม่มีแนวโน้มเมื่อเทียบกับลำดับการเก็บข้อมูลแสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างไม่ขึ้นกับลำดับของการเก็บข้อมูลการทดลอง

อย่างไรก็ตามนอกจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้างแล้วความสามารถในการทำนายค่าของสมการถดถอยสามารถดูได้จากค่าสถิติของสมการถดถอยนั้นดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าสถิติสำหรับสมการถดถอยเบื้องต้น

| Response | Adj R ² | PRESS | C.V. | Adequate Precision |
|----------------|--------------------|-------|-------|--------------------|
| Esters content | 0.87 | 1203 | 14.65 | 20.182 |

โดยค่าสถิติที่แสดงในตารางที่ 4.9 สามารถอธิบายได้พอสังเขปดังนี้

- ค่า Adjusted R-Squared (Adj. R²) แสดงถึงปริมาณข้อมูลจากการทดลองที่สมการถดถอยสามารถอธิบายได้ ซึ่งสมการถดถอยที่ดีจะมีค่านี้เข้าใกล้ 1
- ค่า Prediction error sum of square (PRESS) แสดงถึงความสามารถในการทำนายค่าในระดับปัจจัยอื่นที่มีได้ทำการทดลองจริง ซึ่งหากมีค่ามากแสดงว่าสมการถดถอยจะทำนายค่าได้ไม่ดี

- ค่า Coefficient of variation (C.V.) แสดงถึงความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มในชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลองในรูปร้อยละต่อค่าเฉลี่ยของผลตอบสนอง
- ค่า Adequate Precision แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to noise ratio) หากมีค่าน้อยกว่า 4 แสดงว่าค่าที่ได้เป็นค่าจากสิ่งรบกวนมากกว่าค่าจริง

จากตารางที่ 4.9 จะเห็นว่าค่า Adjusted R-Squared และ ค่า Adequate Precision ของสมการถดถอยเชิงเส้นของร้อยละเอสเทอร์สามารถอธิบายค่าได้ดีพอสมควร เนื่องจากมีค่า R^2 สูง และค่า Adequate Precision สูงกว่า 4 มาก และสามารถอธิบายผลการทดลองได้โดยอ้างอิงจากร้อยละเอสเทอร์สำหรับผลตอบสนองที่มีสมการถดถอยเชิงเส้นดังนี้

ร้อยละเอสเทอร์ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน เนื่องจากการคำนวณค่าร้อยละเอสเทอร์จากสมการถดถอยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิซึ่งมีเครื่องหมายบวก ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิที่มากขึ้นทำให้ได้ค่าร้อยละเอสเทอร์ที่สูงขึ้น เช่นเดียวกับความดันที่มีสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยมีเครื่องหมายบวกเช่นกัน สำหรับอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันมีสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยเป็นลบทำให้ทราบว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่เพิ่มขึ้นทำให้ได้ค่าร้อยละเอสเทอร์ที่ลดลง

4.3.4 การเพิ่มการทดลองด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบ Central composite design เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล

เนื่องจากการออกแบบการทดลองแบบ 2^4 fractional factorial design ไม่สามารถใช้หาสมการถดถอยกำลังสองได้ จึงมีการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาสมการถดถอยกำลังสองเพื่อดูผลของปัจจัยแต่ละตัวได้อย่างละเอียดขึ้น และใช้ในการหาภาวะที่เหมาะสมต่อไป ทำโดยการเพิ่มชุดการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.10 ทำให้ได้ชุดการทดลองทั้งหมดใหม่ ซึ่งจัดเป็นการออกแบบการทดลองแบบ Central composite design (CCD)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ภาวะการทดลองเพิ่มและผลการทดลองสำหรับการออกแบบการทดลองแบบ Central composite design

| Run order | Temperature (°C) | Pressure (MPa) | Molar ratio Methanol to OPO | Isopropanol %wt./wt. _{oil} | Esters Content % wt. |
|-----------|------------------|----------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 21 | 280 | 27.5 | 33 | 25 | 42 |
| 22 | 350 | 27.5 | 33 | 25 | 65 |
| 23 | 315 | 20.0 | 33 | 25 | 57 |
| 24 | 315 | 35.0 | 33 | 25 | 72 |
| 25 | 315 | 27.5 | 24 | 25 | 58 |
| 26 | 315 | 27.5 | 42 | 25 | 66 |
| 27 | 315 | 27.5 | 33 | 0 | 61 |
| 28 | 315 | 27.5 | 33 | 50 | 52 |
| 29 | 315 | 27.5 | 33 | 25 | 65 |
| 30 | 315 | 27.5 | 33 | 25 | 62 |

จากผลการทดลอง ซึ่งมีลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลองเช่นเดียวกับการออกแบบการทดลองแบบ 2^4 factorial design โดยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์ส่วนตกค้างแสดงในภาคผนวก ง ซึ่งผลการวิเคราะห์ส่วนตกค้างพบว่าเป็นไปตามข้อตกลงความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มในการวิเคราะห์ความแปรปรวน

สมการถดถอยของผลตอบสนองต่างๆ เมื่อเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ สามารถเขียนได้เป็นสมการที่มีการเข้ารหัสปัจจัยดังต่อไปนี้

$$\text{Esters content (\%wt)} = 52.21 + 18.07T' + 5.90P' - 4.89M' \quad (4.4)$$

โดย T' P' และ M' เป็นตัวแปรที่มีการเข้ารหัสอยู่ระหว่าง -1 และ 1

$$\text{Esters content (\%wt.)} = -114.09 + 0.52T + 0.08P - 0.54M \quad (4.5)$$

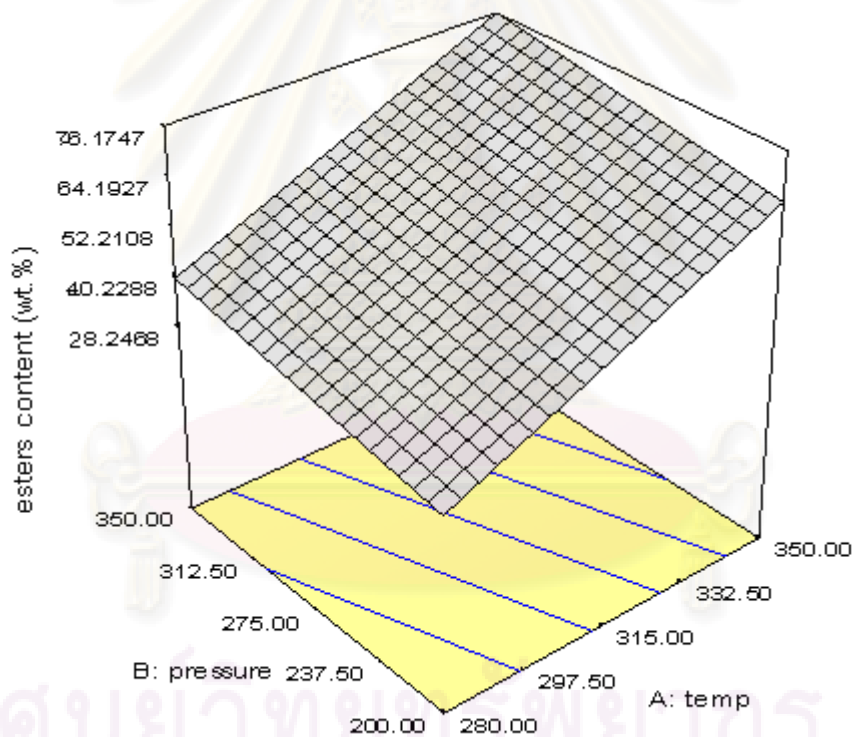
โดย T, P และ M เป็นตัวแปรที่แสดงถึงอุณหภูมิ ความดัน และ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส และ บาร์ ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามนอกจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้างแล้วความสามารถในการทำนายค่าของสมการถดถอยสามารถดูได้จากค่าสถิติของสมการถดถอยนั้นดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าสถิติสำหรับสมการถดถอยของการออกแบบการทดลองแบบ CCD

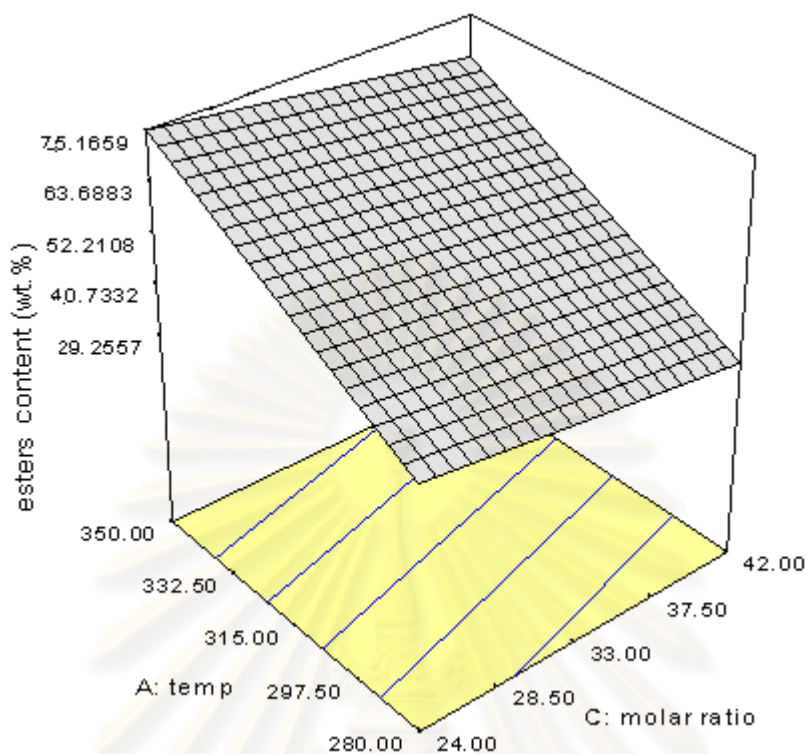
| Response | Adj R ² | PRESS | C.V. | Adequate Precision |
|-------------------|--------------------|-------|-------|--------------------|
| Content of esters | 0.85 | 2941 | 17.65 | 17.93 |

จากสมการถดถอยที่ได้จะพบว่าสมการที่ได้เป็นสมการถดถอยเชิงเส้นเช่นเดียวกับที่ออกแบบไว้ตั้งแต่ต้นซึ่งจากค่าสถิติและการวิเคราะห์ส่วนตกค้างพบว่าสมการถดถอยสามารถทำนายค่าได้ดี โดยพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ของผลตอบสนองที่ได้จากสมการ 4.5 แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ถึง รูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 พื้นผิวตอบสนองของร้อยละเอสเทอร์ (แกน X แสดงอุณหภูมิหน่วย องศาเซลเซียส และแกน Y แสดงความดันหน่วย บาร์)

จากรูปเห็นว่าจุดสูงสุดของพื้นผิวอยู่ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 350 บาร์



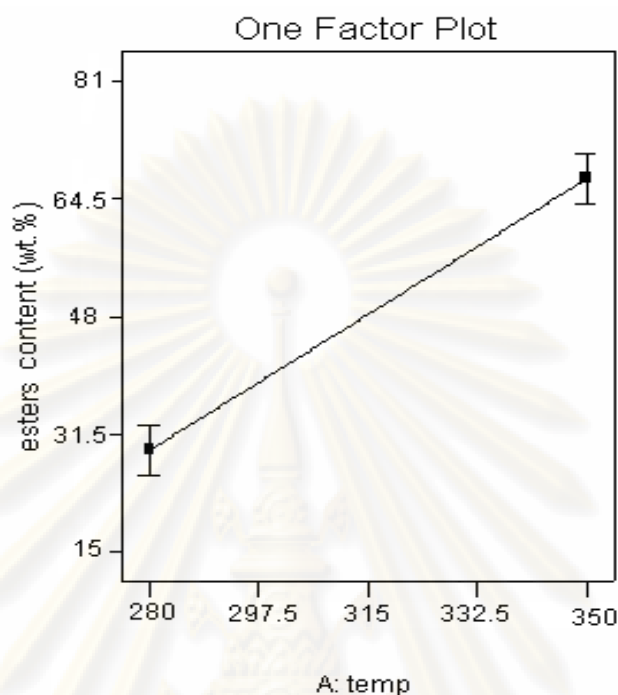
รูปที่ 4.7 พื้นผิวตอบสนองของของร้อยละเอสเทอร์ (แกน x แสดงอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน และแกน Y แสดงอุณหภูมิหน่วย องศาเซลเซียส)

จากรูปเห็นว่าจุดสูงสุดของพื้นผิวอยู่ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 24 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อร้อยละเอสเทอร์

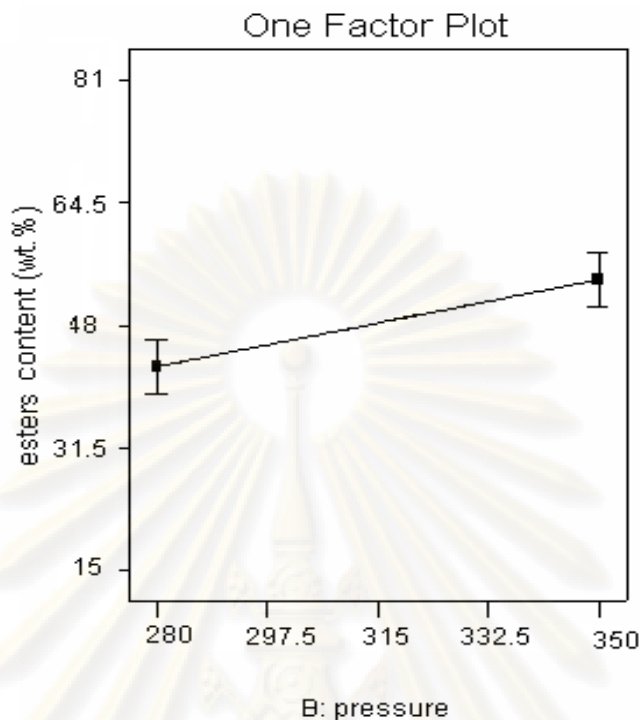
4.4.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละเอสเทอร์



รูปที่ 4.8 ร้อยละเอสเทอร์ที่อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด (ที่ความดัน 27.5 เมกะพาสคัล อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 33 และปริมาณไอโซโพรพานอลร้อยละ 25)

ผลของอุณหภูมิ จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ได้ร้อยละเอสเทอร์มากขึ้นเมื่อพิจารณาจากความชันของกราฟซึ่งมีความชันมากแสดงว่าอุณหภูมิมีผลมากต่อร้อยละเอสเทอร์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองโดยทั่วไปของการผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอล [Demirbas 2008, He et al., 2007, Tan et al., 2009, Song et al., 2007] เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเมทานอลมีค่าลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนของเมทานอลลดลงทำให้สามารถรวมตัวกับน้ำมันได้ง่ายขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณเอสเทอร์ที่อุณหภูมิสูงมีค่ามากกว่าอุณหภูมิต่ำ แต่การเพิ่มอุณหภูมิสูงมากก็ไม่ได้ส่งผลดีเสมอไปเพราะว่าน้ำมันปาล์มเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 279 องศาเซลเซียส และมีอัตราการสลายตัวสูงที่สุดที่ 381 องศาเซลเซียส [Song et al., 2008]

4.4.2 ผลของความดันต่อร้อยละเอสเทอร์

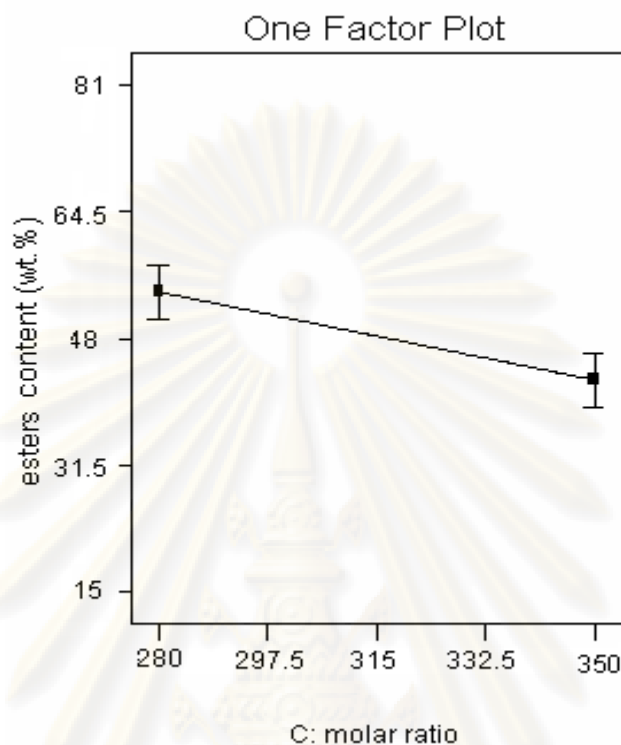


รูปที่ 4.9 ร้อยละเอสเทอร์ที่ความดันสูงสุดและต่ำสุด (ที่อุณหภูมิ 315 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 33 และปริมาณไอโซโพรพานอลร้อยละ 25)

ผลของความดัน จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันในการทำปฏิกิริยาจาก 20 ไปเป็น 35 เมกะพาสคัล จะเห็นว่าได้ร้อยละเอสเทอร์มากขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ He และคณะ (2007) ที่ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองแบบต่อเนื่องที่ภาวะเหนือวิกฤตโดยพบว่าเมื่อเพิ่มความดันทำให้ได้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น โดยสามารถอธิบายได้โดยเมื่อความดันสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเมทานอลมีค่าลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนของเมทานอลลดลงทำให้สามารถรวมตัวกับน้ำมันได้ง่ายขึ้น

งานวิจัยของ Kusdiana และคณะ (2001) ได้กล่าวว่า ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ความดัน 14 เมกะพาสคัล เกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ เนื่องจากภาวะนี้ เป็นภาวะเหนือวิกฤตที่ไม่เสถียร เพราะความดันและอุณหภูมิอยู่ใกล้จุดวิกฤต และในงานวิจัยของสุกัญญา (2002) ได้ทดลองใช้ความดัน 10 เมกะพาสคัล พบว่าที่ความดันนี้ให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ต่ำกว่าการทดลองที่ใช้ความดัน 19 เมกะพาสคัล และในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ He และคณะ (2007) โดยศึกษาผลของความดันจากการผลิตไบโอดีเซลที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองต่อเมทานอล 1:42 อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที พบว่าการเพิ่มความดันจาก 15.5 เป็น 25 เมกะพาสคัล ทำให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์เพิ่มจาก 56.1 เป็น 81.7 ตามลำดับ

4.4.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอินต่อ ร้อยละเอสเทอร์



รูปที่ 4.10 ร้อยละเอสเทอร์ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันสูงสุดและต่ำสุด (ที่อุณหภูมิ 315 องศาเซลเซียส ความดัน 27.5 เมกะพาสคัล และปริมาณไอโซโพรพานอลร้อยละ 25)

ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน จากรูปที่ 4.10 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 24 ไปเป็น 42 พบว่าร้อยละเอสเทอร์ลดลง ซึ่งอาจจะเป็นเพราะเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันให้มากขึ้น ทำให้ปริมาตรโดยโมลของของผสมในเครื่องปฏิกรณ์มีปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ค่า residence time ของสารที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์น้อยลง จึงทำให้ร้อยละเอสเทอร์ลดลง

4.5 การทดสอบสมการถดถอยและหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล

สมการถดถอยเชิงเส้นสำหรับค่าร้อยละเอสเทอร์จะเห็นว่าร้อยละเอสเทอร์ขึ้นกับ อุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน ซึ่งมีจุดสูงสุดของอุณหภูมิอยู่ที่ 350 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.6) จุดสูงสุดของความดันอยู่ที่ 35 เมกะพาสคัล (รูปที่ 4.6) จุดสูงสุดของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอินอยู่ที่ 24 (รูปที่ 4.7) ซึ่งหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลได้โดยข้อกำหนดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ข้อกำหนดสำหรับการหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง

| Name | Goal | Lower Limit | Upper Limit | Unit |
|---------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|
| T | within range | 280 | 350 | °C |
| P | within range | 20 | 35 | MPa |
| MeOH:Oil | within range | 24 | 42 | - |
| Isopropanol | is equal to 25 | 25 | 50 | %wt./wt. _{oil} |
| Ester content | Maximize | 15 | 81 | % wt. |

การเลือกภาวะที่เหมาะสมจะกำหนดให้ได้ร้อยละเอสเทอร์สูงสุด โดยกำหนดค่าปริมาณไอโซโพรพานอลอยู่ที่ 25 %wt./wt._{oil} เพื่อให้น้ำมันที่เป็นสารตั้งต้นมีความหนืดที่เหมาะสมที่จะใช้กับปั๊มแรงดันสูงได้อย่างไม่มีปัญหา ส่วนอุณหภูมิ ความดันและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันให้อยู่ในช่วงที่ทำการทดลอง ขั้นตอนการหาภาวะที่เหมาะสมด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์แสดงในภาคผนวก ๑ คำตอบสุดท้ายที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 คำตอบของการหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง

| Solution no. | Temperature (°C) | Pressure (MPa) | MeoH:Oil - | Isopropanol %wt./wt. _{oil} | Esters content (% wt.) |
|-----------------|---------------------|-------------------|---------------|--|---------------------------|
| 1 | 350 | 35 | 24.99 | 25.00 | 81 |
| 2 | 350 | 34.97 | 26.11 | 25.00 | 80 |

การปรับอุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน ให้เท่ากับค่าที่กำหนดในระดับทศนิยม 2 ตำแหน่งไม่สามารถทำได้ ดังนั้นในการทดลองเพื่อยืนยันข้อสรุปที่ได้จากสมการถดถอยจึงเลือกทำการทดลองที่อุณหภูมิเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 35 เมกะพาสคัล และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน เท่ากับ 25 และ 26

ภาวะที่ได้จากการทดลองจริงและผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.14 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อนำค่าที่ได้มาเทียบกับค่าในตารางที่ 4.15 ซึ่งเป็นตารางแสดงค่าสูงสุดและต่ำสุดที่ยอมรับได้ในระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการถดถอยมีค่าไม่ต่างกันทางสถิติ ทำให้สรุปได้ว่าสมการถดถอยสามารถทำนายค่าได้ดีในช่วงที่ทำการทดลอง

ตารางที่ 4.14 ภาวะการทดลองและผลการทดลองสำหรับการยืนยันข้อสรุปของสมการถดถอย

| Run Order | Temperature (°C) | Pressure (MPa) | MeoH:Oil | Isopropanol %wt./wt. _{oil} | Esters content (% wt.) |
|-----------|------------------|----------------|----------|-------------------------------------|------------------------|
| 31 | 348 | 35.3 | 25 | 25 | 80 |
| 32 | 350 | 34.5 | 25 | 25 | 79 |
| 33 | 350 | 35.6 | 26 | 25 | 81 |
| 34 | 352 | 34.8 | 26 | 25 | 81 |

ตารางที่ 4.15 ค่าสูงสุดและต่ำสุดของผลตอบสนองที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

| Responses | Mean | Low 95%CI* | High 95%CI* |
|------------------------|-------|------------|-------------|
| Esters content (% wt.) | 80.52 | 78.56 | 82.87 |

CI = Confidence interval

4.6 ผลการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลจากน้ำมันปาล์มดิบ

ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยได้ทำการเปลี่ยนชนิดของน้ำมันจากน้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นน้ำมันปาล์มดิบซึ่งมีสมบัติทางเคมีและองค์ประกอบกรดไขมันใกล้เคียงกันจึงคาดว่าจะได้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น โดยใช้ภาวะการทดลองที่ดีที่สุดสำหรับน้ำมันปาล์มโอเลอิน คืออุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 35 เมกะพาสคัล อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืช 24 ปริมาณไอโซโพรพานอล 25 %wt./wt._{oil} จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ภาวะการทดลองที่ดีที่สุดน้ำมันปาล์มดิบทำให้ได้ร้อยละเอสเทอร์เท่ากับ 76 ซึ่งค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่าร้อยละผลได้เอสเทอร์ที่ได้จากสมการถดถอยของน้ำมันปาล์มโอเลอิน (79-81 % wt.) ส่วนสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันทั้งสองชนิดที่ผลิตที่ภาวะที่ดีที่สุดจะแสดงในหัวข้อถัดไป

4.7 ผลการศึกษาสมบัติของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นสารประกอบที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ เพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล ดังนั้นจึงต้องศึกษาสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้ก่อนนำไปใช้เพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน ซึ่งในปัจจุบันมีการกำหนดมาตรฐานของไบโอดีเซลแล้วแสดงดังตารางที่ 4.16

ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลของงานวิจัยนี้คือที่ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 35 เมกะพาสคัล อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืช 24 ปริมาณไอโซโพรพานอล 25 %wt./wt._{oil} จากการนำไบโอดีเซลที่ผลิตได้ไปทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิง แสดงผลดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.16 มาตรฐานน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล [กรมธุรกิจพลังงาน, 2552 : ออนไลน์]

| สมบัติ | มาตรฐานน้ำมันดีเซล | | มาตรฐานน้ำมัน | วิธีทดสอบ |
|----------------------------------|--------------------|--------------|---------------|-------------|
| | ดีเซลหมุนเร็ว | ดีเซลหมุนช้า | ไบโอดีเซล | |
| Kinematic Viscosity (cSt) | 1.8 – 4.1 | 8.0 max | 3.5 – 5.0 | ASTM D 445 |
| Specific Gravity at 15.6/15.6 °C | 0.81 – 0.87 | 0.920 max | 0.86 – 0.90 | ASTM D 1298 |
| Cetane Index | 47 | 47 min | 51 min | ASTM D 613 |
| Flash Point (°C) | 52 | 52 min | 120 min | ASTM D 93 |
| Heating Value (MJ/kg) | - | 46 | - | ASTM D 240 |
| Monoglyceride (% wt.) | - | - | 0.80 max | EN 14105 |
| Diglyceride (% wt.) | - | - | 0.20 max | EN 14105 |
| Triglyceride (% wt.) | - | - | 0.20 max | EN 14105 |

ตารางที่ 4.17 สมบัติทางเชื้อเพลิงของเอสเทอร์ที่ภาวะการผลิตที่ดีที่สุด (อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 35 เมกะพาสคัล อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืช 24 ปริมาณไอโซโพรพานอล 25 %wt./wt._{oil})

| Properties | Results of biodiesel fuel | |
|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | Biodiesel from olein palm oil | Biodiesel from crude palm oil |
| Kinematic Viscosity (cSt) | 5.35 | 5.76 |
| Specific Gravity at 15.6/15.6 °C | 0.879 | 0.873 |
| Cetane Index | 48.6 | 47.7 |
| Flash Point (°C) | 117 | 118 |
| Heating Value (MJ/kg) | 36.5 | 37.4 |
| Monoglyceride (% wt.) | 0.41 | - |
| Diglyceride (% wt.) | 0.75 | - |
| Triglyceride (% wt.) | 0.23 | - |

จากตารางที่ 4.16 และ 4.17 สมบัติของเอสเทอร์จากน้ำมันพืชทั้งสองชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซล พบว่ามี ความถ่วงจำเพาะ ค่าดัชนีซีเทน และจุดวาบไฟ เป็นไปตามมาตรฐานของน้ำมันไบโอดีเซล ยกเว้นค่าความหนืดมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน อาจเป็นเพราะว่าเอสเทอร์ที่นำมาทดสอบมีร้อยละเอสเทอร์ไม่สูงเท่าที่ควร (81 % wt.) ดังนั้นจึงอาจมีไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นสารตั้งต้นปนอยู่มากจึงทำให้ค่าความหนืดมากกว่าที่ควรจะเป็น

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของเอสเทอร์จากน้ำมันพืชทั้งสองชนิดกับค่ามาตรฐานของดีเซลหมุนเร็ว พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเอสเทอร์สูงกว่ามาตรฐานเล็กน้อย ซึ่งเมื่อนำไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็ว อาจส่งผลให้เครื่องยนต์มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงสิ้นเปลืองมากขึ้นถ้าไม่มีการปรับแต่ง เนื่องจากอุปกรณ์การป้อนเชื้อเพลิงใช้การควบคุมอัตราการไหลเป็นปริมาตร ดังนั้นเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าจะให้กำลังมากกว่า เนื่องจากมีมวลของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้มากกว่า ขณะเดียวกันอาจมีโอกาสเกิดควันมากกว่า แต่เมื่อพิจารณาค่าความถ่วงจำเพาะเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็วพบว่ามีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนสมบัติอื่นๆเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็วพบว่าผ่านมาตรฐาน ดังนั้นสำหรับเครื่องยนต์หมุนเร็วจึงน่าจะใช้อุณหภูมิจากน้ำมันพืชทั้งสองชนิดนี้ได้ เนื่องจากในสภาพปัจจุบันการจำหน่ายน้ำมันดีเซลที่เรียกว่าไบโอดีเซล เป็นน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมและไบโอดีเซล โดยมีไบโอดีเซลเพียงเล็กน้อย (ไม่เกินร้อยละ 10)

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของเอสเทอร์ที่ได้จากน้ำมันพืชทั้งสองชนิดกับค่ามาตรฐานของน้ำมันดีเซลหมุนช้า พบว่าผ่านมาตรฐานทุกค่า ซึ่งสรุปได้ว่าเอสเทอร์ของน้ำมันทั้งสองชนิดเหมาะสมกับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนช้า



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชอย่างต่อเนื่องด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดห้องทดลอง เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อร้อยละเอสเทอร์ รวมถึงภาวะที่เหมาะสมได้ข้อสรุปดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ปัจจัยที่มีต่อร้อยละเอสเทอร์ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า ปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน และปริมาณไอโซโพรพานอล มีเพียงอุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืช ที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนอง โดย อุณหภูมิและความดันที่เพิ่มขึ้นทำให้ร้อยละเอสเทอร์เพิ่มขึ้น ส่วนอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชที่เพิ่มขึ้นทำให้ร้อยละเอสเทอร์ลดลงเนื่องจากปริมาตรโดยโมลของของผสมในภาวะเหนือวิกฤตเพิ่มขึ้นทำให้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยลง ส่วนปริมาณไอโซโพรพานอลไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณเอสเทอร์ แต่สามารถช่วยลดความหนืดของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มโอเลอินได้

5.1.2 สมการถดถอยสำหรับทำนายผลตอบสนองต่างๆ

สมการถดถอยที่ได้จากการออกแบบการทดลองสุดท้ายสามารถแสดงได้ดังนี้

สมการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression model) ซึ่งทำนายค่าผลตอบสนองร้อยละเอสเทอร์ได้คือ ดังแสดง

$$\text{Esters content (\% wt.)} = 52.21 + 18.07T' + 5.90P' - 4.89M'$$

และสมการสำหรับค่าปัจจัยจริง (Actual factor) ดังแสดง

$$\text{Esters content (\% wt..)} = -114.09 + 0.52T + 0.08P - 0.54M$$

เมื่อ T' และ T คือ ค่าอุณหภูมิที่มีการเข้ารหัส และค่าจริงในหน่วยองศาเซลเซียสตามลำดับ

P' และ P คือ ความดันที่มีการเข้ารหัส และค่าจริงในหน่วยบาร์ตามลำดับ

M' และ M คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืช

สมการถดถอยเชิงเส้นที่ได้สามารถทำนายค่าได้ดี ซึ่งมีอุณหภูมิ ความดันและอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละผลได้

5.1.3 การหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน

ภาวะที่เหมาะสมได้จากสมการถดถอยเชิงเส้นมีค่าอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 35 เมกะพาสคัล อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันพืช 24 ปริมาณไอโซโพรพานอล 25 %wt./wt._{oil} ได้ร้อยละผลได้เอสเทอร์ 81 โดยเมื่อนำภาวะที่เหมาะสมนี้เมื่อนำไปทดลองกับน้ำมันปาล์มดิบได้ร้อยละเอสเทอร์เท่ากับ 76 ซึ่งค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากสมการถดถอยของน้ำมันปาล์มโอเลอิน อาจมีสาเหตุจากน้ำมันปาล์มดิบมีกรดไขมันอิ่มตัวมากกว่าน้ำมันปาล์มโอเลอิน ทำให้น้ำมันปาล์มดิบเกิดปฏิกิริยาได้ยากกว่าน้ำมันปาล์มโอเลอิน

5.1.4 สมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอินและน้ำมันปาล์มดิบ

การเปรียบเทียบสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชทั้งสองชนิด พบว่ามีสมบัติผ่านมาตรฐานของน้ำมันดีเซลหมุนช้า ดังนั้นไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชทั้งสองชนิดจึงเหมาะสมกับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนช้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเพิ่มร้อยละเอสเทอร์

เนื่องจากการลดความหนืดของน้ำมันพืชในงานวิจัยนี้ทำโดยการเติมไอโซโพรพานอลเพื่อทำให้ปั๊มทำงานได้อย่างไม่มีปัญหา แต่จากผลการทดลองพบว่าร้อยละผลได้เอสเทอร์ที่ได้มีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงาน ซึ่งคาดว่าน่าจะมีผลจากอุปกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์ ผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะการเพิ่มร้อยละเอสเทอร์ ดังนี้

- เปลี่ยนปั๊มจากแบบเดิมที่ใช้อยู่เป็นแบบลูกสูบคู่ (double syringe or piston pump) เป็นปั๊มชนิดอื่นที่มีกำลังมากกว่า เช่น ปั๊มแบบสกรู (screw pump) ซึ่งใช้กับน้ำมันดิบ

และพอลิเมอร์หลอมที่มีความหนืดสูงกว่าน้ำมันพืชมาก หรือบีบพ์แบบอื่น ที่มีความสามารถในการป้อนสารที่มีความหนืดสูงได้

5.2.2 ระบบชุดหล่อเย็นและการวัดอุณหภูมิ

1) ระบบหล่อเย็นในงานวิจัยนี้ทำโดยการจุ่มท่อลงในอ่างหล่อเย็น ซึ่งน้ำในอ่างหล่อเย็นไม่มีการหมุนเวียนในกรณีที่ทำการผลิตที่อัตราการไหลต่ำน้ำสามารถถ่ายโอนความร้อนให้อากาศได้ทันที แต่ถ้าทำการผลิตที่อัตราการไหลสูงควรเปลี่ยนระบบหล่อเย็นเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (double pipe heat exchanger) หรือแบบอื่นที่สามารถหล่อเย็นผลิตภัณฑ์ในอัตราการไหลที่สูงได้ นอกจากนี้อาจนำความร้อนจากผลิตภัณฑ์ไปใช้อุ่นสารตั้งต้นเพื่อลดการใช้พลังงานในระบบ

2) สำหรับการวัดอุณหภูมิซึ่งใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ 3 จุดคือ ที่เครื่องทำความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำความร้อน ภายในอ่างเกลือหลอมเหลวและภายในท่อที่จุดต่อระหว่างชุดทำให้อุ่นล่วงหน้าทั้งสองชุดกับเครื่องปฏิกรณ์เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ผู้วิจัยเสนอว่าควรติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพิ่มอีก 3 จุดคือที่ผิวของอ่างเกลือหลอมเหลวทางออกและเข้าของชุดหล่อเย็น ซึ่งจะทำให้สามารถเขียนสมดุลความร้อนเพื่อตรวจสอบว่าการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตใช้พลังงานมากน้อยเพียงใดได้ โดยเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิควรใช้แบบที่สามารถบันทึกค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ อัตโนมัติเนื่องจากการผลิตเป็นแบบต่อเนื่อง

5.2.3 ระบบการวัดและควบคุมความแปรปรวนของความดัน

การวัดความดันในงานวิจัยทำที่ด้านทางเข้าและทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งถือว่าเพียงพอต่อการศึกษา อย่างไรก็ตามเครื่องอ่านค่าความดันควรใช้แบบบันทึกค่าที่เวลาต่างๆ อัตโนมัติเช่นเดียวกับการวัดอุณหภูมิ เพื่อให้ทราบการเปลี่ยนแปลงของความดันตลอดการทดลอง

สำหรับการควบคุมความดันในระบบทำโดยการใช้ตัวควบคุมค่าความดันที่ถูกปรับโดยผู้ทดลอง ทำให้ค่าความดันที่ได้ในการปรับแต่ละครั้งไม่แน่นอน ดังนั้นควบคุมความดันโดยการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือคอมพิวเตอร์จะช่วยลดความแปรปรวนของค่าความดันได้

5.2.4 ระบบการวัดและควบคุมอัตราการไหลของสารตั้งต้น

ในงานวิจัยนี้วัดอัตราการไหลขาเข้าที่ความดันบรรยากาศและขาออกด้วยการจับเวลาและชั่งน้ำหนัก ซึ่งทำให้อัตราการไหลที่ได้ไม่ใช่ค่าจริงตลอดการทดลอง (real time) เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์วัดอัตราการไหลที่แสดงค่าตลอดการทดลอง ซึ่งจากการสังเกตพบว่าการเปลี่ยนแปลงความดันระหว่างการทดลองมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหล โดยในขณะที่ระบบมีความดัน

เพิ่มขึ้นอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์จะลดลง และในทางตรงข้ามหากระบบมีความดันลดลงอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มมากขึ้น

สำหรับอัตราการไหลขาเข้าซึ่งเทียบมาตรฐานด้วยการจับเวลาและซึ่งน้ำหนักที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศเทียบกับความดันสูงกว่าบรรยากาศ ค่าที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกันตลอดเวลาที่ป้อนทำงานที่ความเร็วรอบเท่าเดิมและความดันคงที่ จึงอาจสมมติได้ว่าการควบคุมอัตราการไหลขาเข้าทำได้ดี แต่อัตราการไหลขาออกในกรณีที่มีความดันไม่คงที่มีความสัมพันธ์กับความดัน ดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งการวัดอัตราการไหลด้วยการจับเวลาและซึ่งน้ำหนักตลอดเวลาที่ทำการทดลองมีความยุ่งยากและความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลจะช่วยให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความดันได้มากขึ้น

5.2.5 การศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์

เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาเฉพาะข้อเท็จจริง และความเป็นไปได้ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์เท่านั้น ซึ่งในทางปฏิบัติจริงข้อมูลอีกด้านที่ต้องนำมาพิจารณาคือข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยอาจทำการศึกษาระบบการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลและไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤตเทียบกับกระบวนการที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะทำให้สามารถทราบถึงความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลและไอโซโพรพานอลภาวะเหนือวิกฤตในเชิงพาณิชย์

5.2.6 ข้อพึงระวังในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันแบบต่อเนื่อง

ในการทำปฏิกิริยาโดยใช้น้ำมันปาล์มดิบจำเป็นต้องอุ่นน้ำมันก่อนที่จะเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ให้ร้อน ($50-60^{\circ}\text{C}$) เนื่องจากน้ำมันปาล์มดิบมีลักษณะทางกายภาพที่เป็นของแข็งปนเหลว ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันก่อนที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์ได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ธุรกิจพลังงาน,กรม. รายละเอียดแนบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2552 ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 126 ตอนพิเศษ 98ง หน้า 43-45. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.doeb.go.th>. [2552, กรกฎาคม 13].

นิธิยา รัตนานพนธ์. เคมีอาหาร. กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2547.

พิสมัย เจนวนิชปัญจกุลและลลิตา อัตนโก. รอบรู้เรื่องราวไบโอดีเซล. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.), 2549.

ศิริวรรณ ศิลป์สกุลสุข, การควบคุมคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซล [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://dss.go.th>. [2550, ธันวาคม 10].

เรื่องวิทย์ สว่างแก้ว. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์ระดับนำร่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547

สมชาย ไอสวรรณ. จลนพลศาสตร์วิศวะกรรมเคมี. กรุงเทพฯ. โรงพิมพ์ใจทอง, 2532.

สุกัญญา มากมี การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยกระบวนการแบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545

ส่วนควบคุมคุณภาพ ปฏิบัติการคลัง ปตท. น้ำมัน ความรู้เกี่ยวกับปิโตรเลียม. กรุงเทพฯ, 2544 หน้า 52-60

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. สถิติการเกษตรของประเทศไทย เล่มที่ 48 พ.ศ.2549. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.oae.go.th/> [2551, มกราคม 5]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

- Ali, Y., Hanna, M. A. Alternative diesel fuel from vegetable oils, Bioresource Technology. 50 (1994): 153 – 163.
- Antolin, G., Tinaut, F.V., Briceno, Y., Castano, V. Perez, C., Ramirez, A.I. Optimisation of biodiesel production by sunflower oil transesterification. Bioresource Technology. 83 (2002): 111-114.
- AOCS Official Method, Ce – 2 – 66 , Preparation of Methyl Esters of Fatty Acids: American Oil Chemical Society. U.S.A., 1997
- ASTM Standard, D 93. Flash Point by Pensky-Martens Closed Tester : American society for testing and materials. U.S.A., 1989
- ASTM Standard, D 240. Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuel By Bomb Calorimeter : American society for testing and materials. U.S.A., 1989
- ASTM Standard, D 445. Kinematics Viscosity of Transparent and Opaque Liquids : American society for testing and materials. U.S.A., 1989
- ASTM Standard, D 976. Calculated Cetane Index of Distillate Fuels : American society for testing and materials. U.S.A., 1989
- ASTM Standard, D 1298. API Gravity of Crude Petroleum and Petroleum products by Hydrometer Method : American society for testing and materials. U.S.A., 1989
- Badal, Fuel and chemical from biomass, 1st ed. Washington: ACS Publication Division, 1996.
- Bera, D., Lahiri D., Leonardis, A.D., De, K. B., Nag, A. A Novel Azeotropic Mixture for Solvent Extraction of Edible Oils. The CIGR Ejournal. 8 (2006)
- Bunyakiat, K., Makmee, S., Sawangkeaw, R., Ngamprasertisth, S. Continuous Production of Biodiesel via Transesterification from Vegetable Oils in Supercritical Methanol. Energy & Fuel. 20 (2006): 812-817.
- Cao, W., Han, H., Zhang, J. Preparation of biodiesel from soybean oil using supercritical methanol and co-solvent. Fuel. 84 (2005): 347-351.
- Demirbas, A. Biodiesel from soybean oil in supercritical methanol with co-solvent. Energy Conversion and Management. 43 (2002): 2349-2356
- Demirbas, A. Biodiesel fuels from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical alcohol transesterification and other methods: a survey. Energy

- Conversion and Management. 44 (2003): 2093-2109.
- Demirbas, A. Production of biodiesel fuels from linseed oil using methanol and ethanol in non-catalytic SCF conditions. Biomass & Bioenergy. 33(2009): 113-118
- D'Ippolito, S.A., Yori, J.C., Iturria, M.E., Pieck, C.L., Vera, C.R. Analysis of two step noncatalytic supercritical biodiesel production process with heat recovery Energy & Fuels 21(2007): 339 - 346
- Fangrui, M., Hanna, M. Biodiesel production: a review. Bioresource Technology, 70 (1999):1-15.
- Fukuda, H., Kondo, A., Noda, H. Biodiesel fuel production by tranesterification of oils. J. Biosci Bioeng. 92 (2001): 405-416.
- Formo, M.W. Industrial Oil and Fat Products. 1st ed. New York: John Wiley and son,1997.
- Goering, C.E., Campion, R.N., Schwab, A.W., Pryde, E.H. The international conference on plant and vegetable oils as fuels. In vegetable oil fuel. American Society of Agricultural Engineers, Fargo. North Dakota. (1982): 279-286.
- Harwood, H.J. Oleochemicals as a fuels. Mechanical and economic feasibility. JAOCS. 61 (1984): 315-324.
- He, H., Wang, T., Zhu, S. Continuous production of biodiesel fuel from vegetable oil using supercritical methanol process. Fuel 86,(2007): 442 – 447
- Hui, Y.H. ed. 1996. Bailey's Industrial Oil and Fat Products Vol.2, 5th ed. New York: John Wiley and Sons.
- Lee, I., Johnson, L.A., Hammond, E.G., Use of branched-chain esters to reduce the crystallization temperature of biodiesel. Journal of the American Oil Chemists' Society 72 (1995):1155-1160.
- Kaieda, M., Samukawa, T., Matsumoto, T., Ban, T., Kondo, A., Shimada, Y., Noda, H., Nomoto, F., Ohtsuka, K., Lzumoto, E., Fakuda, H. Biodiesel fuel production from plant oil catalyzed by Rhizopus Oryzae lipase in a water containing system without an organic solvent. J. Biosci.Bioeng. 88 (1999): 627-631.
- Kasim, N.S., Tsai, T.H., Gunawan, S., Ju,Y.H. Biodiesel production from rice bean oil and supercritical methanol. Bioresource Technology. 100(2009): 2399-2403.
- Kusdiana, D.,Saka, S. Kinetic of transesterification in rapeseed oil to biodiesel fuel as treated in supercritical methanol. Fuel. 80 (2001): 693-698.

- Kusdiana, D., Saka, S. Effect of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. Bioresource Technology. 91(2004): 289-295.
- Ma, F., Hanna M. A. Biodiesel production: A review. Bioresource Technology. 70 (1999):1-15.
- Madras, G., Kolluru, C., Kumar, R. Synthesis of biodiesel in supercritical fluids. Fuel. 83 (2004): 2028-2033.
- Montgomery, D., Design and Analysis of Experiments, 5th ed. New York: John Wiley and Son Chap. 8 and 11, 2001.
- Mangesh, G., Dalai, A., Bakhshi, N. Transesferification of canola oil in mixed methanol/ethanol system and use of esters as lubricity additive. Bioresource Technology. 98(2007): 2027-2033.
- Saka, S., Kusdiana, D. Biodiesel fuel from rapessed oil as prepared in supercritical methanol. Fuel. 80 (2001): 225-231.
- Sawangkeaw, R., Bunyakiat, K., Ngamprasertsith, S. Effect of co-solvents on production of biodiesel via transesterification in supercritical methanol. Green Chemistry. 9 (2007): 679-685
- Schuchardt, U., Sercheli, R., Vargas, R.M. Transesterification of vegetable oils: a review. Journal of Brazilian Chemical Society. 9 (1998):199-210.
- Song, C., Chang, S.H., Lsao, M. Chemistry of Diesel fuels. 1sted. London: Taylor & Francis, 2000.
- Song, E.S., Lim, J.W., Lee, H.S., Lee Y.W. Transesterification of RBD palm oil using supercritical methanol. The journal of Supercritical Fluids. 44(2008): 356-363
- Srivastava, A., Pasad, R. Triglycerides-based diesel fuels. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 4 (2000): 111-133.
- Tan, K.T., Lee, K.T., Mohamed, A.R. Production of FAME by palm oil transesterification via supercritical methanol technology. Biomass & Bioenergy. 33(2009):1096-1099
- Warabi, Y., Kusdiana, D., Saka, S. Reactivity of triglycerides and fatty acids of rapeseed oil in supercritical alcohols. Bioresource Technology. 91 (2004): 283-287
- Yin, J.Z., Xiao, M., Song, J.B. Biodiesel from soybean oil in supercritical methanol with co-solvent. Energy Conversion and Management. 49 (2008): 908-912.
- Ziejewski, M., Ranfman. K.R., Schwab, A.W., Pryde, E.H. Diesel engine evaluation of

anionic sunflower oil-aqueous ethanol microemulsion. *JAOCS*. 61 (1986):1620-1626.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลองและการคำนวณ

1. การเลือกใช้ตัวทำละลายเพื่อลดความหนืดของน้ำมันพืช

ตารางที่ ก1 ความมีขั้วของตัวทำละลายชนิดต่างๆ

| Solvent | Formula | Boiling Point | Polarity | Density |
|------------------|--|---------------|----------|------------|
| n-Butanol | CH ₃ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -OH | 118 °C | 18 | 0.810 g/ml |
| Isopropanol | CH ₃ -CH(-OH)-CH ₃ | 82 °C | 18 | 0.785 g/ml |
| n-propanol | CH ₃ -CH ₂ -CH ₂ -OH | 97 °C | 20 | 0.803 g/ml |
| Ethanol | CH ₃ -CH ₂ -OH | 79 °C | 24 | 0.789 g/ml |
| Methanol | CH ₃ -OH | 65 °C | 33 | 0.791 g/ml |
| Formic Acid | H-C(=O)OH | 100 °C | 58 | 1.210 g/ml |
| H ₂ O | H-O-H | 100 °C | 80 | 0.998 g/ml |

ตารางที่ ก2 ความสามารถในการละลายของน้ำมันปาล์มในตัวทำละลายชนิดต่างๆ

| Name of solvent | Solubility of oil (%wt./wt.) at different temperatures (°C) | | | | | | | |
|---------------------------------------|--|----|----|----|----|----|----|-----|
| | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| n-Hexane | M | - | - | - | - | - | - | - |
| Ethanol | 4.4 | 21 | 42 | 74 | M | - | - | - |
| Isopropanol (IPA) | 67 | 83 | M | - | - | - | - | - |
| Ethyl acetate | M | - | - | - | - | - | - | - |
| Ethanol + Water (95.4+4.4) | 2.5 | 12 | 25 | 40 | 55 | 65 | M | - |
| Isopropanol + Water (87.8+12.2) | 35 | 50 | 60 | 65 | M | - | - | - |
| Ethyl acetate + Water (91.53+8.47) | 35 | 50 | 60 | 70 | 75 | M | - | - |

* M – miscible

D.Bera et al./ CIGR Ejournal., (2006), 1-6.

ตารางที่ ก3 สมบัติวิกฤตของสารชนิดต่างๆ

| Substance | Critical Temperature (K) | Critical Pressure (MPa) | Critical Density (g/cm ³) |
|----------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| Methane | 190.6 | 4.60 | 0.162 |
| Ethylene | 282.4 | 5.03 | 0.218 |
| Carbon dioxide | 304.2 | 7.38 | 0.468 |
| Methanol | 512.6 | 8.09 | 0.272 |
| Ethanol | 516.0 | 6.40 | 0.276 |
| Propanol | 536.7 | 5.17 | 0.275 |
| Isopropanol | 508.3 | 4.76 | 0.273 |
| Propane | 369.8 | 4.24 | 0.217 |
| Ammonia | 405.6 | 11.30 | 0.235 |
| Diethyl ether | 467.7 | 3.64 | 0.265 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. การคำนวณความอัตราส่วนการผสมไอโซโพรพานอลในน้ำมันพืช

การทดลองที่อัตราส่วนการผสมไอโซโพรพานอลในน้ำมันพืช 25 % โดยน้ำหนัก โดยเตรียมน้ำมันพืชปริมาณ 800 กรัม การคำนวณหาปริมาณไอโซโพรพานอลที่ต้องใช้ในการผสมกับน้ำมันพืชดังกล่าว

$$\% I.P.A. (w/w_{oil}) = \frac{Wt. I.P.A.}{Wt. Oil} \times 100$$

$$Wt. I.P.A. = \frac{\% I.P.A. (w/w_{oil}) \times Wt. Oil}{100}$$

$$Wt. I.P.A. = \frac{(25) \times (800)}{100} = 200 \text{ g}$$

ดังนั้นในการเตรียมอัตราส่วนการผสมไอโซโพรพานอลในน้ำมันพืช 25% โดยน้ำหนัก ต้องเตรียมน้ำมันพืช 800 กรัม ผสมกับไอโซโพรพานอล 200 กรัม



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์

1. ความหนืด

ค่าความหนืด (Viscosity, ASTM D445 Standard Test Method for kinematics Viscosity of Transparent and Opaque liquids (and the calculation of dynamic viscosity))

1. เลือกขนาดของ viscosity ให้เหมาะสมกับชนิดและความหนืดของน้ำ
2. ปรับอุณหภูมิของอ่างน้ำมันที่ใช้แช่ viscosity ให้ได้อุณหภูมิเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส
3. นำน้ำมันมากรองสิ่งสกปรกและฝุ่นละอองออกก่อนทำการทดลอง
4. ใส่น้ำมันลงใน viscometer ประมาณ $\frac{3}{4}$ ของกระเปาะด้านล่าง
5. นำ viscometer ไปแช่ในอ่างน้ำมันประมาณ 20 นาที เพื่อให้ น้ำมันมีอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส
6. ใช้ลูกยางดูดน้ำมันขึ้นมาให้พ้นขีดบนของกระเปาะแรกแล้วปล่อยลงมา
7. เริ่มจับเวลาเมื่อน้ำมันผ่านขีดล่างของกระเปาะแรก นำเวลาที่ได้มาคำนวณหาค่าความหนืด
8. ทำการทดลองอย่างน้อยสองครั้ง ค่าที่ได้ไม่ควรแตกต่างกันเกินร้อยละ 0.35 ของค่าเฉลี่ย

$$v = K \cdot t$$

เมื่อ v = Kinematic Viscosity, mm^2/s

K = ค่าคงที่ Viscometer, mm^2/s^2

t = เวลาที่ใช้, วินาที

2. ความถ่วงจำเพาะ

ค่าความถ่วงจำเพาะ (API, ASTM D1298 Standard Test Method for API Gravity of Crude Petroleum produces by Hydrometer method)

1. นำน้ำมันที่ต้องการจะทดสอบปริมาณ 500 มิลลิลิตร
2. นำกระบอกวัดปริมาตรที่มีน้ำมันบรรจุอยู่ใส่ลงในอ่างน้ำเย็นเพื่อลดอุณหภูมิให้ได้ 15.6 องศาเซลเซียส

3. นำไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer) หย่อนลงในน้ำมันซ้ำๆ ระวังอย่าให้ไฮโดรมิเตอร์กระทบกับก้นของกระบอกวัดปริมาตรและอย่าให้ผิวด้านข้างของไฮโดรมิเตอร์สัมผัสกับผนังกระบอกวัดปริมาตรด้วยเช่นกัน โดยให้ไฮโดรมิเตอร์ลอยอยู่เหนือก้นของกระบอกวัดปริมาตร แล้วอ่านตัวเลขที่ก้านไฮโดรมิเตอร์ ค่าที่อ่านคือ ค่า API

4. ทำการทดลองอย่างน้อยสองครั้ง ค่าที่ได้ไม่ควรแตกต่างกันเกิน 0.2 °API

5. ค่า °API ที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาค่า sp.gr.(ASTM D 1298) ได้โดย

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\text{Sp.Gr.60/60}^{\circ}\text{F}} - 131.5$$

6. ถ้าไม่สามารถลดอุณหภูมิของน้ำมันได้ที่ 60 ฟาเรนไฮต์ หรือ 15.6 องศาเซลเซียส ให้ลดอุณหภูมิให้ได้มากที่สุดโดยยังไม่เกิดไข จากนั้นนำค่า API ที่ได้มาคำนวณเปลี่ยนให้เป็นที่อุณหภูมิ 60 ฟาเรนไฮต์ หรือ 15.6 องศาเซลเซียส

$$\text{API}(60^{\circ}\text{F}) = (0.02(60-T)+1)*\text{API}(T)$$

$$\begin{aligned} \text{API}(60^{\circ}\text{F}) &= \text{ค่า API จากการคำนวณเปลี่ยนมาเป็นที่ 60 ฟาเรนไฮต์} \\ T &= \text{อุณหภูมิต่ำสุดที่สามารถทำได้โดยไม่เกิดไข} \\ \text{API}(T) &= \text{ค่า API ที่อุณหภูมิต่ำ} \end{aligned}$$

3. ซีเทน

ค่าซีเทน (Cetane, ASTM D 976 Standard Test Method for Calculated Cetane Index of Distillate Fuels)

หาได้โดยการคำนวณจากสมการที่ 1

$$\text{CI} = -420.34 + 0.016 G^2 + 0.192 G \log M + 65.01 (\log M)^2 - 1.809 \times 10^4 M^2 \quad (1)$$

โดย G = ค่า API

M = อุณหภูมิการกลั่น 50 เปอร์เซนต์, เคลวิน

4. จุดวาบไฟ (Flash Point)

Pensky-Martens Closed Tester (ASTM D 93 Standard Test Method for Flash Point t by Pensky-Martens Closed Tester)

1. ใส่น้ำมันตัวอย่างลงในถ้วยทองเหลืองให้พอดีกับขีดและอย่าให้มีฟองอากาศ
2. นำถ้วยทองเหลืองใส่ลงในเครื่องทดสอบ
3. เปิดเครื่อง ตั้งโปรแกรม ASTM แล้วกด Start
4. เริ่มจุดไฟทดสอบเมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเริ่มทดสอบ
5. ถ้าไฟยังไม่ติดให้ทดสอบทุกๆ 2 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเปลวไฟติด
6. เมื่อเกิดเปลวไฟขึ้น บันทึกอุณหภูมิที่อ่านได้ อุณหภูมิที่อ่านได้ คือจุดวาบไฟ
7. ทำการทดลองอย่างน้อยสองครั้ง ค่าที่ได้ไม่ควรแตกต่างกันเกิน 5 องศาเซลเซียส

5. ค่าความร้อน

ค่าความร้อน (ASTM D240 Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter)

1. เปิดเครื่องหลังเครื่องและเลือกเมนู Calorimeter Operation จากนั้นกดปุ่มให้ Heater and Pump ทำงาน (เมื่อเปิดเครื่องครั้งแรกจะใช้เวลาประมาณ 20 นาที ในการ warm up) สังเกตจากปุ่ม start ว่าเมื่อเครื่องพร้อมใช้งานแล้วไฟจะสว่างที่ปุ่ม start
2. เปิดสวิตช์เครื่อง water handling และตั้งอุณหภูมิที่ 27 องศาเซลเซียส
3. เตรียมตัวอย่างโดยชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม แล้วนำไปชั่งอย่างละเอียดในถ้วยตัวอย่าง
4. ตัด fuse wire 10 เซนติเมตร ผูกเข้ากับขั้วไฟฟ้า
5. เติมน้ำลงใน Combustion bomb ประมาณ 1 มิลลิลิตร เพื่อทำหน้าที่ละลายออกไซด์ของไนโตรเจน ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของอากาศภายใน แล้วจึงปิดฝา bomb ให้แน่น
6. เติม O_2 ลงใน Combustion bomb โดยตั้งความดันไว้ที่ 450 psi จากนั้นเชื่อมต่อตัว oxygen connection เข้ากับหัว bomb และกดปุ่ม O_2 FILL เครื่องจะทำการเติม O_2 เองโดยอัตโนมัติใช้เวลาประมาณ 1 นาที
7. เติมน้ำลงใน bucket 2000 มิลลิลิตร โดยไซของจาก pipette ที่ติดอยู่กับ water handling
8. นำ bucket วางลงในเครื่องให้ถูกต้องตรงตำแหน่งที่กำหนดไว้ จากนั้นใส่ combustion bomb ลงใน bucket สังเกตว่ามีฟองอากาศรั่วออกมาหรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศรั่วออกมา ห้ามทำ

การทดลองต่อเพราะแสดงว่า combustion bomb มีการรั่วเกิดขึ้น ให้สังเกตฟองอากาศว่ารั่วออกมาที่จุดใดแล้วทำการเปลี่ยนอะไหล่ตรงจุดนั้น

9. ทำการเชื่อมต่อสายไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้วให้ครบวงจรแล้วปิดฝาเครื่อง calorimeter

10. เลือกว่าจะทำการ determination (sample) หรือ standardization (Benzoic) จากนั้นให้กดปุ่ม start เครื่องจะตาม sample ID และน้ำหนักของสารตัวอย่างให้เราทำการป้อนค่า

11. หลังจากป้อนค่าเสร็จเครื่องจะเริ่มทำงานโดยเริ่มจากช่วง PREPERIOD เพื่อปรับปรุณอุณหภูมิให้คงที่ จากนั้นจะได้ยินเสียงสัญญาณในการ Firing และเข้าสู่ช่วง POSTPERIOD เพื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ

12. กดปุ่ม Report เพื่อแสดงผลการทดลอง

13. เปิดฝาเครื่องกรองสายไฟออกมา combustion และ bucket ออกจากเครื่อง จากนั้นเปิดวาล์วที่หัว bomb เพื่อทำการระบายความดันออก เมื่อความดันถูกระบายออกหมดแล้ว ให้เปิดฝาท่อเพื่อดูว่าตัวอย่างเผาไหม้หมดหรือไม่ ถ้าเผาไหม้ไม่หมดถือว่าการทดลองล้มเหลว นำน้ำใน bucket ใส่คืนลงใน water handling

14. ล้าง combustion bomb ถ้าต้องการไทเทรตให้นำน้ำที่ได้จากการล้างไปไทเทรตต่อ

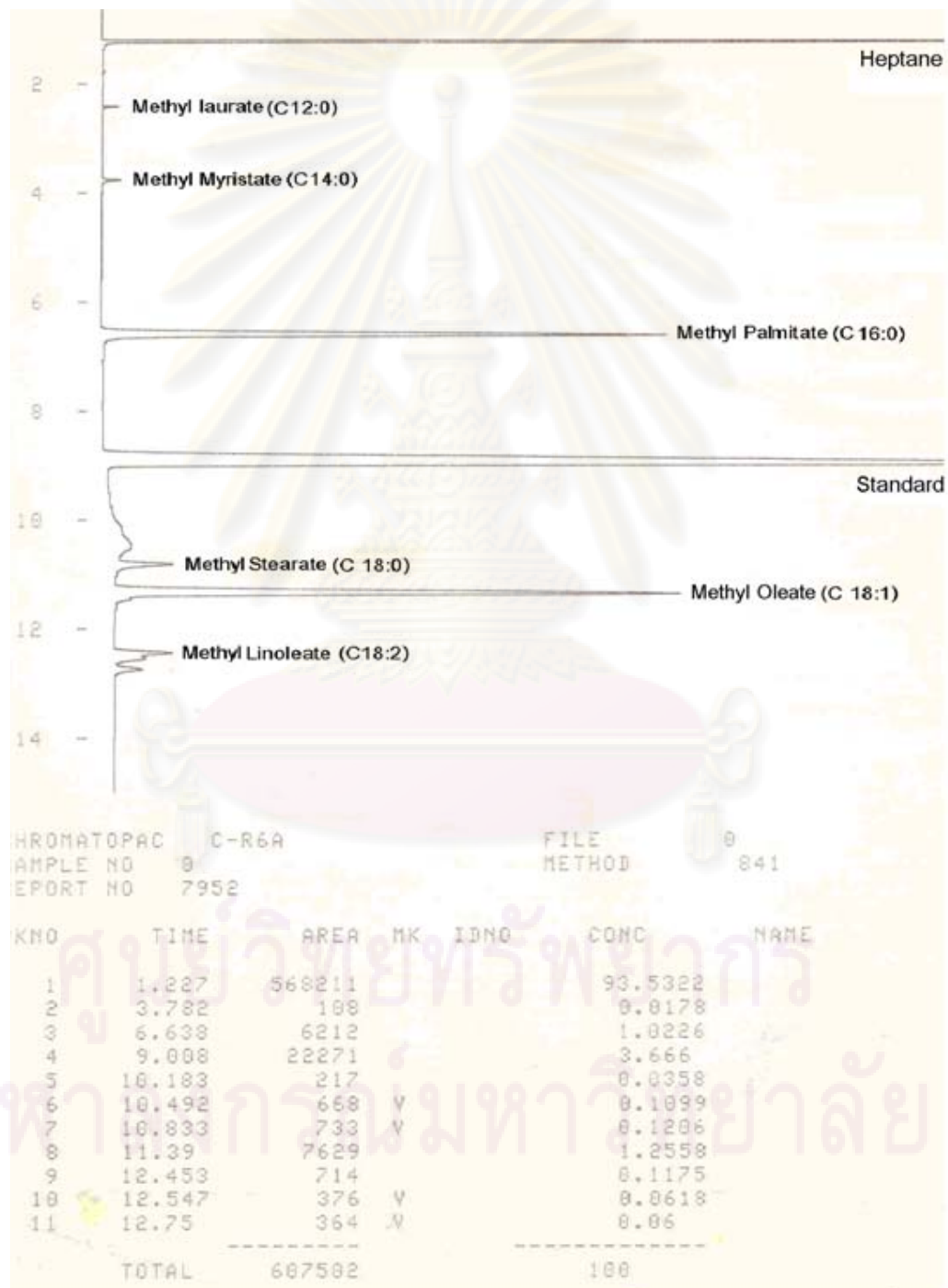
15. เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองแล้วให้ปิดสวิทช์ด้านหลังเครื่อง

ภาคผนวก ค

การหาชนิดของเมทิลเอสเทอร์

1. การหาชนิดเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์

ปริมาณองค์ประกอบกรดไขมันโดยเฉลี่ยของน้ำมันปาล์มโอเลอิน แสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ ค1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมในการวิเคราะห์ปริมาณเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์

ชนิดของเมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิดจะปรากฏตามโครมาโทแกรมโดยเมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิดจะมี retention time ไม่เท่ากัน แต่เมทิลเอสเทอร์ชนิดเดียวกันจะมี retention time เท่ากันเสมอ จึงใช้หลักการนี้ในการพิจารณาว่าพีก (peak) ที่ได้เป็นของเมทิลเอสเทอร์ชนิดใด โดยเทียบกับเมทิลเอสเทอร์มาตรฐาน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแบบ CCD

ตารางที่ ง1 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละผลได้เอสเทอร์ (A = อุณหภูมิ B= ความดัน C= อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มโอเลอินต่อเมทานอล D= ปริมาณไอโซโพรพานอล)

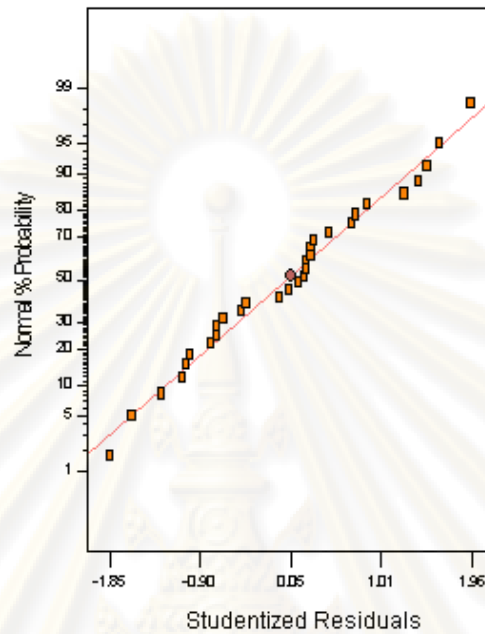
| Source | Sum of Squares | Degree of Freedom | Mean Square | F Value | P-Value |
|----------------|----------------|-------------------|-------------|----------|-----------|
| Model | 8259.464 | 14 | 589.9617 | 11.70709 | < 0.0001 |
| A | 4810.305 | 1 | 4810.305 | 95.45481 | < 0.0001* |
| B | 633.4001 | 1 | 633.4001 | 12.56907 | 0.0029* |
| C | 226.4121 | 1 | 226.4121 | 4.492881 | 0.0325* |
| D | 218.5416 | 1 | 218.5416 | 4.336699 | 0.0758** |
| A ² | 159.942 | 1 | 159.942 | 3.173859 | 0.0951** |
| B ² | 11.87765 | 1 | 11.87765 | 0.235698 | 0.6343** |
| C ² | 17.35325 | 1 | 17.35325 | 0.344355 | 0.5661** |
| D ² | 68.92404 | 1 | 68.92404 | 1.367716 | 0.2605** |
| AB | 28.33373 | 1 | 28.33373 | 0.562249 | 0.4650** |
| AC | 79.59716 | 1 | 79.59716 | 1.579511 | 0.2281** |
| AD | 2.953784 | 1 | 2.953784 | 0.058614 | 0.8120** |
| BC | 22.92052 | 1 | 22.92052 | 0.454831 | 0.5103** |
| BD | 18.04152 | 1 | 18.04152 | 0.358013 | 0.5585** |
| CD | 10.36045 | 1 | 10.36045 | 0.205591 | 0.6567** |
| Residual | 402.66 | 9 | 44.74 | | |
| Lack of Fit | 751.4031 | 14 | 53.67165 | 11.92703 | 0.2236 |
| Pure Error | 4.5 | 1 | 4.5 | | |
| Total | 9015.367 | 29 | | | |

* Significant at 95% confidence interval.

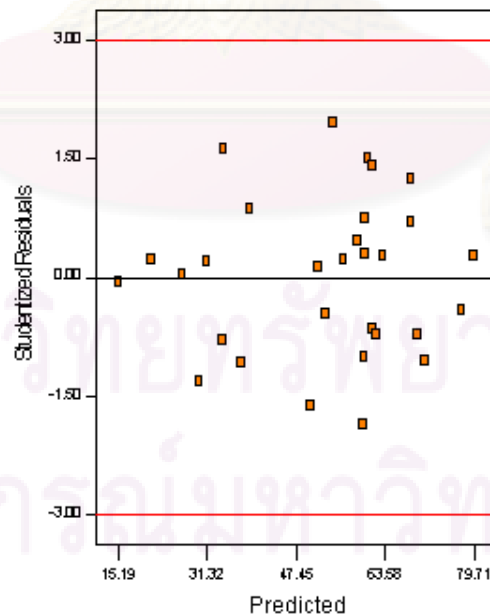
** Not significant at 95% confidence interval.

1. การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการออกแบบการทดลองแบบ CCD

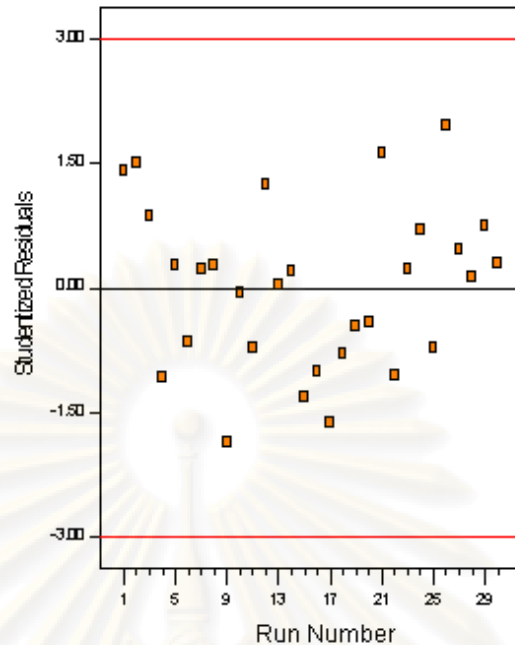
การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของสมการถดถอยสำหรับร้อยละเอสเทอร์



รูปที่ ๑1 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง (residuals) กับความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal % Probability)



รูปที่ ๑2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายจากสมการถดถอย (predicted value) กับส่วนตกค้าง (residuals)



รูปที่ ง3 ความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเก็บข้อมูล (run order) กับ ส่วนตกค้าง (residuals)

ความหมายของคำศัพท์ต่าง ๆ

- การเข้ารหัส (encoding) คือ การแปลงให้เป็นรูปแบบ (format) ที่โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะแยกแยะและนำไปใช้ได้
- ค่าการทำนาย (predictive value) คือค่าที่ทำนายจากสมการถดถอย ซึ่งเป็นค่าที่บอกโอกาสในการเกิดหรือความน่าจะเป็นในการเกิด
- ส่วนตกค้าง (residual) คือส่วนที่เหลือจากข้อมูลที่สามารถทำนายได้ โดยส่วนตกค้างหาได้จากการนำค่าจริงจากการทดลองลบด้วยค่าการทำนาย (predicted value)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

การหาภาวะที่เหมาะสมของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน

จากข้อกำหนดของการหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอินดังแสดงในตารางที่ 4.12 จะสามารถเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) และหาภาวะที่เหมาะสม ด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ได้โดยมีขั้นตอนดังนี้ [Montgomery, 2001]

1. แปลงค่าผลตอบแทนจากสมการถดถอยให้อยู่ในรูป Desirability function ย่อย

การหาภาวะที่เหมาะสมของค่าผลตอบแทนหลายๆ ค่าพร้อมกันสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมคือ การแปลงค่าผลตอบแทนจากสมการถดถอยให้อยู่ในรูป Desirability function ย่อย (d) โดยค่า Desirability function จะถูกกำหนดให้มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ในกรณีที่ค่าผลตอบแทนมีค่าตามที่ต้องการค่า Desirability function จะเท่ากับ 1 แต่ถ้าค่าผลตอบแทนมีค่าไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการค่า Desirability function จะมีค่าเท่ากับ 0

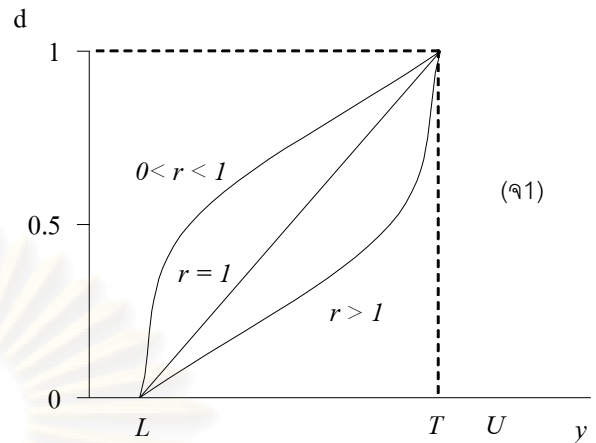
การแปลงค่าผลตอบแทนให้อยู่ในรูป Desirability function จะขึ้นอยู่กับเป้าประสงค์ (Goal) ของการหาภาวะที่เหมาะสมซึ่งแบ่งได้เป็น 4 กรณีดังนี้

- เป้าประสงค์คือค่าสูงสุด (Goal is maximum value)

ในกรณีนี้ค่า Desirability function (d) จะเริ่มเพิ่มขึ้นจากค่าขอบเขตต่ำสุด (L) ตามค่าผลตอบแทน (y) ที่เพิ่มขึ้นดังรูป ๑ โดยอัตราการเพิ่มจะขึ้นกับค่าน้ำหนักความสำคัญ (Weight of important, r) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10 ถ้าค่าผลตอบแทนจำเป็นต้องมีค่ามากที่สุดน้ำหนักความสำคัญจะทำให้ความชันของกราฟระหว่าง y และ d มีค่ามากขึ้นเมื่อค่า Desirability function มีค่าเข้าใกล้ 1 แต่ค่าสูงสุดมักจะไม่เกินค่าขอบเขตสูงสุด (U)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

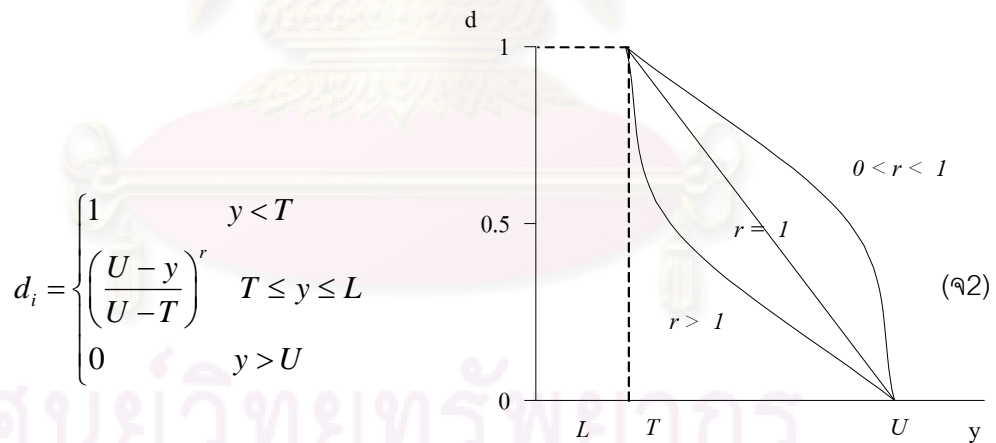
$$d_i = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r & L \leq y \leq T \\ 1 & y > T \end{cases}$$



รูปที่ ๑1 ค่า Desirability function ของ maximum value

- เป้าประสงค์คือค่าต่ำสุด (Goal is minimum value)

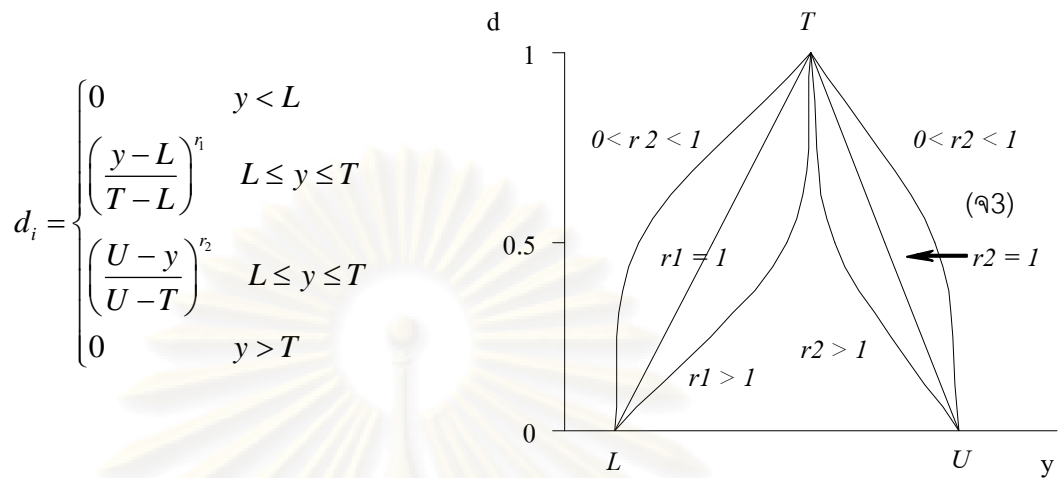
ในกรณีนี้จะตรงข้ามกับกรณีแรกกล่าวคือค่า Desirability function เริ่มเพิ่มขึ้นจากค่าขอบเขตสูงสุด (U) ตามค่าผลตอบแทนที่ลดลงดังรูป ๑2 แต่มีการอัตราการลดลงด้วยค่าน้ำหนักความสำคัญเช่นเดียวกัน



รูปที่ ๑2 ค่า Desirability function ของ minimum value

- เป้าประสงค์คือค่าเป้าหมาย (Goal is target value)

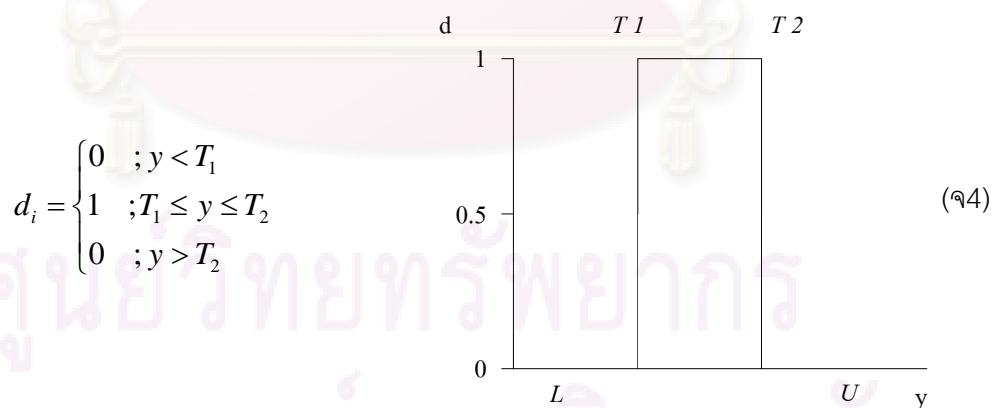
ในกรณีนี้ค่า Desirability function จะมีค่าเข้าใกล้ 1 เมื่อค่าผลตอบแทนมีค่าเข้าใกล้ค่าที่เป้าหมาย โดยค่า Desirability function จะสามารถเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายจากขอบเขตสูงสุดหรือต่ำสุดดังรูป ๑3 และมีค่าน้ำหนักความสำคัญ 2 ค่า



รูปที่ ๑3 ค่า Desirability function ของ Target value

- เป้าประสงค์คือค่าในช่วงที่ต้องการ (Goal is within range value)

ในกรณีนี้ค่า Desirability function จะมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 0 เท่านั้นโดยเมื่อค่าผลตอบสนองอยู่ในช่วงที่ต้องการค่า Desirability function จะมีค่าเท่ากับ 1 แต่ถ้าออกนอกช่วงที่ต้องการค่า Desirability function จะมีค่าเท่ากับ 0 ดังรูป ๑4 โดยเป้าหมายชนิดนี้จะถือเป็นเงื่อนไขบังคับ (Constrain) ของฟังก์ชันจุดประสงค์



รูปที่ ๑4 ค่า Desirability function ของ within range

2. รวม Desirability function ย่อยให้เป็น Overall desirability function

เมื่อแปลงผลตอบสนองให้เป็น desirability function ของแต่ละผลตอบสนองแล้ว จะรวม desirability function ด้วยการหาค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric mean) ของ desirability function ทั้งหมด และเรียกเป็น Overall desirability function (D) ตามสมการ ๑5

$$D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_n)^{1/n} = \left(\prod_{i=1}^n d_i \right)^{1/n} \quad (๑5)$$

โดยค่า Overall desirability function จะถือเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ สำหรับเงื่อนไขบังคับของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ระดับของปัจจัยและผลตอบสนองที่ต้องมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนด (Within Range) และมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนด (is equal to) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.12

3. หาค่าสูงสุดของ Overall desirability function

จากที่กล่าวมาแล้วว่าค่า desirability function จะมีค่าเข้าใกล้ 1 เมื่อค่าผลตอบสนองได้ตามเป้าประสงค์ ดังนั้นขั้นตอนนี้จะหาค่าสูงสุดของ Overall desirability function เพื่อให้ผลตอบสนองทุกค่าได้ตามเป้าประสงค์ที่ตั้งไว้

การแก้สมการของฟังก์ชันจุดประสงค์จะใช้วิธีทำซ้ำ (iteration) โดยการทดลองแทนค่าปัจจัยต่างลงในฟังก์ชันจุดประสงค์ เพื่อให้ได้ค่าสูงสุดของฟังก์ชัน วิธีทำซ้ำอาจใช้การคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Design Expert 6.0 ในการคำนวณ ทำให้ได้คำตอบของการหามภาวะที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 4.13

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววิศนี สัตยานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 30 กรกฎาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย