



การผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงแบบสองขั้นตอนด้วย
ท่อผสมสถิตแบบหมุนวน
Ethyl Ester Production from High Free Fatty Acid Mixed Crude Palm Oil
by Two-stage Circulation Process Using Static Mixer

นฤมล อินทร์ตัน
Naruemon Intarat

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

| | |
|-----------------|--|
| ชื่อวิทยานิพนธ์ | การผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงแบบ สองขั้นตอนด้วยท่อผสมสเถิตแบบหมุนวน |
| ผู้เขียน | นางสาวนฤมล อินทร์ตัน |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเครื่องกล |

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์กำพล ประทีปชัยกูร)

.....ประธานกรรมการ
(ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ)

.....
(ดร.กฤษ สมนึก)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระยุทธ ทลีวิจิตร)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์กำพล ประทีปชัยกูร)

.....กรรมการ
(ดร.กฤษ สมนึก)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(รองศาสตราจารย์กำพล ประทีปชัยกูร)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ

(นางสาวนฤมล อินทร์ตัน)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นางสาวนฤมล อินทร์ตัน)

นักศึกษา

| | |
|-----------------|--|
| ชื่อวิทยานิพนธ์ | การผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงแบบสอง ขั้นตอนด้วยท่อผสมสถิติแบบหมุนวน |
| ผู้เขียน | นางสาวนฤมล อินทร์ตัน |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเครื่องกล |
| ปีการศึกษา | 2558 |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงแบบสองขั้นตอนด้วยท่อผสมสถิติแบบหมุนวน โดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในขั้นตอนการลดกรดไขมันอิสระ และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในขั้นตอนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ด้วยเอทานอลเกรดการค้ำความบริสุทธิ์ 99.9% ทั้งสองขั้นตอน ใช้กรดซัลฟิวริกเกรดการค้ำความบริสุทธิ์ 98% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการลดกรดไขมันอิสระ และการผลิตเอทิลเอสเทอร์ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกรดการค้ำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นการทำปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนด้วยท่อผสมสถิติแบบหมุนวน เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ทดลองเป็นเครื่องขนาดนำร่องบรรจุน้ำมันปาล์มดิบเริ่มต้น 100 ลิตร มีการผสมสารทั้งหมดด้วยปั๊มสารเคมีแบบหมุนวนไหลผ่านท่อผสมสถิติ 2 ชุด ซึ่งประกอบด้วยชุดละ 7 ท่อ ความยาวแต่ละท่อ 1 เมตร ด้วยอัตราการไหล 500 ลิตรต่อชั่วโมง ทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับทั้งสองขั้นตอน เพื่อลดค่าความเป็นกรดจาก 34.5 mg KOH/g ให้มีค่าน้อยกว่า 2 mg KOH/g ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และเพื่อผลิตเอทิลเอสเทอร์ให้ได้ความบริสุทธิ์สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 96.5 %โดยน้ำหนัก โดยใช้ Response Surface Methodology (RSM) ในการศึกษาตัวแปร และใช้แผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) มีตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อการลดกรดไขมันอิสระและการผลิตเอทิลเอสเทอร์ คือ ปริมาณเอทานอล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยให้อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาคงที่ 75°C จากผลการทดลองการลดกรดไขมันอิสระด้วยเอทานอลความบริสุทธิ์ 99.9% ได้เงื่อนไขเหมาะสมที่เอทานอล 66 %โดยปริมาตร กรดซัลฟิวริก 7 %โดยปริมาตร เวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที สามารถลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบได้จากเริ่มต้น 34.5 mg KOH/g ให้เหลือ 1.35 mg KOH/g และได้สมการความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามโดยใช้ Multiple Regression กำหนดค่ากรดไขมันอิสระของน้ำมันเป็น Response จากการวิเคราะห์ให้ค่า R^2 ของสมการที่ทำนายผลการทดลองเท่ากับ 0.999 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากกราฟพื้นผิวตอบสนองและกราฟ contour ของปริมาณกรดไขมันอิสระกับเงื่อนไขการทดลองในช่วงการแปรค่าตัวแปรอิสระ เป็นสภาวะเหมาะสมที่สุดในการลดกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บวม และการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยเอทานอลเกรดการค้ำความบริสุทธิ์ 99.9% ภายใต้สภาวะเอทานอล 20 %โดยปริมาตร โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 16 g KOH/ L of oil เวลาการทำปฏิกิริยา 50 นาที ให้ความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ได้ถึง 99.577 wt.% ได้สมการ

(6)

ความสัมพันธ์ระหว่างความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระทั้ง 2 โดยใช้ Multiple Regression กำหนดค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์เป็น Response จากการวิเคราะห์ให้ค่า R^2 ของสมการที่ทำนายผลการทดลองเท่ากับ 0.971 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากกราฟพื้นผิวตอบสนองและกราฟ contour ของความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์กับเงื่อนไขการทดลองในช่วงการแปรค่าตัวแปรอิสระ เป็นสถานะเหมาะสมที่สุดในการผลิตเอทิลเอสเทอร์

| | |
|----------------------|--|
| Thesis | Ethy Ester Production from High Free Fatty Acid Mixed Crude Palm Oil by Two-stage Circulation Process Using Static Mixer |
| Author | Miss.Naruemon Intarat |
| Major Program | Mechanical Engineering |
| Academic Year | 2015 |

ABSTRACT

This research is to study the reduction of the ethyl ester production from high free fatty acids (FFA) mixed crude palm oil (MCPO) by using the two-stage circulation through the static mixer. Three reactants are the 99.9% commercial grade ethanol, the 98% commercial grade sulfuric acid (H_2SO_4) were used to reduce free fatty acid in MCPO by esterification reaction and potassium hydroxide (KOH) was used as catalyst to produce ethyl ester from palm oil by transesterification reaction. The mixture (palm oil, ethanol and catalyst) were circulated by the chemical circulating pump. In the pilot-scale of circulation process, the 500 L/hr. flow rate of mixtures were circulated through the 2-bundle tube of static mixer, which consist of 7-tube per 1-meter bundle tube. It is found that free fatty acid can be reduced to less than 2 mg KOH/g and the glycerides of MCPO were converted to 96.5 wt.% ester by using response surface methodology (RSM) in the variables and the experimental central composite design (CCD). Independent variables: amount of ethanol, amount of catalyst, reaction time and reaction temperature.

The esterification reaction variables was predicted by response surface methodology (RSM) with central composite design (CCD). It was found that the independent variables (amount of ethanol and amount of sulfuric acid) have significance for the response, with a coefficient of multiple determinations (R^2) of 0.999 with 95% confidence limit. The optimum condition for reducing the acid value of MCPO from 34.5 mg KOH/g to 1.35 mg KOH/g was found to be at 66 vol.% of commercial grade ethanol (99.9%), 7 vol.% of commercial grade sulfuric acid (98%) and reaction temperature at 75 °C within 20 minutes of reaction time. This condition was predicted by response surface methodology (RSM) with central composite design (CCD) of the transesterification reaction. The independent variables (amount of ethanol and amount of potassium hydroxide) have significance to ethyl ester conversion with a

coefficient of multiple determinations (R^2) of 0.971 with 95% confidence limit. The optimum condition for ethyl ester production was found to be at 20 vol.% of commercial grade ethanol (99.9%), 16 g KOH/ liter of oil of commercial grade potassium hydroxide and 75 °C reaction temperature. Triglyceride can be converted to ester up to 99.577 wt.% ethyl ester within 50 minutes of reaction time.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.กำพล ประทีปชัยกูร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก, ดร.กฤษ สมนึก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และ ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.ธีระยุทธ หลีวีจิตร และดร.บุญรอด สัจกุลนุกิจ ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณนิยม พรหมรัตน์ และครูปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ทุก ๆ ท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และช่วยเหลือในการจัดทำอุปกรณ์การทดลอง

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย

นฤมล อินทร์ตัน

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| สารบัญ | (10) |
| รายการตาราง | (14) |
| รายการภาพประกอบ | (16) |
| สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ | (20) |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 บทนำต้นเรื่อง | 1 |
| 1.2 การตรวจเอกสาร | 2 |
| 1.2.1 ความยั่งยืนของไบโอดีเซล | 2 |
| 1.2.2 ความหมายของเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน | 2 |
| 1.2.3 สถานการณ์เอทานอลในประเทศไทย | 3 |
| 1.2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 1.2.4.1 การศึกษาเงื่อนไขการผลิตไบโอดีเซล | 4 |
| 1.2.4.2 การศึกษาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันกรดสูงเพื่อผลิตไบโอดีเซล | 7 |
| 1.2.4.3 การผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิต | 8 |
| 1.2.4.4 การลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันค่ากรดสูงด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิต | 9 |
| 1.2.4.5 ศักยภาพของเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ | 10 |
| 1.3 วัตถุประสงค์ | 11 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 11 |
| 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย | 11 |
| 2 ทฤษฎี | 12 |
| 2.1 ปาล์มน้ำมัน | 12 |
| 2.1.1 การผลิตปาล์มน้ำมัน | 13 |
| 2.1.2 กำลังการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ | 14 |
| 2.1.3 ตลาดน้ำมันปาล์มดิบในประเทศไทย | 14 |
| 2.1.4 ความต้องการใช้น้ำมันปาล์มในประเทศไทย | 15 |
| 2.1.5 การส่งออกและนำเข้าน้ำมันปาล์ม | 15 |
| 2.1.6 ผลกระทบจากปาล์มน้ำมันต่อสิ่งแวดล้อม | 16 |
| 2.2 เอทานอล | 16 |
| 2.2.1 การผลิตเอทานอล | 17 |
| 2.2.1.1 การสังเคราะห์ทางเคมี | 17 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 2.2.1.2 การหมักโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ | 17 |
| 2.2.2 ลักษณะเฉพาะของเอทานอล | 18 |
| 2.2.3 ประโยชน์จากเอทานอล | 18 |
| 2.2.4 อันตรายจากเอทานอล | 18 |
| 2.3 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน | 19 |
| 2.4 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน | 20 |
| 2.5 ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกริยา | 21 |
| 2.5.1 ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกริยา | 21 |
| 2.5.2 ชนิดและอัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมัน | 21 |
| 2.5.3 ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้น | 21 |
| 2.5.4 อุณหภูมิในการทำปฏิกริยา | 22 |
| 2.5.5 ความรุนแรงในการผสม | 22 |
| 2.6 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ | 23 |
| 2.6.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเอกพันธ์ | 23 |
| 2.6.2 เครื่องปฏิกรณ์ของปฏิกริยาแบบวิวิธพันธ์ | 26 |
| 2.7 วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว | 27 |
| 2.7.1 การออกแบบส่วนประสมกลาง | 30 |
| 2.7.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน | 30 |
| 2.7.3 แบบจำลองการถดถอย | 31 |
| 2.7.4 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง | 31 |
| 3 อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย | 33 |
| 3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี | 33 |
| 3.1.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระ | 33 |
| 3.1.2 วัตถุประสงค์และสารเคมีในการผลิตเอทิลเอสเทอร์ | 33 |
| 3.1.3 สารเคมีในการวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดในน้ำมันลดกรด | 33 |
| 3.1.4 สารเคมีในการวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบน้ำมัน ด้วยเทคนิค thin layer chromatography/flame ionization detection | 33 |
| 3.2 อุปกรณ์การทดลอง | 35 |
| 3.2.1 ชุดเครื่องปฏิกรณ์การทดลองการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บรวม | 35 |
| 3.2.2 ชุดเครื่องปฏิกรณ์การทดลองการผลิตเอทิลเอสเทอร์ | 38 |
| 3.2.3 ชุดอุปกรณ์การไตเตรทน้ำมัน | 40 |
| 3.2.4 ชุดอุปกรณ์การล้างน้ำมัน | 40 |
| 3.2.5 ชุดอุปกรณ์การวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมัน | 40 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 3.3 การวางแผนการทดลอง | 40 |
| 3.4 วิธีดำเนินการวิจัย | 42 |
| 3.4.1 ขั้นตอนการทดลองการลดกรดไขมันอิสระ | 42 |
| 3.4.1.1 การเปรียบเทียบศักยภาพของเอทานอลแต่ละเกรดใน การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับน้ำมันปาล์มดิบ | 42 |
| 3.4.1.2 การศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการลดกรดไขมัน อิสระในน้ำมันปาล์มดิบ | 44 |
| 3.4.2 ขั้นตอนการทดลองการผลิตเอทิลเอสเทอร์ | 46 |
| 3.4.2.1 การศึกษากระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุด ปฏิกรณ์แบบใบกวน | 46 |
| 3.4.2.2 การศึกษากระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุด ปฏิกรณ์ท่อผสมสถิตแบบหมุนวน | 47 |
| 3.4.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง | 48 |
| 3.4.3.1 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระ | 48 |
| 3.4.3.2 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบในน้ำมันด้วยเทคนิค thin layer chromatography flame ionization detection | 49 |
| 3.5 การหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ | 49 |
| 3.6 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระ | 50 |
| 3.7 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตเอทิลเอสเทอร์ | 50 |
| 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล | 51 |
| 4.1 ผลการทดลองในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน | 51 |
| 4.2 ผลการทดลองในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน | 67 |
| 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ | 81 |
| 5.1 บทสรุป | 81 |
| 5.1.1 การศึกษาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดหีบรวม ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน | 81 |
| 5.1.2 การศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มด้วยเครื่อง ปฏิกรณ์ท่อผสมแบบหมุนวนโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน | 82 |
| 5.1.3 คุณภาพไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์จาก น้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงแบบสองขั้นตอนด้วยท่อผสม สถิตแบบหมุนวน | 83 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 5.1.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตเอทิลเอสเทอร์จาก น้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงแบบสองขั้นตอนด้วยท่อผสม สถิติแบบหมุนวน | 85 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 85 |
| บรรณานุกรม | 86 |
| ภาคผนวก | 91 |
| ก องค์ประกอบและคุณสมบัติของน้ำมันปาล์มดิบและสารเคมี | 92 |
| ข ตัวอย่างการคำนวณ | 95 |
| ค แบบของชุดทดลอง | 99 |
| ง การออกแบบการทดลอง | 102 |
| จ ค่าสถิติและกราฟ contour จากผลการทดลอง | 110 |
| ฉ รายงานผลการทดสอบตัวอย่างจากผลการทดลอง | 140 |
| ช เอกสารการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ | 158 |
| ประวัติผู้เขียน | 168 |

รายการตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|---|------|
| 2.1 | แสดงปริมาณกรดไขมันจากน้ำมันปาล์ม | 12 |
| 3.1 | คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบ | 34 |
| 3.2 | คุณสมบัติของเอทานอล | 34 |
| 3.3 | เงื่อนไขการทดลองในการพิจารณาเปรียบเทียบศักยภาพของเอทานอลแต่ละเกรดในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ ด้วยชุดปฏิกรณ์แบบใบกวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 2 ลิตร | 43 |
| 3.4 | เงื่อนไขการทดลองในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสถิตแบบหมุนวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร | 45 |
| 3.5 | เงื่อนไขการทดลองในการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบใบกวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 0.5 ลิตร | 47 |
| 3.6 | เงื่อนไขการทดลองในการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสถิตแบบหมุนวน ขนาดนำร่องบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร | 48 |
| 4.1 | แสดงเงื่อนไขการทดลองของการลดกรดไขมันอิสระด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% โดยชุดปฏิกรณ์แบบใบกวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 2 ลิตร | 52 |
| 4.2 | แสดงรหัสตัวแปรอิสระที่ใช้ในการศึกษาการทดลองของการลดกรดไขมันอิสระด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% โดยชุดปฏิกรณ์แบบใบกวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 2 ลิตร | 52 |
| 4.3 | แสดงผลการทดลองของการทดลองของการลดกรดไขมันอิสระด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% โดยชุดทดลองแบบใบกวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 2 ลิตร | 53 |
| 4.4 | แสดงผลผลิตของแต่ละการทดลองของเอทานอลเกรดต่าง ๆ หลังจากการแยกเฟสของการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่ปรวมโดยเครื่องปฏิกรณ์แบบ six-blade disk-turbine | 57 |
| 4.5 | แสดงแนวโน้มองค์ประกอบของแต่ละตัวอย่างในแต่ละเงื่อนไขของเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% ซึ่งถูกวิเคราะห์ด้วยวิธี TLC / FID | 60 |

รายการตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 4.6 | แสดงองค์ประกอบของน้ำมัน esterified ภายใต้เงื่อนไขที่ดีที่สุดของเกรดที่แตกต่างกันของเอทานอล | 61 |
| 4.7 | แสดงเงื่อนไขการทดลองในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร | 62 |
| 4.8 | แสดงรหัสตัวแปรอิสระที่ใช้ในการศึกษาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร | 62 |
| 4.9 | แสดงผลการทดลองของการลดกรดไขมันอิสระด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% โดยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร | 63 |
| 4.10 | แสดงเงื่อนไขการทดลองในการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุดทดลองแบบใบกวนขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 0.5 ลิตร | 68 |
| 4.11 | แสดงคุณลักษณะและองค์ประกอบของน้ำมันลดกรดตามเงื่อนไขเอทานอล 66 %โดยปริมาตร กรดซัลฟิวริก 7 %โดยปริมาตร เวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที และอุณหภูมิตลอดการทำปฏิกิริยา 75 °C โดยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน ขนาดนำร่องบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร | 73 |
| 4.12 | แสดงเงื่อนไขการทดลองในการศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน ขนาดนำร่องบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร | 74 |
| 4.13 | แสดงรหัสตัวแปรอิสระที่ใช้ในการศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน ขนาดนำร่องบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร | 74 |
| 4.14 | แสดงผลการทดลองของการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน ขนาดนำร่องบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร | 76 |
| 4.15 | แสดงผลผลิตของการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสติด | 80 |
| 5.1 | คุณสมบัติและองค์ประกอบของไบโอดีเซล | 84 |

รายการภาพประกอบ

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 1.1 | แสดงโครงสร้างทางเคมีของเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน | 3 |
| 2.1 | แสดง Ethanol straight-chain ประกอบด้วยโมเลกุลของ Hydroxyl (-OH) ที่ยึดเหนี่ยวกับอะตอมของคาร์บอน (C) | 16 |
| 2.2 | การหมักเอทานอลจากเซลลูโลส | 17 |
| 2.3 | ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน | 19 |
| 2.4 | ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน | 20 |
| 2.5 | เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล แบบกะ | 23 |
| 2.6 | เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล แบบไหลต่อเนื่อง | 24 |
| 2.7 | เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล แบบเฟดแบทช์ | 24 |
| 2.8 | Buss reactor | 25 |
| 2.9 | แสดงใบพัดชนิดต่างๆ | 25 |
| 2.10 | แสดง agitators แบบต่างๆ | 25 |
| 2.11 | แสดงลักษณะการหมุนของเครื่องกวนแบบต่างๆ ใน batch reactor | 26 |
| 2.12 | แสดง batch reactor แบบต่างๆ | 27 |
| 2.13 | ภาพ 3 มิติของผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว | 29 |
| 2.14 | ภาพ contour plot ของผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว | 29 |
| 2.15 | Central Composite Design สำหรับ 3 Factors | 30 |
| 3.1 | แสดงแผนภาพของชุดขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 0.5 ลิตร | 36 |
| 3.2 | แสดงแผนภาพและชุดทดลองของชุดขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 2 ลิตร | 36 |
| 3.3 | แผนภาพแสดงชุดปฏิกรณ์ที่ผสมสเถิตแบบหมุนวนในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บรวมขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร | 37 |
| 3.4 | ชุดปฏิกรณ์ที่ผสมสเถิตแบบหมุนวนในการทดลองการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมชนิดกรดไขมันอิสระสูง | 38 |
| 3.5 | แสดงแผนภาพของชุดขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 0.5 ลิตร | 39 |
| 3.6 | เครื่องผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มชนิดกรดไขมันอิสระสูงด้วยที่ผสมสเถิตแบบหมุนวน | 40 |
| 4.1 | แสดงค่าความเป็นกรดที่ค่าของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% และกรดซัลฟิวริกที่ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที | 55 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 4.2 | แสดงค่าความเป็นกรดที่ค่าของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% และกรดซัลฟิวริกที่ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที | 55 |
| 4.3 | แสดงค่าความเป็นกรดที่ค่าของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% และกรดซัลฟิวริกที่ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที | 56 |
| 4.4 | แสดงองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% ที่เวลาการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ | 57 |
| 4.5 | แสดงองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% ที่เวลาการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ | 58 |
| 4.6 | แสดงองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% ที่เวลาการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ | 58 |
| 4.7 | แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที | 65 |
| 4.8 | แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที | 65 |
| 4.9 | แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที | 66 |
| 4.10 | แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที | 66 |
| 4.11 | แสดงการเปรียบเทียบปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ที่สามารถลดค่าความเป็นกรดได้เท่ากับ 2 mgKOH/g ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ของการศึกษาการลดกรดไขมันอิสระ | 67 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 4.12 | แสดงตัวอย่างลักษณะน้ำมันที่ได้จากเงื่อนไขการทดลอง 1-6 และเงื่อนไขการทดลองที่ 10 ที่ไม่มีการแยกชั้นของกลีเซอรอลและเอทิลเอสเทอร์เหมือนกันทั้งหมด | 68 |
| 4.13 | แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ในตัวอย่างน้ำมันของเงื่อนไขการทดลอง เอทานอล 20 %โดยปริมาตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ +10 g/liter of oil | 69 |
| 4.14 | แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ในตัวอย่างน้ำมันของเงื่อนไขการทดลอง เอทานอล 20 %โดยปริมาตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ +12 g/liter of oil | 69 |
| 4.15 | แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ในตัวอย่างน้ำมันของเงื่อนไขการทดลอง เอทานอล 20 %โดยปริมาตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ +14 g/liter of oil | 70 |
| 4.16 | แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ในตัวอย่างน้ำมันของเงื่อนไขการทดลอง เอทานอล 23 %โดยปริมาตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ +12 g/liter of oil | 70 |
| 4.17 | แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ในตัวอย่างน้ำมันของเงื่อนไขการทดลอง เอทานอล 23 %โดยปริมาตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ +14 g/liter of oil | 71 |
| 4.18 | แสดงการเปลี่ยนแปลงของเอทิลเอสเทอร์ของน้ำมันปาล์มดิบ ต่อเวลาในการทำปฏิกิริยาด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสถิตแบบหมุนวนขนาดนำร่องบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร | 73 |
| 4.19 | แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่าง ๆ กัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที | 77 |
| 4.20 | แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่าง ๆ กัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที | 78 |
| 4.21 | แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่าง ๆ กัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที | 78 |
| 4.22 | แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่าง ๆ กัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 70 นาที | 79 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 4.23 | แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่าง ๆ กัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที | 79 |
| 4.24 | แสดงการเปรียบเทียบปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ที่สามารถแปลงเอสเทอร์ได้ 99 wt.% ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ของการศึกษการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสถิติแบบหมุนวน ขนาดนําร่องที่มีถังบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร | 80 |
| 5.1 | แสดงแผนผังสมดุลมวลเงื่อนไขที่ดีที่สุดของทั้งสองขั้นตอน ในการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม | 83 |

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

| | |
|----------------------------------|---|
| AOCS | The American Oil Chemists' Society Method Cd 3a-63 for Acid Value |
| AV | ค่ากรดไขมันอิสระ |
| C | ความสูงของใบพัดจากก้นถัง |
| CCD | central composite design |
| CD | continuous deglycerolisation (การแยกผลผลิตตัวใดตัวหนึ่งออกในระหว่างที่ปฏิกิริยากำลังดำเนินอยู่อย่างต่อเนื่อง) |
| C ₂ H ₅ OH | เอทิลแอลกอฮอล์ (เอทานอล) |
| CO | carbon monoxide (ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์) |
| CO ₂ | carbon dioxide (คาร์บอนไดออกไซด์) |
| CPKO | crude palm kernel oil (น้ำมันปาล์มเมล็ดในดิบ) |
| CPO | crude palm oil (น้ำมันปาล์มดิบ) |
| CSTR | continuous stirred tank reactor (เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง) |
| Da | เส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน |
| Dd | เส้นผ่านศูนย์กลางจานใบกวน |
| Dt | เส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวน |
| E | ethanol |
| ES | ค่าปริมาณเอสเทอร์ |
| FAEE | fatty acid ethyl ester (กรดไขมันอิสระของเอทิลเอสเทอร์) |
| FFA | free fatty acid (กรดไขมันอิสระ) |
| H | ความสูงของถังกวน |
| HC | hydro carbon (ก๊าซไฮโดรคาร์บอน) |
| H ₂ O | water |
| H ₂ SO ₄ | sulfuric acid (กรดซัลฟิวริก) |
| IPA | ไอโซโพรพานอล |
| J | ความกว้างของครีป |
| k | จำนวนตัวแปรอิสระ |
| K | potassium hydroxide |
| kHz | kilohertz (กิโลเฮิร์ตซ์) |
| KM | kernel meal (กากเนื้อปาล์มเมล็ดใน) |
| KOCH ₃ | potassium methoxide |
| KOH | potassium hydroxide (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) |
| kpa | kilopascal |
| L | ความยาวของใบกวน |

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

| | |
|-----------------|--|
| MCPO | mixed crude palm oil (น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม) |
| MeOH | methanol (เมทานอล) |
| NaOH | sodium hydroxide (โซเดียมไฮดรอกไซด์) |
| NBB | National Biodiesel Board |
| NO _x | oxides of nitrogen (ออกไซด์ ของไนโตรเจน) |
| N_{Re} | Reynolds number |
| PBDF | petroleum-based diesel fuel (น้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม) |
| PFAD | palm fatty acid distillate (กรดไขมันปาล์ม) |
| RCOOH | free fatty acid (กรดไขมันอิสระ) |
| RCOOR' | ester |
| R'OH | alcohol |
| ROL | refined palm olein (น้ำมันปาล์มโอเลอิน) |
| RPKO | refined palm kernel oil (น้ำมันปาล์มเมล็ดในบริสุทธิ์) |
| RPO | refined palm oil (น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์) |
| RSM | response surface methodology (วิธีพื้นผิวตอบสนอง) |
| RST | refined palm stearin (ปาล์มสเตียรีน) |
| S | sulfuric acid |
| SSE | ผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน |
| SST | ผลรวมกำลังสองทั้งหมด |
| TG | ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) |
| TLC/FID | thin layer chromatography/flame ionization detection |
| vol.% | ร้อยละโดยปริมาตร |
| W | วัตต์ |
| (W) | ความกว้างของไบกวน |
| α | จุดแกน |
| β | ค่าสัมประสิทธิ์ |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

จากวิกฤติพลังงานของโลกที่ทวีความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การพยายามจัดหาพลังงานทดแทนเพื่อสร้างความมั่นคงด้านพลังงานและการพยายามพัฒนาเชื้อเพลิงสะอาดจึงเกิดขึ้น ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่ได้รับความนิยมเป็นพลังงานทางเลือกและพลังงานทดแทนที่สำคัญ เนื่องจากปัญหาสิ่งแวดล้อมและความต้องการเพิ่มศักยภาพในการผลิต ทำให้การพัฒนาและการกระจายแหล่งพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากมลพิษทางอากาศเป็นหนึ่งในปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญปัญหาหนึ่งของโลก ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม และเป็นพลังงานที่ยั่งยืนสามารถผลิตได้จากแหล่งชีวภาพทดแทน เช่น น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ และอื่น ๆ โดยทั่วไปไบโอดีเซลจะมีข้อดีกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม คือย่อยสลายได้ดีกว่า ไม่มีกำมะถัน มีความเป็นพิษต่ำ จุดวาบไฟสูง และลดการปล่อยไอเสียที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

โดยทั่วไปการผลิตไบโอดีเซลจะใช้กระบวนการผลิตแบบกะด้วยถังกวนผสม ซึ่งมีข้อดีหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแบบหมุนวนโดยใช้ท่อผสมสลับ ข้อดีของท่อผสมสลับเมื่อเปรียบเทียบกับการผสมด้วยถังกวนคือ ใช้พื้นที่ติดตั้งน้อยกว่าเพราะมีขนาดเล็ก ใช้พลังงานในการทำงานน้อยกว่า ใช้เวลาในการผสมน้อยกว่า และสะดวกในการบำรุงรักษา

มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีในการผลิตไบโอดีเซลได้สรุปว่าน้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูงจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เอสเทอร์น้อย และเกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชันทำให้เกิดสบู่มากขึ้นด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนชนิดกรดไขมันอิสระสูง จึงเลือกใช้ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันในขั้นตอนการลดกรดไขมันอิสระเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เอสเทอร์มาก และเลี่ยงการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน และเลือกใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์ม โดยทั้งสองขั้นตอนทำปฏิกิริยาภายในท่อผสมสลับแบบหมุนวนโดยใช้เอทานอล โดยทั่วไปงานวิจัยโดยส่วนใหญ่จะใช้เมทานอลในการผลิตไบโอดีเซล เพราะเมทานอลทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่า และมีราคาถูกกว่า แต่เอทานอลมีข้อดีกว่าเมทานอลคือมีความเป็นพิษน้อยกว่า และไบโอดีเซลที่ผลิตจากเอทานอลให้ค่าความร้อน ค่าซีเทน (cetane number) สูงกว่า ให้ค่าจุดขุ่นมัว (cloud point) จุดไหลเท (pour point) ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับไบโอดีเซลที่ผลิตจากเมทานอล และประเทศไทยสามารถผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบทางการเกษตรที่เพาะปลูกภายในประเทศได้ ตามรายงานสถานการณ์ราคาเอทานอลของประเทศไทย ไตรมาส 1/2558 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2558) ระบุว่าประเทศไทยมีปริมาณการผลิตเอทานอลประมาณ 3.4 ล้านลิตร/วัน และมีแนวโน้มว่ากำลังการผลิตจะสูงขึ้นเรื่อยๆ การนำเอทานอลมาผลิตไบโอดีเซลเป็นทางเลือกหนึ่งเพื่อสร้างความมั่นคงด้านพลังงานภายในประเทศ

1.2 การตรวจเอกสาร

1.2.1 ความยั่งยืนของไบโอดีเซล

คณะไบโอดีเซลแห่งชาติ (National Biodiesel Board, NBB) มุ่งมั่นที่จะพัฒนาไบโอดีเซลอย่างยั่งยืน มุ่งเน้นการบรรเทาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ ความมั่นคงทางอาหาร และความเคารพต่อทรัพยากรทางธรรมชาติ พัฒนาส่งเสริมผู้ผลิตไบโอดีเซล ให้ไบโอดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่ยั่งยืน และสร้างความมั่นใจทางด้านอุตสาหกรรม พัฒนาคุณภาพชีวิตรักษาสิ่งแวดล้อม และเสริมสร้างเศรษฐกิจ

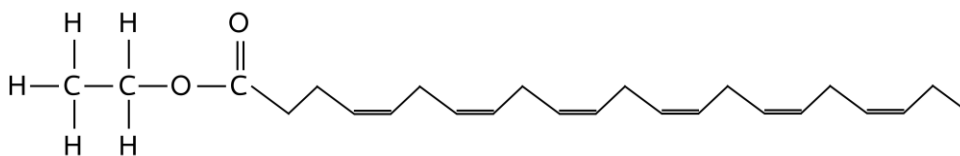
ทีมวิจัยจาก University of Idaho และกระทรวงเกษตรของสหรัฐ กล่าวว่าไบโอดีเซลมีสมมูลพลังงานสูง ทุกหน่วยพลังงานของเชื้อเพลิงฟอสซิลต้องการการผลิตไบโอดีเซลทดแทน 5.54 หน่วยพลังงาน เช่นไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองที่แหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในการเพาะปลูกถั่วเหลืองเป็นพลังงานจากแสงอาทิตย์ เนื่องจากความสมมูลของพลังงานคำนึงถึงการเพาะปลูกเก็บเกี่ยว การผลิต และการขนส่งให้กับผู้ใช้ ตรงกันข้ามกับดีเซลจากฟอสซิลที่มีความสมมูลพลังงานเชิงลบ

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีความหลากหลาย ผลิตได้จากทรัพยากรหมุนเวียน ทำให้เกิดการวิจัยและการลงทุนการพัฒนาค้นหาวัตถุดิบใหม่ ๆ ในการผลิตไบโอดีเซล เช่น สาหร่าย, สบู่ดำ, พืชพื้นที่แห้งแล้ง และวัสดุเหลือใช้ อื่น ๆ ทำให้ได้ปริมาณวัตถุดิบ และการใช้เทคโนโลยีที่เป็นนวัตกรรมเพิ่มขึ้น (National Biodiesel Board, USA: chapter 36)

1.2.2 ความหมายของเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

เอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty acid ethyl ester) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "ไบโอดีเซล" เป็นไบโอดีเซลที่ได้จากการทำปฏิกิริยากันระหว่างน้ำมันกับแอลกอฮอล์และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) ทำให้โมเลกุลเล็กลงในรูปของเอสเทอร์ของกรดไขมัน เป็นสารอินทรีย์ประเภทเอสเทอร์ที่ประกอบด้วยหมู่เอสเทอร์ 1 หมู่ (monoester) เรียกว่า "เอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน" สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมัน กับเอทานอล หรือปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับเอทานอล ดังแสดงโครงสร้างทางเคมีของเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในรูปที่ 1.1 ถ้าใช้เมทานอลในการทำปฏิกิริยาจะเรียกว่า "เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน" การผลิตเอทิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซลเกิดขึ้นจากการให้ความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงที่ไร้สารพิษและมีโมเลกุลออกซิเจนเป็นส่วนประกอบถึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในยานพาหนะจึงเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ให้ไอเสียที่สะอาดกว่าเชื้อเพลิงทั่วไป ไม่มีกำมะถันและสารแอมโมเนีย มีสมบัติการหล่อลื่นเครื่องยนต์ดี ระบบเครื่องยนต์จึงสะอาดกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินหรือดีเซลจากฟอสซิล ซึ่งเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนปิโตรเลียมดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยตรงหรือผสมกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมโดยไม่เกิดผลกระทบต่อระบบต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ดีเซลแม้จะใช้ในระยะสั้นหรือระยะยาว ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรต่อ

สิ่งแวดล้อม (สารานุกรมพลังงานทดแทน Alternative Energy Encyclopedia. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2557)



รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

1.2.3 สถานการณ์เอทานอลในประเทศไทย

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตภูมิศาสตร์ ที่มีความพร้อมในการเพาะปลูกพืชพลังงาน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนน้ำมันจากฟอสซิลได้เป็นอย่างดี ในประเทศไทยเอทานอลผลิตได้จาก มันสำปะหลัง อ้อย และกากน้ำตาล เอทานอล กลายเป็นทางออกของประเทศในด้านพลังงาน การเลือกใช้เอทานอลเพื่อผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ ช่วยลดการพึ่งพาน้ำมันจากต่างประเทศ ช่วยรักษาสิ่งแวดล้อม ลดผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน และยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชน

ตามรายงานสถานการณ์ราคาเอทานอลของประเทศไทย ไตรมาส 2/2558 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2558) ระบุว่าปริมาณการผลิตเอทานอลของไทยคิดเป็น ร้อยละ 85.7 ของกำลังการผลิต โดยผลิตประมาณวันละ 3.6 ล้านลิตร เพิ่มขึ้นจากไตรมาส 1/2558 ร้อยละ 5.6 และเพิ่มขึ้นจากไตรมาส 2/2557 ร้อยละ 33.3 เนื่องจากนำน้ำอ้อยมาผลิตเอทานอลเพิ่ม เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการ

ความต้องการใช้เอทานอลของไทยอยู่ที่ประมาณวันละ 3.6 ล้านลิตร เทียบเท่ากับปริมาณการผลิตในแต่ละวัน ความต้องการใช้เอทานอลเพิ่มขึ้นจากไตรมาส 1/2558 ร้อยละ 11.5 และเพิ่มขึ้นจากไตรมาส 2/2557 ร้อยละ 12.5 เนื่องจากประชาชนเดินทางท่องเที่ยวเพิ่มขึ้น ทำให้ไตรมาส 2/2558 ประเทศไทยไม่มีการส่งออกเอทานอลเป็นระยะเวลา 1 ปี มีปริมาณการใช้สะสมน้ำมันแก๊สโซฮอล์ประมาณ 2,266.4 ล้านลิตร และน้ำมันเบนซิน 143.7 ล้านลิตร และแนวโน้มกำลังการผลิตจะสูงขึ้นเรื่อยๆ

ราคาอ้างอิงเอทานอลของไทยไตรมาส 2/2558 เฉลี่ยลิตรละ 25.84 บาท ลดลงจากไตรมาส 1/2558 ร้อยละ 6.1 และลดจากไตรมาส 2/2557 ร้อยละ 7.0 ตามราคาน้ำมันและราคาเอทานอลของโลกที่ปรับลดลง ราคาเอทานอลไทยคาดการณ์ว่าเฉลี่ยจะอยู่ระหว่างลิตรละ 25.50-26.50 บาท ในไตรมาส 3 จะใกล้เคียงไตรมาสที่ 2 เนื่องจากผลกระทบจากภัยแล้งที่ส่งผลกระทบต่อราคาวัตถุดิบ

สำหรับต้นทุนการผลิตเอทานอลของไทยที่ผลิตจากกากน้ำตาลประมาณลิตรละ 24.60 บาท (คำนวณที่ราคากากน้ำตาลเฉลี่ยกิโลกรัมละ 3.71 บาท) เพิ่มขึ้นจากไตรมาส 1/2558 ร้อยละ 8.4 และเพิ่มขึ้นจากไตรมาส 2/2557 ร้อยละ 10.7 ตามราคากากน้ำตาลที่ปรับเพิ่มขึ้น ขณะที่ต้นทุนการผลิตจากหัวมันสดประมาณลิตรละ 23.44 บาท (คำนวณที่ราคาหัวมันเฉลี่ยกิโลกรัมละ

2.14 บาท) ลดลงจากไตรมาส 1/2558 ตามราคาหัวมันที่ปรับลดลง แต่เพิ่มขึ้นจากไตรมาส 2/2557 ร้อยละ 0.9 เนื่องจากทั้งในและต่างประเทศมีความต้องการผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังเพิ่มขึ้น

สำหรับสต็อกเอทานอลของไทยไตรมาส 2/2558 มีปริมาณ 87.6 ล้านลิตร เพิ่มขึ้นจากเดือนกุมภาพันธ์ 2558 ร้อยละ 8.6 แต่ลดลงจากไตรมาส 2/2557 ร้อยละ 13.4 โดยปริมาณสต็อกสามารถรองรับความต้องการใช้ในประเทศได้ประมาณ 24 วัน

ดังนั้นการนำเอทานอลที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศมาใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลน่าจะเป็นทางเลือกหนึ่งเพื่อการผลิตไบโอดีเซลอย่างมีศักยภาพ และยั่งยืน โดยไม่พึ่งพิงแอลกอฮอล์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมเอทานอลไทยยังมีปัญหาอุปสรรคอีกหลายประการ ซึ่งต้องพึงภาครัฐในการแก้ไข ปัญหาอุปสรรคดังกล่าวได้แก่

1. ราคาวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเอทานอล 2 ชนิด ได้แก่ อ้อยและมันสำปะหลัง มีความแตกต่างกันในแต่ละฤดูการผลิต ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตและราคาจำหน่ายเอทานอล
2. เอทานอลที่ผลิตขึ้นและจำหน่ายภายในประเทศ ต้องใช้เป็นเชื้อเพลิง ไม่มีมาตรการเปิดกว้างให้ผู้ผลิตสามารถขายให้กับลูกค้าในอุตสาหกรรมอื่นได้ ผู้ผลิตจึงมีข้อจำกัดต้องจำหน่ายให้แก่ผู้ค้าตามมาตรา 7 แห่งพระราชบัญญัติการค้าน้ำมันเชื้อเพลิงเท่านั้น
3. การส่งเสริมการใช้เอทานอลภายในประเทศ ยังขาดนโยบายเชิงรุกเพื่อกระตุ้นให้เกิดการใช้เอทานอลเพิ่มขึ้น ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว และเพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้เกี่ยวข้อง ทั้งเกษตรกร ผู้ผลิตเอทานอล บริษัทน้ำมัน ผู้ผลิตรถยนต์ สถานีจำหน่ายน้ำมัน และประชาชนผู้บริโภคทั่วไป
4. ปัญหาของระบบการขนส่ง (Logistic) ที่ไม่สะดวก ทั้งการขนส่งวัตถุดิบ การขนส่งเอทานอลและน้ำมันแก๊สโซฮอล์ไปยังสถานีผสมน้ำมันและสถานีจำหน่ายน้ำมัน และค่าใช้จ่าย ที่สูง ทำให้มีภาระต้นทุนการผลิตโดยรวมสูงเกินจำเป็น
5. เนื่องจากเอทานอล ถูกจัดให้เป็นสุราประเภทหนึ่ง อยู่ภายใต้พระราชบัญญัติการสุรา ซึ่งต้องปฏิบัติตามกฎระเบียบโดยเคร่งครัด และไม่มีพระราชบัญญัติเอทานอลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเป็นการเฉพาะ (สิริวุทธิ, 2552)

1.2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2.4.1 การศึกษาเงื่อนไขการผลิตไบโอดีเซล

การศึกษาเงื่อนไขการผลิตไบโอดีเซลได้มีนักวิจัยศึกษาอย่างมากมาย เช่น Wright et al. (1944) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งเบสกล่าวว่าไตรกลีเซอไรด์ที่ใช้ต้องมีค่าความเป็นกรด (acid value) น้อยกว่า 1 %โดยน้ำหนัก แต่ถ้าค่าความเป็นกรดมากกว่า 1 %โดยน้ำหนัก จะต้องเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อทำให้กรดไขมันอิสระเป็นกลางก่อน (neutralize) และสารตั้งต้นทั้งหมดต้องปราศจากน้ำ ถ้ามีน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสaponification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทำให้เกิดสบู่ และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้

ให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง อีกทั้งยังส่งผลถึงการแยกวัฏภาคของผลิตภัณฑ์ระหว่างเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลอีกด้วย Cvenegros and Povazanec (1995) ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมัน rapeseed โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และได้สรุปว่า น้ำมันที่ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ไม่ควรมีค่าความเป็นกรดสูงกว่า 2 mg KOH/g และปริมาณน้ำต้องไม่เกิน 0.1 % โดยน้ำหนัก ถ้ามีค่าความเป็นกรดเกินกว่า 2 mg KOH/g อาจแก้ไขได้ด้วยการเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา แต่จะทำให้สูญเสียปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ในชั้นของกลีเซอรอลสูงซึ่งซึ่งอาจทำให้เกิดเจลในชั้นของเมทิลเอสเทอร์ เป็นปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระกับเบสเกิดเป็นสบู่ซึ่งเป็นสารอิมัลซิฟายเออร์ เมื่อน้ำมันมีค่ากรดไขมันอิสระสูงจะทำให้กลีเซอรอลละลายในชั้นเมทิลเอสเทอร์มากขึ้น ส่งผลให้การแยกกลีเซอรอลด้วยแรงโน้มถ่วงทำได้ยากขึ้น ซึ่งสามารถกำจัดสบู่ของเกลือโซเดียมโดยการใส่กรดฟอสฟอริก สลายสบู่ให้เป็นกรดไขมัน Saka and Kusdiana (2001) ศึกษาผลของปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่มีผลต่อปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ในสภาวะเมทานอลเหนือวิกฤต เปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด คือ กรดซัลฟิวริก และตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบส คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระที่สูงขึ้นมีผลต่อปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรดและเบส แต่ไม่มีผลต่อกระบวนการเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต โดยปริมาณน้ำจะมีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรดมากกว่าเบส เนื่องจากจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันพืชมากขึ้น ส่วนปริมาณกรดไขมันอิสระจะมีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบสมากกว่า เนื่องจากกรดไขมันอิสระจะทำปฏิกิริยากับเบสทำให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน Suppalakpanya et al. (2010) ศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์จาก esterified น้ำมันปาล์มดิบ โดยไมโครเวฟกับการล้างแบบแห้งด้วยการดูดซับ ผลิตเอทิลเอสเทอร์จาก esterified ของน้ำมันปาล์มดิบที่มีกรดไขมันอิสระ (FFA) 1.7 % โดยน้ำหนัก โดยใช้ความร้อนจากไมโครเวฟ ศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (ปริมาณของเอทานอล ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยา) ได้ตัวแปรที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันและเอทานอลเป็น 1:8.5 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 % โดยน้ำหนักต่อน้ำมัน ภายในระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 5 นาที และใช้พลังงานไมโครเวฟ 70 วัตต์ กลีเซอรินถูกแยกออกโดยการเพิ่มกลีเซอรินบริสุทธิ์ 10 % โดยน้ำหนัก เอทิลเอสเทอร์ถูกทำให้บริสุทธิ์ด้วย 1.2 % โดยน้ำหนักของตัวดูดซับ เพื่อกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาและกลีเซอรินที่ตกค้าง กระบวนการ ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันนี้ให้ผลตอบแทน 85% มีปริมาณเอสเทอร์ 98.1% โดยน้ำหนัก และผลิตภัณฑ์เอทิลเอสเทอร์สุดท้ายตรงกับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM D6751-02 Stamenkovic et al. (2011) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชด้วยการใช้เอทานอลในการทำปฏิกิริยา กล่าวว่า ถึงแม้ว่ากระบวนการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาด้วยเมทานอลเป็นกระบวนการส่วนใหญ่ของการผลิตไบโอดีเซลในอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตาม ความเป็นพิษของเมทานอล ความเสี่ยงของการระเบิดของไอเมทานอล และความเป็นไปได้ของการใช้เอทานอลมาทดแทนเมทานอล ซึ่งเอทานอลผลิตจากทรัพยากรชีวภาพหมุนเวียน มีส่วนในการพัฒนาและผลักดันให้เกิดกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชด้วยเอทานอล และพบว่าการทำงานปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืชและเอทานอลเกิดเป็นเอทิลเอสเทอร์ให้คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเทียบเท่าเมทิลเอสเทอร์และน้ำมันดีเซล ปฏิกิริยาของการใช้เอทานอลเพื่อเป็นวัตถุดิบได้รับการศึกษาอย่าง

กว้างขวาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาด้วยเงื่อนไขการเกิดปฏิกิริยาและพัฒนาระบบตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่ กล่าวคือกระบวนการขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีและชีวภาพรวมทั้งการพัฒนาของกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และได้สรุปนำเสนอการพัฒนาการวิเคราะห์ FAEE เสนอกระบวนการใช้เอทานอลในการทำปฏิกิริยา การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ และความเป็นไปได้ในการปรับปรุงกระบวนการสังเคราะห์ FAEE สรุปได้ว่า Methanolysis จากน้ำมันพืชเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เด่นชัดที่สุดสำหรับการผลิตไบโอดีเซลอุตสาหกรรม และความเป็นไปได้ของการผลิตเอทานอลจากแหล่งชีวภาพหมุนเวียน จึงนำไปสู่การพัฒนากระบวนการ ethanolysis Qiang Li et al. (2013) ศึกษาการใช้เอทานอลในการผลิตไบโอดีเซล โดยกล่าวว่าไบโอดีเซลมีศักยภาพเพียงพอที่จะทดแทนน้ำมันดีเซล เนื่องจากความกังวลที่เพิ่มขึ้นทั่วโลก เพื่อความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม และการลดน้อยลงของทรัพยากรปิโตรเลียม ถึงแม้ว่าเอทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่ใช้กันทั่วไปในการผลิตไบโอดีเซล แต่อย่างไรก็ตามเอทานอลสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรตามธรรมชาติ Ruamporn Nikhom and Chakrit Tongurai (2014) ศึกษาพัฒนาการผลิตเอทิลเอสเทอร์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการ deglycerolisation (การแยกผลผลิตตัวใดตัวหนึ่งออกในระหว่างที่ปฏิกิริยากำลังดำเนินอยู่) อย่างต่อเนื่อง (CD) ศึกษากระบวนการแรงโน้มถ่วงบรรยากาศของของเหลวที่ไม่สามารถผสมกันได้ สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันย้อนกลับการกำจัดกลีเซอรอลในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาดำเนินด้วยความสมดุลของผลิตภัณฑ์ที่มีการแปลงได้สูง ในการศึกษาที่ใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และกำหนดอุณหภูมิคงที่ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ผลของตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการคือ อัตราส่วนของน้ำมันกับเอทานอล ความเข้มข้นของ KOH และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ผลการศึกษาพบว่าการผลิตเอทิลเอสเทอร์โดยใช้ deglycerolisation อย่างต่อเนื่อง (CD) จะได้รับความบริสุทธิ์ที่ดีและได้ผลผลิตจาก ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในขั้นตอนเดียว พบเงื่อนไขที่เหมาะสมในการศึกษาครั้งนี้คืออัตราส่วนของน้ำมันต่อเอทานอล 1:5.5 ความเข้มข้น KOH 1.2 %โดยน้ำหนัก และภายในเวลา 30 นาที ให้ปริมาณเอสเทอร์ 98.0 %โดยน้ำหนัก และผลผลิต 93.1 %โดยน้ำหนัก และ Noipin and Kumar (2015) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากการฉายรังสีคลื่นอัลตราโซนิก นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของการสังเคราะห์เอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแบบต่อเนื่องด้วยอัลตราโซนิก ออกแบบตัวแปรด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ให้ตัวแปรอิสระการพิจารณาเป็น อัตราส่วนเอทานอลต่อน้ำมัน ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ และความกว้างคลื่นอัลตราโซนิก และการตอบสนองเป็นผลผลิตเอทิลเอสเทอร์ ผลปรากฏว่าอัตราส่วนเอทานอลต่อน้ำมัน ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา และความกว้างคลื่นอัลตราโซนิกมีผลกระทบในเชิงบวกต่อผลผลิตเอทิลเอสเทอร์ ในขณะที่อุณหภูมิมีอิทธิพลเชิงลบต่อผลผลิตเอทิลเอสเทอร์ Second-order models ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อทำนายวิเคราะห์ตัวแปร และพัฒนารูปแบบการคาดการณ์ผลในช่วงการทดลอง การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีคลื่นอัลตราโซนิกเป็นการปรับปรุงกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ให้ได้อัตราผลตอบแทนเอทิลเอสเทอร์ 92% จากผลการค้นคว้างานวิจัยพบว่า การผลิตไบโอดีเซลมีการศึกษาอย่างกว้างขวางทำให้สามารถสรุปเงื่อนไขการเกิดเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบที่บวมชนิดกรดไขมันอิสระสูงได้ว่า ในขั้นตอนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเบส ค่ากรดไขมันอิสระไม่ควรเกิน 1%โดยน้ำหนัก หรือค่า

ความเป็นกรดไม่ควรเกิน 2 mg KOH/g เพราะกรดไขมันอิสระมีผลต่อการทำปฏิกิริยากับเบส จะทำให้เกิดสบู่และให้ค่าผลผลิตไบโอดีเซลต่ำ

จากการศึกษาเงื่อนไขการผลิตไบโอดีเซลจากงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมด พบว่าการผลิตไบโอดีเซลมีตัวแปรสำคัญสำหรับกระบวนการคือ ค่าความเป็นกรดของน้ำมันเริ่มต้น ชนิดของปฏิกิริยา ชนิดและปริมาณแอลกอฮอล์ ชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา

1.2.4.2 การศึกษาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันกรดสูงเพื่อผลิตไบโอดีเซล

ดีเซล

การศึกษาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันกรดสูงเพื่อผลิตไบโอดีเซลมีการศึกษาอย่างกว้างขวาง เช่น Ramadhas et al. (2004) ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดยาง ซึ่งมีค่ากรดไขมันอิสระสูง ถ้าใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน ทำให้ส่งผลกระทบต่อปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ จึงต้องผลิตด้วยวิธีสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อลดกรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยกว่า 1 %โดยน้ำหนัก และขั้นตอนที่สองใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จากการศึกษาพบว่าความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ลดลงใกล้เคียงกับดีเซล Ghadge and Raheman (2006) ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนจากน้ำมัน mahua โดยใช้วิธี response surface methodology, RSM ขั้นตอนแรกได้หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการลดกรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยกว่า 1 %โดยน้ำหนัก มีตัวแปรอิสระคือ เมทานอล กรดซัลฟิวริก และเวลาในการทำปฏิกิริยา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ เมทานอล 32 %โดยปริมาตร กรดซัลฟิวริก 1.24 %โดยปริมาตร และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1.26 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 °C และนำไปผลิตไบโอดีเซลต่อด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ เมทานอล 25 %โดยปริมาตร โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7 %โดยมวลต่อปริมาตร ได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ 98% Prateepchaikul et al. (2007) ศึกษากระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบสองขั้นตอนจากน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บรวมน ที่กำจัดยางเหนียวออกแล้ว ซึ่งทั้งสองขั้นตอนได้ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันปาล์ม 24, 30 และ 36 %โดยปริมาตร ในขั้นตอนแรกใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีความเข้มข้น 1, 3 และ 5 %โดยน้ำหนัก และในขั้นตอนที่สองใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีความเข้มข้น 2 %โดยน้ำหนัก พบว่า สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์ 99% ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมัน 30 %โดยปริมาตร และใช้กรดซัลฟิวริก 3 %โดยน้ำหนัก ในขั้นตอนการลดกรดไขมันอิสระ (ขั้นตอนแรก) และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 %โดยน้ำหนัก ในขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล (ขั้นตอนที่สอง) Tiwari et al. (2007) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการลดกรดไขมันอิสระในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยใช้วิธี RSM ขั้นตอนแรกได้หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการลดกรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยกว่า 1 %โดยน้ำหนัก มีตัวแปรอิสระคือ เมทานอล กรดซัลฟิวริก และเวลาในการทำปฏิกิริยา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ เมทานอล 28 %โดยปริมาตร กรดซัลฟิวริก 1.43 %โดยปริมาตร และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 88 นาที ที่อุณหภูมิ 60 °C และนำไปผลิตไบโอดีเซลต่อด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือเมทานอล 16 %โดยปริมาตร และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 นาที ที่อุณหภูมิ 60 °C ได้ไบโอดีเซลที่มี

ความบริสุทธิ์มากกว่า 99% Prateepchaikul et al. (2009) ได้ออกแบบและทดสอบเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บวมที่มีค่าสูงโดยกระบวนการเอสเทอร์ิฟิเคชัน ใช้ใบกวนแบบ six-blade disk turbine ทดลองโดยแปรค่าอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันอัตราส่วนกรดซัลฟิวริกต่อน้ำมัน ความเร็วรอบของใบกวน และเวลาในการทำปฏิกิริยา พบว่าที่ปริมาณเมทานอล 14 %โดยปริมาตร ปริมาณกรดซัลฟิวริก 1.7 %โดยปริมาตร และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 60 °C จะให้ค่าดีที่สุดในการลดกรดไขมันอิสระลงได้ต่ำกว่า 1 %โดยน้ำหนัก Jansri et al. (2011) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตเมทิลเอสเทอร์ จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บวม ซึ่งมีค่ากรดไขมันอิสระอยู่ในช่วง 8-14 %โดยน้ำหนัก ด้วยกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชัน เพื่อลดกรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยกว่า 1 %โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระ 10:1 ที่อุณหภูมิ 60 °C โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 0.8 %โดยน้ำหนัก ภายในเวลา 30 วินาที สามารถลดกรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยกว่า 1 %โดยน้ำหนัก และนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซลต่อในขั้นตอนที่สองได้เมทิลเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 97 %โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ 6:1 ที่อุณหภูมิ 60 °C และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 %โดยน้ำหนัก ภายในเวลา 5 นาที ทั้งสองขั้นตอนใช้ความเร็วรอบของใบกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที และ Supriyono et al. (2012) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการปรับสภาพของน้ำมันสบู่ดำที่มีกรดไขมันอิสระสูงสำหรับการผลิตไบโอดีเซล สรุปผลการวิจัยได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันสบู่ดำมีสถานะที่เหมาะสมที่สุดส่วนเอทานอลกับน้ำมันเป็น 0.62 โดยใช้ H₂SO₄ (1.7%) ที่ 54 °C ภายในเวลา 79 นาที

จากผลการศึกษางานวิจัยในหัวข้อนี้พบว่า น้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระเริ่มต้นสูงไม่สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันขั้นตอนเดียว แต่จำเป็นต้องปรับสภาพน้ำมันให้มีค่ากรดไขมันอิสระเริ่มต้นไม่เกิน 1 %โดยน้ำหนัก ด้วยปฏิกิริยา เอสเทอร์ิฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยากรด จึงสามารถนำน้ำมันที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพลดกรดนี้แล้วไปผลิตไบโอดีเซลในขั้นตอนปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันได้

1.2.4.3 การผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิต

มีงานวิจัยที่ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตอย่างกว้างขวาง เช่น Thompson and He (2007) ศึกษาความเป็นไปได้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันคาโนลา (canola oil) ด้วยท่อผสมสถิตแบบหมุนวน พบว่าเงื่อนไขที่ทำให้ค่ากลีเซอไรด์ต่ำสุด คืออุณหภูมิ 60 °C และ 1.5 %โดยน้ำหนัก ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (25 %โดยน้ำหนักที่ละลายในเมทานอล (MeOH)) ที่เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสม และสรุปว่าเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสถิตแบบหมุนวนสามารถนำมาใช้ผลิตไบโอดีเซลได้ Alamsyah et al. (2010) เปรียบเทียบท่อผสมสถิตกับการกวนผสมของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน พบว่าท่อผสมสถิตสามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ 96.5 %โดยน้ำหนัก ได้เร็วกว่าการกวนผสม ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 65 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:10.5 (TG:MeOH) และ 1 %โดยน้ำหนักของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เวลาทำปฏิกิริยา 5 นาที Qiu et al. (2010) ศึกษาเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการผสมที่มีความรุนแรง ซึ่งจากการศึกษานี้สรุปได้ว่า

เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการผสมที่รุนแรงขึ้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่าการผสมโดยทั่วไป Somnuk et al. (2013) ศึกษากระบวนการสองขั้นตอนแบบต่อเนื่องในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมชนิดกรดไขมันอิสระสูง โดยใช้ท่อผสมสถิตควบคู่กับกับอัลตราซาวนด์ความเข้มสูง ซึ่งสำหรับขั้นตอนแรก (esterification) ในการลดค่าของกรดจาก 28 mg KOH/g ให้น้อยกว่า 2 mg KOH/g ใช้เมทานอล 18 %โดยปริมาตร กรดซัลฟิวริก 2.7 %โดยปริมาตร อุณหภูมิ 60 °C และอัตราการไหลน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม 20 ลิตรต่อชั่วโมง สำหรับขั้นตอนที่สอง (transesterification) ในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ ดำเนินการภายใต้เงื่อนไขเมทานอล 18 %โดยปริมาตร โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 8 g KOH/L of oil และอัตราการไหลของน้ำมัน 20 ลิตรต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 °C ได้อัตราผลผลิตที่สูงของน้ำมัน esterified และน้ำมันไบโอดีเซลดิบภายในระยะเวลาไม่น้อยกว่า 20 วินาที ในเครื่องปฏิกรณ์คลื่นอัลตราโซนิก ให้อัตราผลตอบแทน 92.5 %โดยปริมาตรของไบโอดีเซลเมื่อเทียบกับ 100 %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ได้คุณภาพไบโอดีเซลเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานไบโอดีเซลในประเทศไทย และ Paweetida Sungwornpatansakul et al. (2013) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาผลิตไบโอดีเซลด้วยท่อผสมแบบสถิต กล่าวว่าเครื่องปฏิกรณ์หรือเครื่องผสมจำนวนมากได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา ในงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบสองเทคโนโลยีการผสม คือ เครื่องปฏิกรณ์แบบใบกวนทั่วไปและเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสถิต ประสิทธิภาพการแปลงและจลนศาสตร์แสดงให้เห็นว่าท่อผสมสถิตมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในการผสมระหว่างน้ำมันดิบและเมทานอล จนทำให้หยดของเมทานอลมีขนาดเล็กกระจายตัวในน้ำมันดิบ ซึ่งมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาและลดระยะเวลาการทำปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องของในหัวข้อนี้พบว่า การผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตเป็นการเพิ่มศักยภาพในการทำปฏิกิริยา ระหว่างแอลกอฮอล์และน้ำมันที่เกิดการผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากท่อผสมแบบสถิตมีการผสมที่รุนแรงทำให้แอลกอฮอล์เกิดการแตกตัวเป็นขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวภายในน้ำมันสร้างผิวสัมผัสที่มากขึ้นเกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้น และรวดเร็วขึ้นกว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบใบกวนธรรมดา

1.2.4.4 การลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันค่ากรดสูงด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิต

การลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันค่ากรดสูงด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิต มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย เช่น Somnuk et al. (2013) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบต่อเนื่องสำหรับการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตควบคู่ไปกับการฉายรังสีคลื่นอัลตราโซนิกความเข้มสูง กล่าวว่าปัญหาที่สำคัญของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม (MCPOs) คือปริมาณกรดไขมันอิสระ(FFA) ที่สูง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาและแปลงเป็นเอสเทอร์ที่ดีค่ากรดไขมันอิสระไม่ควรเกิน 1 %โดยน้ำหนัก หรือ 2 mg KOH/g ของค่ากรดเมื่อใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล งานนี้ศึกษาการลดลงของกรดไขมันอิสระในน้ำมัน ด้วยเมทานอล และใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตคู่กับคลื่นอัลตราโซนิก และศึกษาเงื่อนไขการทดลองโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ใช้แผนการทดลองแบบ central composite

design (CCD) ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมภายใต้สภาวะเมทานอล 18 %โดยปริมาตร กรดซัลฟิวริก 2.7 % โดยปริมาตร และอัตราการไหล 20 ลิตรต่อชั่วโมง และ Somnuk et al. (2014) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของลดกรดไขมันอิสระสูงในน้ำมันปาล์มดิบที่บวมโดยใช้กระบวนการสองขั้นตอน ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสถิต ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ศึกษาเงื่อนไขการทดลอง ผลการศึกษาได้ น้ำมันหลังกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน (ขั้นตอนแรก) ค่ากรดลดลงจาก 30 mg KOH/g เหลือ 2 mg KOH/g ภายใต้สภาวะเมทานอล 19.8 %โดยปริมาตร กรดซัลฟิวริก 2.0 %โดยปริมาตร อุณหภูมิ 60 °C ที่อัตราการไหลของน้ำมันปาล์มดิบ 40 ลิตรต่อชั่วโมง และเวลาทำปฏิกิริยา 50 นาที ที่ 5 เมตรของเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสถิต และเงื่อนไขนี้ถูกนำมาใช้ในการปรับขนาดการทำปฏิกิริยาจากปริมาณน้ำมันดิบ 5 ลิตร เป็น 60 ลิตร ซึ่งให้ค่ากรดต่ำกว่า 1 mg KOH/g เมื่อดำเนินการที่เวลา 50 นาที ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (ขั้นตอนที่สอง) ให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ 98.65 %โดยน้ำหนัก ภายใต้เงื่อนไข 20 %โดยปริมาตรของเมทานอล โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 8 g KOH/L of oil และเวลา 60 นาที ที่ 60 °C

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อนี้พบว่า การลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่มีค่ากรดสูงสามารถทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตได้

1.2.4.5 ศักยภาพของเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์

จากงานวิจัยของ Sanli et al. (2015) ในการศึกษาศักยภาพการทำงาน ของเมทิลและเอทิลเอสเทอร์ของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลในการประเมินการเผาไหม้ และลักษณะการปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล ในงานวิจัยนี้ศึกษาเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ 20 %โดยปริมาตร ผสมกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม (petroleum-based diesel fuel, PBDF) ในการฉีดโดยตรง ที่เครื่องยนต์ดีเซลทำงาน 600 นิวตันเมตร และกำหนดความเร็วเครื่องยนต์ที่ต่างกัน (1100, 1400 และ 1700 รอบต่อนาที) ผลการศึกษาพบว่า คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงเอทิลเอสเทอร์ตรงตาม EN 14214 มาตรฐานไบโอดีเซล เชื้อเพลิงเอสเทอร์มีอัตราการปล่อยเชื้อเพลิงจำเพาะสูง และมีประสิทธิภาพการระบายความร้อนกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลจากปิโตรเลียม ไบโอดีเซลเอทิลเอสเทอร์มีผลลัพธ์ที่ดีกว่าในแง่ของอัตราการปล่อยเชื้อเพลิงจำเพาะที่ให้ออกมา และประสิทธิภาพการระบายความร้อนเมื่อเทียบกับไบโอดีเซลเมทิลเอสเทอร์ เชื้อเพลิงเอสเทอร์ปล่อย CO และ HC ออกมาน้อย แต่ปล่อยก๊าซ NOx มากกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม มีการปล่อย CO₂ ของเชื้อเพลิงทดสอบได้ใกล้เคียงกัน และไบโอดีเซลเอทิลเอสเทอร์มีโปรไฟล์การปล่อยก๊าซที่ดีกว่าไบโอดีเซลเมทิลเอสเทอร์

สรุปได้ว่าเอทิลเอสเทอร์มีศักยภาพในการทำงาน การเผาไหม้ และการเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมดีกว่าเมทิลเอสเทอร์

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและสร้างระบบลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บรวมและระบบการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มชนิดกรดไขมันอิสระต่ำด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน
2. เพื่อทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน
3. เพื่อทดสอบระบบลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บรวมด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบหมุนวน
4. เพื่อทดสอบคุณภาพไบโอดีเซลที่ผลิตได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำข้อมูลที่ได้มาเป็นค่ามาตรฐานในการลดค่ากรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มได้
2. สามารถหาสภาวะของการลดกรดไขมันอิสระที่ระดับต่าง ๆ ที่เหมาะสมในน้ำมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน
3. สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มชนิดกรดไขมันอิสระต่ำด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบหมุนวนได้
4. ไบโอดีเซลที่ผลิตได้ มีคุณสมบัติสำคัญสูงกว่ามาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน และใกล้เคียงหรือเทียบเท่ามาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างระบบลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บรวมด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบหมุนวน ขนาดอัตราการผลิต 10 ลิตร/ครั้ง
2. ทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมระบบลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บรวมด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบหมุนวน ที่สามารถลดกรดไขมันอิสระของน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บรวมให้มีค่าต่ำกว่า 2 %โดยน้ำหนัก
3. ออกแบบและสร้างระบบผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มชนิดกรดไขมันอิสระต่ำด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบหมุนวน
4. ทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมระบบผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มชนิดกรดไขมันอิสระต่ำด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบหมุนวน โดยไบโอดีเซลที่ผลิตได้จะต้องมีค่าความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์มากกว่า 96.5 % และมีคุณสมบัติสำคัญสูงกว่ามาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน และใกล้เคียงหรือเทียบเท่ามาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ปาล์มน้ำมัน

น้ำมันปาล์ม (palm oil) เป็นน้ำมันพืช (vegetable oil) ที่ได้จากผลของต้นปาล์ม มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า อีเลอีส กินีเอ็นซิส (*Elaeis guineensis*) เป็นพืชน้ำมัน (oil crop) ซึ่งได้จากผลปาล์มน้ำมัน (palm) มีสีเหลืองส้มของแคโรทีน (carotene) น้ำมันปาล์มมีน้ำมันร้อยละ 56 ได้จากผลปาล์ม 2 ส่วนคือ คือส่วนที่เป็นเนื้อของผลปาล์มซึ่งอยู่ระหว่างเปลือกกับกะลา และจากส่วนของเอ็นโดสเปิร์มซึ่งอยู่ในกะลาหรือในเมล็ด น้ำมันจากแต่ละส่วนจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน และข้อเสียของน้ำมันปาล์มคือ จะสลายตัว (hydrolyse) ได้ง่ายด้วยเอนไซม์ลิเพส (lipase) เมื่อเกิดการชำหรือการระแตกของผลปาล์มในระหว่างการเก็บเกี่ยวและการขนย้าย ทำให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) เพิ่มขึ้น และสีเหลืองส้มของแคโรทีน (carotene) จะเข้าไปปะปนทำให้ต้องกำจัดสีโดยขบวนการทำให้น้ำมันบริสุทธิ์

ผลิตภัณฑ์จากผลผลิตปาล์มแบ่งออกเป็น 8 กลุ่ม ได้แก่

1. น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil: CPO)
2. น้ำมันปาล์มเมล็ดในดิบ (Crude Palm Kernel Oil: CPKO)
3. น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Refined Palm Oil: RPO)
4. น้ำมันปาล์มเมล็ดในบริสุทธิ์ (Refined Palm Kernel Oil: RPKO)
5. น้ำมันปาล์มโอเลอิน (Refined Palm Olein: ROL)
6. ปาล์มสเตียรีน (Refined Palm Stearin: RST)
7. กรดไขมันปาล์ม (Palm Fatty Acid Distillate: PFAD)
8. กากเนื้อปาล์มเมล็ดใน (Kernel Meal: KM)

(Food Network Solution ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร, 2558)

น้ำมันปาล์มดิบถูกนำมาใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบด้วยกรดไขมัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณกรดไขมันจากน้ำมันปาล์ม (วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, 26/10/2558)

| ชนิดของกรดไขมัน | ประเภทของกรดไขมัน | ปริมาณกรดไขมัน |
|------------------------------------|----------------------|----------------|
| กรดไมริสติกอิ่มตัว C14 | อิ่มตัว | 1.0% |
| กรดปาล์มมีติกอิ่มตัว C16 | อิ่มตัว | 43.5% |
| กรดสเตียริกอิ่มตัว C18 | อิ่มตัว | 4.3% |
| กรดโอเลอิกไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว C18 | ไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว | 36.6% |
| กรดไลโนเลนิกไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน C18 | ไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน | 9.1% |
| อื่นๆ | = | 5.5% |

2.1.1 การผลิตปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชน้ำมันที่ให้ผลผลิตต่อไร่สูง และเป็นพืชที่มีต้นทุนการผลิตน้ำมันต่ำกว่าพืชชนิดอื่น จึงเป็นน้ำมันพืชสำหรับบริโภคที่ราคาถูก สามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ และนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ทั้งในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมอื่น ๆ รวมถึงการนำไปผลิตพลังงานทดแทน ปัจจุบันอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มมีมูลค่าสูงถึงประมาณ 50,000 ล้านบาท

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ภูมิประเทศอยู่บริเวณที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกปาล์มน้ำมัน ในประเทศไทยการปลูกปาล์มน้ำมันเริ่มตั้งแต่สมัยก่อนสงครามโลกครั้งที่สอง เริ่มจากปลูกประมาณพันไร่ เพื่อการค้า ต่อมามีการขยายพื้นที่การเพาะปลูกทั้งจากภาครัฐและเอกชน จน 30 ปี ที่ผ่านมา เกษตรกรรายย่อยเริ่มปลูกปาล์มอย่างจริงจังและพัฒนาเข้าสู่ระบบการค้าและอุตสาหกรรมมากขึ้น ปัจจุบันประเทศไทยเป็นหนึ่งในผู้ผลิตปาล์มน้ำมันที่ผลิตใช้ได้เพียงพอภายในประเทศ และสามารถส่งออกได้บางส่วน ในปี พ.ศ. 2554 ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันที่ให้ผลผลิตแล้วประมาณ 3.75 ล้านไร่ เพิ่มขึ้นร้อยละ 5.63 เมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2553 โดยร้อยละ 87.83 ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมดอยู่ในภาคใต้ จังหวัดสุราษฎร์ธานีมีพื้นที่ให้ผลผลิตมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 25.37 รองลงมาคือ กระบี่มีสัดส่วนร้อยละ 24.83 และชุมพรร้อยละ 19.40 นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นที่การเพาะปลูกปาล์มน้ำมันในจังหวัดอื่น ๆ มีแนวโน้มจะขยายอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ภาคกลาง ภาคเหนือ และภาคอีสาน เช่น จังหวัดสระบุรี กาญจนบุรี ราชบุรี ฉะเชิงเทรา ระยอง เชียงราย เลย อุตรธานี นครพนม ร้อยเอ็ด นครราชสีมา สระแก้ว บุรีรัมย์ เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากโครงการพืชพลังงานที่กรมส่งเสริมการเกษตรได้ดำเนินการศึกษาทดลองเป็นเวลา 5 ปี ประกอบกับแผนพัฒนาอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์มปี 2551-2555 ขยายพื้นที่เพาะปลูกปีละ 500,000 ไร่ รวม 2.5 ล้านไร่ โครงการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต และแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี (พ.ศ. 2551-2565) โดยเฉพาะการใช้น้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบหลักเพื่อทดแทนการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศและเพื่อส่งเสริมการใช้น้ำมันไบโอดีเซล ทำให้มีเกษตรกรเริ่มปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นทั่วทุกภาค ประมาณการได้ว่าในพื้นที่ภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคอีสาน จะขยายพื้นที่ปลูก 100,000 ไร่/ปี ภาคใต้และภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะขยายพื้นที่ปลูกประมาณ 300,000 ไร่/ปี นอกจากนี้จะมีการปลูกทดแทนเฉพาะพื้นที่ภาคใต้อีกประมาณ 20,000 ไร่/ปี เพื่อรองรับยุทธศาสตร์พลังงานทดแทน และลดความเสี่ยงต่อความมั่นคงทางด้านอาหารของประเทศ

สำหรับผลผลิตในปี 2554 มีปริมาณผลปาล์มสด 9.88 ล้านตัน โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 20.19 และคิดเป็นไร่ละ 2,631 กิโลกรัม เพิ่มขึ้นร้อยละ 13.65 เมื่อเทียบกับปี 2553 แต่ผลผลิตน้ำมันปาล์มดิบค่อนข้างผันผวน โดยในปี 2554 มีปริมาณ 1.75 ล้านตัน เพิ่มขึ้นร้อยละ 35.67 จากปี 2553 หลังเผชิญกับความแปรปรวนของสภาพดินฟ้าอากาศอย่างรุนแรง ทั้งภาวะฝนแล้งในช่วงกลางปี และภาวะอุทกภัยในช่วงปลายปี โดยเฉพาะพื้นที่ภาคใต้ ซึ่งเป็นแหล่งเพาะปลูกที่สำคัญ ส่งผลให้ปริมาณผลปาล์มและน้ำมันปาล์มที่ออกสู่ตลาดลดลงถึงระดับต่ำสุดที่ประมาณ 1,287 พันตัน เป็นเหตุให้

น้ำมันปาล์มขาดตลาด และราคาปรับตัวสูงขึ้น ตั้งแต่กลางปี 2553 มาถึงต้นปี 2554 ทำให้ราคาผลปาล์มและน้ำมันปาล์มดิบในปี 2553-2554 มีความผันผวนมาก นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้น้ำมันพืชประเภทอื่น ๆ ที่เป็นสินค้าทดแทนน้ำมันปาล์ม เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน และน้ำมันรำข้าว ขาดตลาด และมีราคาเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การผลิตปาล์มน้ำมันเริ่มปรับตัวสู่ภาวะปกติตั้งแต่ช่วงครึ่งปีหลังของปี 2554 โดยปริมาณผลผลิตปาล์มที่ออกสู่ตลาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในปี 2555 เป็นผลจากยุทธศาสตร์ปาล์มน้ำมัน (พ.ศ.2551-2555) การเร่งขยายพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศสามารถขยายพื้นที่เพาะปลูกได้ประมาณ 1.3 ล้านไร่ ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา แม้ว่าค่าต่ำกว่าเป้าหมายที่วางไว้ 2.5 ล้านไร่ แต่ปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่ผลิตได้ในปัจจุบันมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นมากกว่าปริมาณการใช้ในประเทศ ทำให้ปริมาณสต็อกน้ำมันปาล์มดิบเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตั้งแต่ปลายปี 2554 ที่ประมาณ 2.5 แสนตัน ซึ่งเป็นปริมาณสต็อกที่สูงที่สุดในประวัติศาสตร์และมีปริมาณสต็อกมากกว่าระดับที่เหมาะสมถึง 1 แสนตัน

2.1.2 กำลังการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ

การเพิ่มขึ้นของจำนวนโรงสกัดน้ำมันปาล์มจากในปี 2542 ประมาณ 43 โรง จนในปัจจุบันมีประมาณ 80 โรง มีกำลังการผลิตของโรงงานรวมทั้งสิ้นประมาณ 10-12 ล้านตันผลปาล์มสดต่อปี ยังคงสูงกว่าปริมาณวัตถุดิบผลปาล์มสดที่ออกสู่ตลาดประมาณปีละ 8 ล้านตัน จากพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 3.75 ล้านไร่ ที่ให้ผลผลิตแล้ว จะเห็นว่ากำลังการผลิตของโรงสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีมากกว่าอุปทานของผลปาล์มสดที่มีอยู่ในปัจจุบันกว่าร้อยละ 50 ภาวะความไม่สมดุลระหว่างอุปสงค์และอุปทานดังกล่าวส่งผลต่อเสถียรภาพของราคาของน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งเป็นอุปสรรคในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มของประเทศไทยต่อการแข่งขันและการพัฒนา

2.1.3 ตลาดน้ำมันปาล์มดิบในประเทศไทย

อุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมไบโอดีเซล เป็นตลาดเป้าหมายของน้ำมันปาล์มในประเทศไทย ส่วนราคาน้ำมันปาล์มดิบในประเทศไทยจะพิจารณาอุปสงค์อุปทาน และอ้างอิงกับราคาตลาดมาเลเซียเป็นหลัก โดยปัจจัยหลักที่กระทบต่อราคาของน้ำมันปาล์มในตลาดมาเลเซียได้แก่

- ระดับราคาน้ำมันพืชชนิดอื่นที่ทดแทนกันได้
- ความต้องการบริโภคและปริมาณการผลิตน้ำมันปาล์มในตลาดโลก
- สภาพดินฟ้าอากาศซึ่งส่งผลกระทบต่อผลผลิตและราคาของผลปาล์มสดที่ออกสู่ตลาด
- ราคาน้ำมันปิโตรเลียม

ประเทศไทยยังไม่มี การนำเข้าผลปาล์มสดที่เป็นวัตถุดิบสำหรับโรงงาน แต่เคยมีการส่งออกเป็นบางปี ดังนั้นผลผลิตปาล์มน้ำมันเกือบทั้งหมดถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์ม และถูกใช้เป็นเมล็ดพันธุ์ในบางส่วน

ลูกค้าโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบ แบ่งเป็น 2 กลุ่มหลักได้แก่ ลูกค้าในประเทศ และลูกค้าต่างประเทศ สำหรับลูกค้าในประเทศ ได้แก่ โรงงานกลั่นน้ำมันปาล์ม ซึ่งจะนำน้ำมันปาล์มดิบที่ได้ไปกลั่นเป็นน้ำมันปาล์มบรรจุขวด น้ำมันปืบ และโรงงานผลิต

น้ำมันไบโอดีเซล น้ำมันปาล์มดิบที่ได้ อาจมีการส่งออกบ้าง ในปริมาณร้อยละ 5 ของปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่ผลิตได้ทั้งหมด ตลาดน้ำมันปาล์มดิบเป็นตลาดผู้ซื้อน้อยราย ทำให้ราคาเป็นการตกลงกันระหว่าง 3 ฝ่าย คือ โรงสกัด โรงกลั่น และกรมการค้าภายใน อำนาจต่อรองขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำมันปาล์มดิบในตลาดขณะนั้น

ปี 2554 สถานการณ์ราคาน้ำมันปาล์มดิบในประเทศเฉลี่ยอยู่ที่กิโลกรัมละ 34.15 บาท เพิ่มขึ้นร้อยละ 17.31 เมื่อเทียบกับปี 2553 ขณะที่ราคาเฉลี่ยผลปาล์มสดในประเทศอยู่ที่กิโลกรัมละ 5.37 บาท เพิ่มขึ้นร้อยละ 20.94 เมื่อเทียบกับปี 2553 อย่างไรก็ตามในปี 2548-2554 ราคาน้ำมันปาล์มดิบและผลปาล์มน้ำมันในประเทศ ปรับเปลี่ยนเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกับราคาพืชน้ำมันในตลาดโลก โดยราคาน้ำมันปาล์มดิบขายส่ง กทม. เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 14.64 ต่อปี และราคาผลปาล์มสดที่เกษตรกรขายได้เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 14.89 ต่อปี

2.1.4 ความต้องการใช้น้ำมันปาล์มในประเทศไทย

ในปี 2554 มีปริมาณน้ำมันปาล์มเพื่อการบริโภค 901,847 ตัน โดยส่วนใหญ่ร้อยละ 30 นำไปใช้ผลิตน้ำมันพืชสำหรับประกอบอาหาร (Cooking oil) รองลงมาเป็นอุตสาหกรรมอาหารคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 17 และมาการีน/ซีอิ๊วเตหนิงคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 4 และมีปริมาณน้ำมันปาล์มเพื่อผลิตไบโอดีเซล 379,657 ตัน คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 23

2.1.5 การส่งออกและนำเข้าน้ำมันปาล์ม

ปี 2554 ไทยส่งออกน้ำมันปาล์ม และผลิตภัณฑ์จากน้ำมันปาล์มต่าง ๆ เช่น ครีมเทียม เนยเทียม (Margarines) เนยขาว (Shortening) และอื่น ๆ รวมประมาณ 647,508.96 ตัน คิดเป็นมูลค่า 25,335 ล้านบาท เพิ่มขึ้นจากปี 2553 ในเชิงปริมาณร้อยละ 78.35 และเพิ่มขึ้นในเชิงมูลค่าร้อยละ 93.50 โดยผลิตภัณฑ์ส่งออกหลักที่สร้างรายได้ให้ประเทศไทยมากที่สุด ได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบร้อยละ 39.13 รองลงมาเป็นครีมเทียมคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 37.74 น้ำมันเนื้อในเมล็ดปาล์มร้อยละ 8.40 และเศษของน้ำมันปาล์มร้อยละ 8.40 เมื่อเทียบกับมูลค่าการส่งออกน้ำมันปาล์มและผลิตภัณฑ์ของไทยทั้งหมด โดยมีตลาดส่งออกหลัก คือ มาเลเซีย พม่า อินเดีย กัมพูชา ไต้หวัน และจีน ปี 2554 ประเทศไทยนำเข้าน้ำมันปาล์มและผลิตภัณฑ์น้ำมันปาล์มรวม 151,994.76 ตัน เป็นมูลค่า 7,366 ล้านบาท เพิ่มขึ้นในเชิงปริมาณร้อยละ 149.78 และเพิ่มขึ้นในเชิงมูลค่าร้อยละ 177.57 เป็นผลจากการขยายการนำเข้าโดย มาเลเซีย อินโดนีเซีย และจีน ซึ่งเป็นตลาดนำเข้าหลัก

ปี 2555 สถานการณ์ปาล์มน้ำมันมีความผันผวนค่อนข้างมาก ในช่วงต้นปีหลายฝ่ายคาดการณ์ว่าปาล์มน้ำมันจะมีผลผลิตออกมากตั้งแต่ช่วงเดือนเมษายนเป็นต้นไป จึงมีการส่งออกมาก แต่ในความเป็นจริงกลับไม่มีผลผลิตมากอย่างที่คาดการณ์ไว้ ทำให้ช่วงกลางปีกระทรวงพาณิชย์ได้มีการขออนุมัติการนำเข้าน้ำมันปาล์มจากคณะรัฐมนตรี จำนวน 40,000 ตัน และมีการนำเข้าในเดือน พฤษภาคม, สิงหาคม และ กันยายน 2555 รวมนำเข้าทั้งสิ้น 40,056 ตัน โดยในช่วงปลายปี 2555 ผลผลิตปาล์มน้ำมันในประเทศออกสู่ตลาดเป็นจำนวนมาก ประกอบกับราคาน้ำมันปาล์มดิบในตลาดโลกมีราคาตกต่ำ ส่งผลให้ผู้ประกอบการไม่สามารถส่งออกน้ำมันปาล์มดิบเพื่อระบายสต็อก

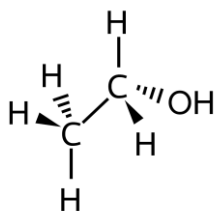
น้ำมันปาล์มภายในประเทศได้ และทำให้ระดับสต็อกน้ำมันปาล์มดิบในระบบมีสูงกว่า 3 แสนตันตั้งแต่เดือนตุลาคม 2555 โดยในเดือนกุมภาพันธ์ 2556 สต็อกน้ำมันปาล์มอยู่ที่ 386,000 ตัน ในขณะที่ราคาผลปาล์มทะเลที่เกษตรกรขายได้มีราคาตกลงตามลำดับ โดยในเดือนเมษายน 2556 ราคาเฉลี่ยอยู่ที่ 3.47 บาท/กก. (กระทรวงพลังงาน, 2558)

2.1.6 ผลกระทบจากปาล์มน้ำมันต่อสิ่งแวดล้อม

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากวัตถุดิบเหลือใช้จากกระบวนการผลิตของน้ำมันปาล์มถือว่าน้อยมาก ในกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ในโรงงานนั้นมีวัตถุดิบหลักคือ น้ำมันปาล์มดิบร้อยละ 85 ของต้นทุนการผลิต ซึ่งสามารถผลิตได้เป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ และผลพลอยได้ของผลิตภัณฑ์ก็สามารถนำมาปรับปรุงเปลี่ยนแปลงและพัฒนาขายเป็นสินค้าได้ สำหรับของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต เช่น กากเส้นใยและกะลาปาล์ม โรงงานก็สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ ส่วนทะเลปาล์มเปล่าก็สามารถนำไปขายหรือแจกฟรีให้เกษตรกรนำไปเพาะเห็ดได้ นอกจากนี้โรงงานสามารถนำสไลด์เค้กและซี้เข้าไปหมักหรือใช้เป็นปุ๋ย อย่างไรก็ตาม กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบอาจก่อให้เกิดฝุ่นและควัน ที่เกิดจากการสันดาปของกระบวนการผลิตตามปกติ ด้านมลภาวะทางน้ำ โรงงานส่วนใหญ่ได้มีการวางแผนการจัดการระบบบำบัดน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิต โดยมีการนำน้ำ Condensate จากทุกส่วนของโรงงานกลับมาใช้ ซึ่งสามารถลดการใช้น้ำที่ต้องเติมไปในกระบวนการผลิตและเป็นการลดปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้น ติดตั้งระบบดักไขมันและตะกอน เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียก่อนปล่อยสู่ระบบบำบัด นอกจากนี้ โรงงานหลายแห่งมีโครงการผลิตกระแสไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพด้วย (ศูนย์วิจัยเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, 26/10/2558)

2.2 เอทานอล

เอทานอล (Ethanol) หรือ เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) หรือเกรนแอลกอฮอล์ (Grain alcohol) หรือ แอลกอฮอล์ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ต่ออยู่กับสายโซ่ของไฮโดรคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 2.1 มีสูตรทางเคมีคือ C_2H_5OH เอทานอลเป็นของเหลวไม่มีสี ไวไฟ ละลายน้ำได้ดี และมีกลิ่นเฉพาะตัว เอทานอลใช้เป็นตัวทำละลายและเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารเคมีได้มากมายในหลาย ๆ อุตสาหกรรม



รูปที่ 2.1 แสดง Ethanol straight-chain ประกอบด้วยโมเลกุลของ Hydroxyl (-OH) ที่ยึดเหนี่ยวกับอะตอมของคาร์บอน (C)

2.2.1 การผลิตเอทานอล

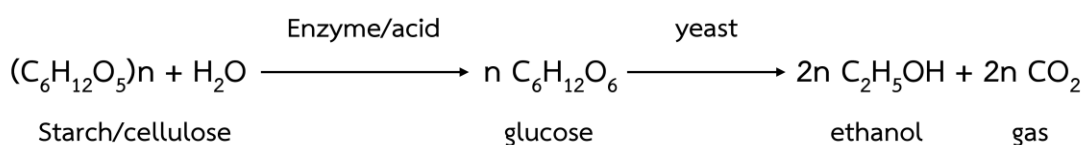
การผลิตเอทานอลสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

2.2.1.1 การสังเคราะห์ทางเคมี

การสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical Synthesis) โดยใช้เอทิลีน (Ethylene) ที่เป็นผลผลิตพลอยได้จากปิโตรเลียมเป็นวัตถุดิบ เอทานอลที่ผลิตโดยวิธีนี้ไม่สามารถนำมาบริโภคได้ เราเรียกว่าเอทานอลสังเคราะห์ (synthetic ethanol) เป็นกระบวนการไฮเดรชันของเอทิลีน (hydration of ethylene) บนตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด ที่อุณหภูมิและความดันสูง

2.2.1.2 การหมักโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์

การหมักโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ (Yeast Fermentation) เป็นการผลิตจากกระบวนการทางชีวเคมี โดยเชื้อยีสต์ จะใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นอาหารและเปลี่ยนเป็นเอทานอลโดยผ่านกระบวนการไกลโคไลซิส (Glycolysis) ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยใช้วัตถุดิบที่มีน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทได้แก่ วัตถุดิบประเภทน้ำตาล เช่น อ้อยและกากน้ำตาล วัตถุดิบประเภทแป้ง เช่น มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวโพด และอื่นๆ และประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic material) ที่ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เช่น ฟางข้าว กากอ้อย และซังข้าวโพด เป็นต้น ดังรูปที่ 2.2 เป็นกระบวนการหมักซึ่งเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเป็นเอทานอล จุลินทรีย์ เราเรียก เอทานอลนี้ว่า ไบโอะเอทานอล (bio - ethanol) (องค์การสุรา กรมสรรพสามิต สังกัดกระทรวงการคลัง)



รูปที่ 2.2 การหมักเอทานอลจากเซลลูโลส

เอทานอลที่ผลิตได้ทั่วโลกร้อยละ 98 ได้จากกระบวนการหมักคาร์โบไฮเดรตประเภทแป้งและน้ำตาล ด้วยยีสต์สายพันธุ์ซึ่งย่อยเฉพาะน้ำตาลกลูโคส ฟรักโทส และซูโครส แต่เนื่องจากการใช้แป้งและน้ำตาลเป็นวัตถุดิบส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อุปทาน (supply chain) ของอุตสาหกรรมอาหาร ทำให้เกิดการแข่งขันด้านราคาวัตถุดิบกับอุตสาหกรรมพลังงาน ปัจจุบันมีงานวิจัยและพัฒนาเกิดขึ้นเพื่อใช้วัตถุดิบอื่นทดแทน และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหมัก เช่น การใช้เซลลูโลสเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเอทานอลจากเซลลูโลส การใช้จุลินทรีย์ที่สามารถเปลี่ยนน้ำตาลเพนโทสที่ได้จากเฮมิเซลลูโลสเป็นเอทานอล การพัฒนาสายพันธุ์ยีสต์ที่ทนต่อความเข้มข้นเอทานอลและความร้อนสูงกว่าสายพันธุ์ดั้งเดิม เป็นต้น (สารานุกรม พลังงานทดแทน Alternative Energy Encyclopedia, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน)

2.2.2 ลักษณะเฉพาะของเอทานอล

| | |
|----------------|--|
| สถานะ | : ของเหลวใส ไม่มีสี ระเหยง่าย และมีกลิ่นเฉพาะตัว |
| สูตร | : C_2H_5OH |
| น้ำหนักโมเลกุล | : 46.07 กรัม/โมล |
| จุดเยือกแข็ง | : $-114.1\text{ }^{\circ}C$ |
| จุดเดือด | : $78.32\text{ }^{\circ}C$ |
| จุดวาบไฟ | : $14\text{ }^{\circ}C$ |
| อุณหภูมิวิกฤต | : $243.1\text{ }^{\circ}C$ |
| ความดันวิกฤต | : 6383.48 kpa |
| ความหนาแน่น | : 0.7893 กรัม/มิลลิลิตร |
| การละลายน้ำ | : ละลายได้ดีมาก |

2.2.3 ประโยชน์จากเอทานอล

1. ใช้เป็นตัวทำละลาย (Solvent) ในอุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง ผลิตน้ำหอม และอื่นๆ

2. ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรค เช่น น้ำยาฆ่าเชื้อ

3. ใช้ผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ

4. ใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยนำเอทานอลกับน้ำมันเบนซิลออกเทน 91 ในอัตราส่วนเอทานอล 1 ส่วน กับน้ำมันเบนซิล 9 ส่วน เป็นน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนารถยนต์ให้สามารถใช้น้ำมันที่มีส่วนผสมของเอทานอล 20% เรียกว่า E20 สำหรับรถบางรุ่นสามารถใช้ น้ำมันเบนซิลที่มีส่วนผสมของเอทานอลถึง 85% เรียกว่า E85

เชื้อเพลิงเอทานอลถือเป็นพลังงานทดแทนที่สำคัญ ที่ถูกผลิตขึ้นจากการเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์ที่ถูกเก็บสะสมในพืช ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญ พืชที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลที่สำคัญคือ อ้อย มันสำปะหลังและข้าวโพด โดยเอทานอลที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา เครื่องสำอาง เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ ควรเป็นเอทานอลที่มีคุณภาพสูง มีคุณสมบัติตามเกณฑ์มาตรฐานเอทานอลเลขที่ มอก.640-2553 เล่ม 1-เอทานอลใช้ในทางเภสัชกรรม และเล่ม 2-เอทานอลใช้ในทางอุตสาหกรรม

2.2.4 อันตรายจากเอทานอล

อันตรายจากเอทานอลคุณภาพต่ำ จะมีสารปนเปื้อนที่เป็นอันตรายดังนี้

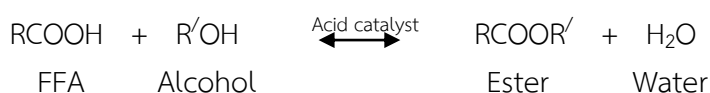
1. แอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลใหญ่ หรือ Higher Alcohols ได้แก่ Amyl alcohol, Isobutyl alcohol และ 2-Phenyl ethanol สารเหล่านี้ เป็นสารกระตุ้นอาการแพ้ ระคายเคืองระบบทางเดินหายใจ รบกวนระบบประสาท เพิ่มความดัน และทำให้ปวดศีรษะ

2. แอลดีไฮด์ เป็นสารระคายเคืองเยื่อเมือก ทำให้น้ำตาไหล ระคายเคืองระบบทางเดินหายใจ เพิ่มความดันปวดศีรษะ คลื่นเหียน อาเจียน และเป็นสารกระตุ้นอาการแพ้

3. สารฟูลออลอยด์ ได้แก่ แอลกอฮอล์โมเลกุลสูง ๆ เช่น 1-Propanol, 1-butanol, 2-butanol, 2-methyl-1-butanol, 3-methyl-1-butanol, 3-pentanol และ 1-hexanol สารเหล่านี้ เป็นสารกระตุ้นอาการแพ้เป็นสารเรงก่อมะเร็ง

2.3 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาของกรดอินทรีย์กับแอลกอฮอล์ ได้เอสเทอร์และน้ำเป็นผลผลิต ในภาวะที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดได้เองอย่างช้าๆ โดยทั่วไปนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นผันกลับได้ง่าย การใช้แอลกอฮอล์ปริมาณมากเกินไปพร้อมกับการกำจัดน้ำที่เป็นผลผลิตพลอยได้ (by-product) ด้วยโมเลกุลาร์ซีฟ (molecular sieve) หรือการกลั่นแบบสารผสมคงจุดเดือดกับทอลิวีนช่วยขับเคลื่อนของปฏิกิริยาให้เกิดเอสเทอร์สูงขึ้นในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นขั้นตอนสำคัญในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบน้ำมันพืช หรือไขสัตว์ที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง โดยผสมวัตถุดิบน้ำมันกับแอลกอฮอล์ และกรดซัลฟิวริก เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์เร็วขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ เอสเทอร์ และน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ปฏิกิริยานี้จะเปลี่ยนกรดไขมันอิสระของน้ำมันให้เป็นเอสเทอร์ หรือเป็นปฏิกิริยาที่สามารถช่วยลดกรดไขมันอิสระของน้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูง ก่อนนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน: สารานุกรมพลังงานทดแทน Alternative Energy Encyclopedia, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน)



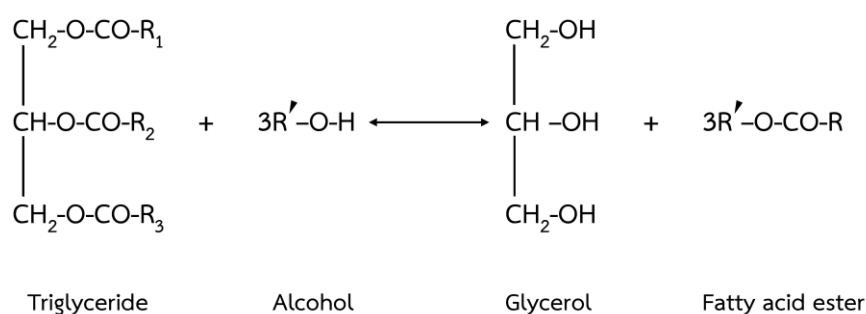
รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

ที่มา : Jansri (2007)

ปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันคือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เมื่อมีน้ำปะปนอยู่ในสารตั้งต้น ได้แก่ น้ำมันและแอลกอฮอล์ จะทำให้น้ำไปทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอรอล และกรดไขมันอิสระ ปฏิกิริยานี้เป็นสมบัติทางเคมีของการเกิดเอสเทอร์ เมื่อมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้ามีน้ำในกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันมาก จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันสูงขึ้น และจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากต้องเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยา และจะส่งผลกระทบต่ออายุเสถียรภาพของเมทิลเอสเทอร์ไปในขั้นของกลีเซอรอล (สุภาชิต, 2004; กิตติศักดิ์, 2006)

2.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

เป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายหมู่เอสเทอร์ หรือแอลกอฮอล์ไลซิส ดังแสดงในภาพที่ 2.4 เป็นการเปลี่ยนเอสเทอร์ชนิดหนึ่งเป็นเอสเทอร์อีกชนิดหนึ่งโดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ บางครั้งเรียกว่า inter-esterification (อินเทอร์-เอสเทอร์ฟิเคชัน) เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ (reversible reaction) เร่งปฏิกิริยาด้วยกรด เบส หรือเอนไซม์ไลเปส ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืช หรือไขสัตว์กับเมทานอล เป็นปฏิกิริยาสำคัญในการผลิตไบโอดีเซลชนิดเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันตามมวลสารสัมพันธ์ ไตรกลีเซอไรด์ 1 โมเลกุลทำปฏิกิริยากับเมทานอล 3 โมเลกุล ได้เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน 3 โมเลกุลและกลีเซอรอล 1 โมเลกุลเป็นผลผลิต แต่ในทางปฏิบัติต้องใช้ปริมาณเมทานอลมากเกินไป (อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์มากกว่า 3) เพื่อขยับสมดุลของปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากขึ้น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมเมทอกไซด์เร่งปฏิกิริยาได้เร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยากรดและเอนไซม์ แต่เหมาะสำหรับน้ำมันพืชหรือไขสัตว์ที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเท่านั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมของปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 60-65 °C ลักษณะของผลผลิตมีเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันแยกตัวอยู่ชั้นบนและกลีเซอรอลอยู่ชั้นล่างโดยไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ เกิดเป็นเอสเทอร์และกลีเซอรอล กระบวนการนี้เป็นที่นิยมใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพทางเชื้อเพลิง โดยเฉพาะการลดค่าความหนืดของน้ำมันพืช หรือไขมันจากสัตว์ เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถทำปฏิกิริยาที่ความดันบรรยากาศปกติ และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาไม่ควรสูงเกินกว่าจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ แต่ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นช้าถ้าไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้เร็วขึ้น ควรใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและเพิ่มปริมาณของแอลกอฮอล์ตั้งต้นให้เกินพอจากทฤษฎี เพื่อให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางผลิตภัณฑ์มากขึ้น (ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน: สารานุกรมพลังงานทดแทน Alternative Energy Encyclopedia, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน)



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

2.5 ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา

2.5.1 ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

กระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด ได้แก่ sulfuric, phosphoric, hydrochloric organic, sulfonic เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยากรดจะก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และเกิดการกัดกร่อนต่ออุปกรณ์ในการผลิตมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเบส แต่ในกรณีน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลมีค่ากรดไขมันอิสระสูงกว่า 2% โดยน้ำหนัก ควรจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด เพื่อไปทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระในน้ำมัน เพื่อเปลี่ยนให้เป็นเอสเทอร์ การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะดีกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบส เนื่องจากถ้าใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน หรือเป็นปฏิกิริยาทำให้เกิดสบู่ ส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพของเมทิลเอสเทอร์ (Saka et al., 2001)

2.5.2 ชนิดและอัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมัน

อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นระหว่างแอลกอฮอล์กับไตรกลีเซอไรด์ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อปริมาณของเมทิลเอสเทอร์และปริมาณกรดไขมันอิสระที่ลดลง จากสมการของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมัน มีอัตราส่วน 1:1 แต่เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดเอสเทอร์สูงสุดจึงมักใช้แอลกอฮอล์ที่มากเกินไปจากทฤษฎี เพื่อไปขับเคลื่อนให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางผลิตภัณฑ์มากที่สุด (Freedman et al., 1984) แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ในการทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ เอทานอล และเมทานอล ซึ่งเอทานอลได้จากการหมักพืช เศษซากพืช เพื่อเปลี่ยนแป้งจากพืชให้เป็นน้ำตาลแล้วเปลี่ยนจากน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ ส่วนเมทานอลได้จากก๊าซธรรมชาติและการสังเคราะห์ทางเคมี เป็นแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่สั้นที่สุดและเป็นของเหลวที่มีความเป็นขี้ผึ้งซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ แต่เมทานอลมีการกัดกร่อนสูงกว่าและระเหยง่ายกว่าเอทานอล ส่วนใหญ่จะใช้เมทานอลเนื่องจากมีราคาถูกกว่า และมีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมกว่า แต่เมทานอลมีอันตรายมากกว่าเอทานอล (ภูธร, 2002)

2.5.3 ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้น

ความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบหรือน้ำมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน สามารถวัดความบริสุทธิ์ได้จากกรดไขมันอิสระ และไม่ควรมีน้ำปะปน เนื่องจากถ้ามีน้ำปะปนมากจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เช่นเดียวกับเมทานอลที่ต้องมีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 98% และน้ำมันที่ผ่านกระบวนการลดกรดไขมันอิสระ ควรมีปริมาณกรดไขมันอิสระน้อยกว่า 2% โดยน้ำหนัก ถ้ามีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงจะส่งผลต่อกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ในขั้นตอนที่สองด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งจะทำการกรดไขมันอิสระไปทำปฏิกิริยากับเบส เกิดเป็นสบู่เรียกว่า ปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน (saponification)

2.5.4 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน แม้ว่าจะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง (25°C) แต่การเกิดปฏิกิริยาจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาให้สูงขึ้นปฏิกิริยาจะดำเนินไปด้านหน้าได้เร็วขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิก็เปรียบเสมือนตัวเร่งปฏิกิริยาตัวหนึ่ง จากงานวิจัยของ Ramadhas et al. (2004) ได้ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดยาง ที่มีกรดไขมันอิสระสูง ด้วยวิธีการผลิตแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกได้ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และได้แสดงข้อสังเกตเกี่ยวกับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อลดกรดไขมันอิสระของน้ำมันเมล็ดยางให้น้อยกว่า 2% ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยา คือ $45\pm 5^{\circ}\text{C}$ ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้น้ำมันเป็นสีดำและส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ สุรชัย (2007) ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดหีบรวม ซึ่งมีกรดไขมันอิสระสูงในช่วง 8-14 % โดยน้ำหนัก ด้วยกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมภายใต้สภาวะอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระ 10:1 ใช้กรดซัลฟิวริกประมาณ 0.8 % โดยน้ำหนัก สามารถลดกรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยกว่า 1% โดยน้ำหนัก ภายในเวลา 30 วินาที จากงานวิจัยต่าง ๆ ทำให้ทราบว่า มีหลายตัวแปรที่มีผลต่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เช่น ชนิดของน้ำมันที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบ และอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มอัตราเร็วปฏิกิริยาขึ้นด้วย แต่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาไม่ควรเกินจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ เนื่องจากจะสูญเสียปริมาณของแอลกอฮอล์ก่อนที่ปฏิกิริยาจะสมบูรณ์ (Ramadhas et al., 2004)

2.5.5 ความรุนแรงในการผสม

ความรุนแรงในการผสมสามารถหาได้จากตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, N_{Re}) ซึ่งความรุนแรงในการผสมเป็นตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันค่อนข้างน้อย โดยการกวนผสมในช่วงแรก วัฏภาคของสารตั้งต้น คือ น้ำมัน แอลกอฮอล์ และกรดซัลฟิวริก จะถูกกวนผสมเพื่อให้สารตั้งต้นเป็นวัฏภาคเดียวกัน เนื่องจากสารทั้งสามชนิดไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันเองได้ แต่การกวนผสมจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาในช่วงเริ่มต้นค่อนข้างช้า เนื่องจากการแพร่ระหว่างสารตั้งต้นทั้งสามวัฏภาคไม่ดีเพียงพอ แต่เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปเรื่อย ๆ จนเริ่มเกิดเป็นเอสเทอร์ การผสมจะมีผลต่อปฏิกิริยามากขึ้น โดยจะเป็นตัวกระตุ้นและชักนำให้ระบบแพร่กระจายระหว่างกันกลายเป็นวัฏภาคเดียว ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาต่อมา (ภูธร, 2002) แต่ถ้าทราบความรุนแรงในการผสมที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา จะทำให้สามารถนำข้อมูลมาออกแบบเครื่องปฏิกรณ์และขยายขนาดของปริมาณการผลิตได้

2.6 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์

โครงสร้างและการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ในอุตสาหกรรมเคมีมีมากมายหลายชนิด แยกเป็นเครื่องปฏิกรณ์ของปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ และเครื่องปฏิกรณ์ของปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ ดังนี้

2.6.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเอกพันธ์

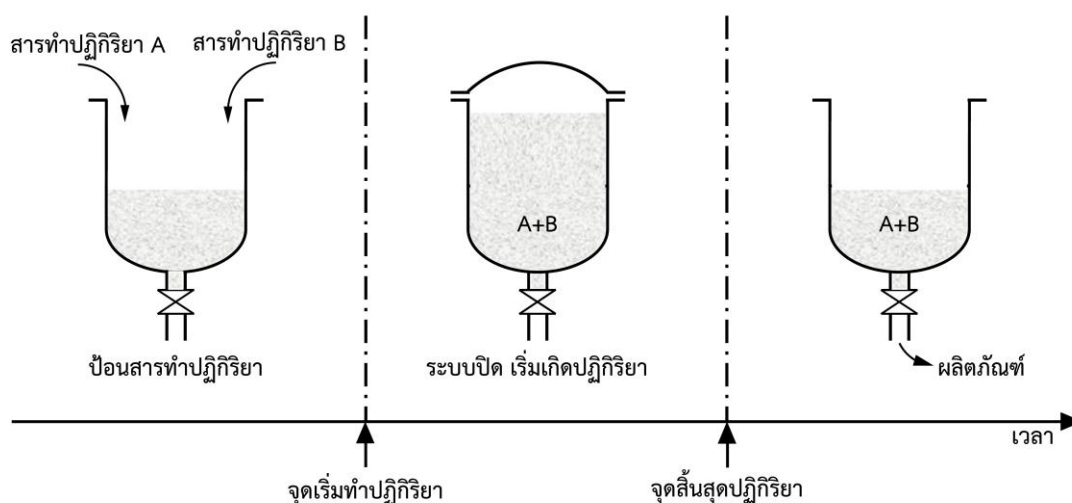
เครื่องปฏิกรณ์แบบเอกพันธ์สามารถแยกประเภทได้เป็นตามรูปแบบ และ ตาม ลักษณะการทำงาน ถ้าแยกเครื่องปฏิกรณ์แบบเอกพันธ์ตามรูปแบบ แบ่งออกเป็น

1. แบบถังกวน

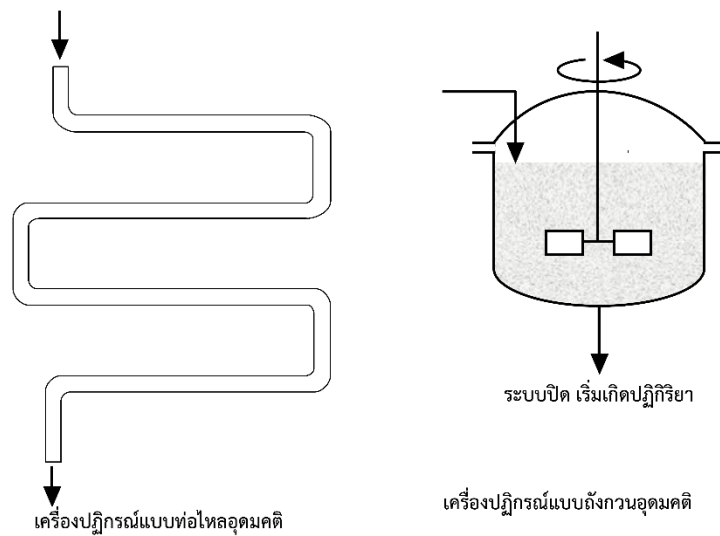
ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนในลักษณะการทำงานแบบกะเรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) แต่ถ้าเป็นการทำงานแบบต่อเนื่องเรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred tank reactor) หรือเรียกสั้นๆว่า CSTR สารทำปฏิกิริยาทั้งหมดจะถูกป้อนเข้าที่ทางเข้าของเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องโดยมีใบกวนช่วยกวนสารทำปฏิกิริยาให้มีอุณหภูมิและความเข้มข้นเท่ากันตลอดถึง ใบกวนนอกจากทำหน้าที่ทำให้สารทำปฏิกิริยามีเนื้อเดียวกันแล้ว ยังช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อน

2. แบบท่อไหล

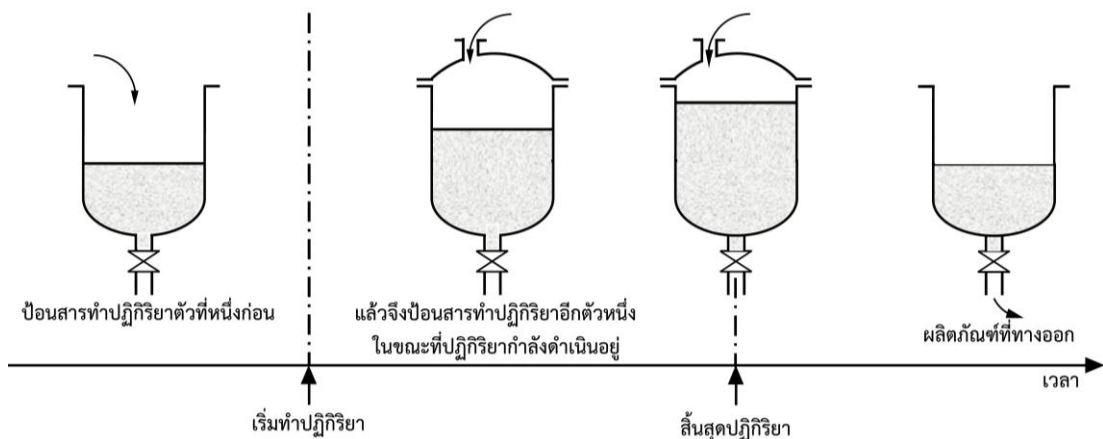
เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล มีโครงสร้างคล้ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสารทำปฏิกิริยาไหลผ่านท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอด ในลักษณะลูกสูบที่ถูกดันออกไป ความเข้มข้นในแนวตั้งฉากกับการไหลเท่ากันตลอด แต่ความเข้มข้นในแนวทิศทางการไหลไม่เท่ากัน เพราะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยาเปลี่ยนไป ลักษณะการไหลของสารทำปฏิกิริยานี้ เรียกว่าการไหลแบบลูกสูบ (piston flow) หรือแบบท่อไหล (plugflow) ซึ่งถ้าแยกตามลักษณะการทำงาน แบ่งออกเป็น แบบกะแสดงดังรูปที่ 2.5 แบบไหลต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 2.6 และแบบเฟดแบทช์ (Fed batch) แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล แบบกะ



รูปที่ 2.6 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล แบบไหลต่อเนื่อง

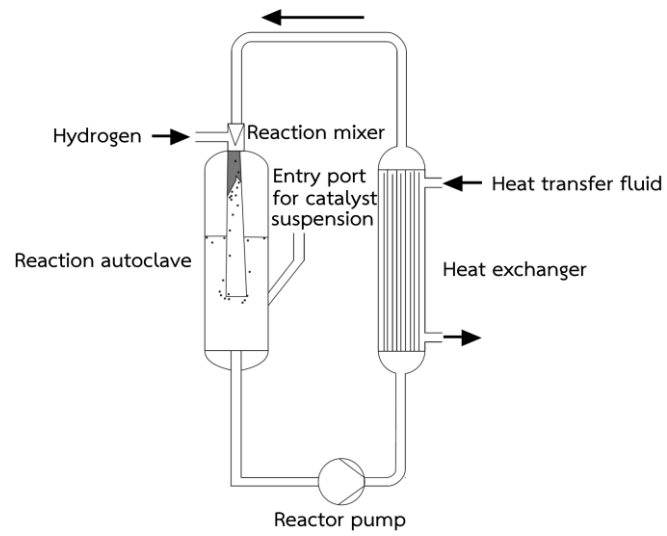


รูปที่ 2.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล แบบเฟดแบทช์

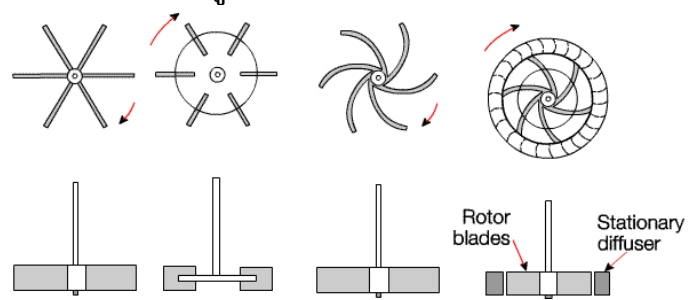
ถ้าแยกเครื่องปฏิกรณ์แบบเอกพันธ์ ตามลักษณะการทำงาน แบ่งออกเป็น

1. การทำงานแบบกะ (Batch operation)

สารทำปฏิกิริยาทั้งหมดถูกป้อนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ทิ้งไว้ก่อน แล้วจึงเริ่มปฏิกิริยา เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนดจึงนำของผสม (สารทำปฏิกิริยาที่ยังเหลืออยู่และผลิตภัณฑ์) ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยทั่วไปใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน อย่างไรก็ตามได้มีการพัฒนา batch reactor ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานเป็นไปตามความต้องการมากที่สุด และเพื่อทำให้เป็นเทคโนโลยีสะอาด จึงได้มีการผลิต Buss reactor ขึ้น ดังรูปที่ 2.8 โดยปกติแล้ว เครื่องปฏิกรณ์จะมีเครื่องกวน (Stirrer) อยู่ด้วย โดยการเลือกชนิดของเครื่องกวนนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของสารที่จะทำการผสม ซึ่งชนิดของใบพัดและ agitator ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ batch ดังแสดงในรูปที่ 2.9, 2.10 และมีลักษณะการหมุนและลักษณะของเครื่องกวนแบบต่างๆ ใน batch reactor ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12

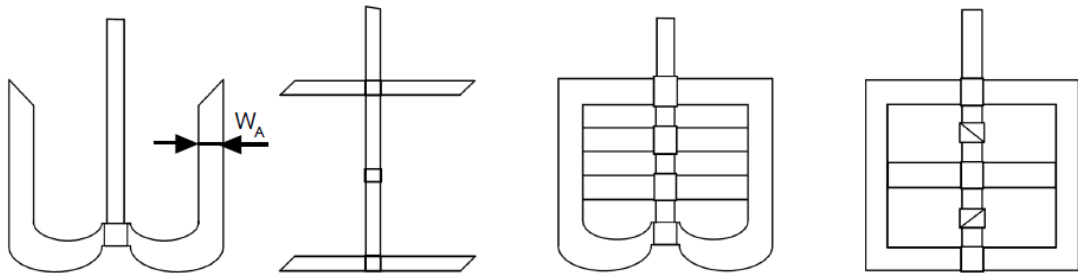


รูปที่ 2.8 Buss reactor

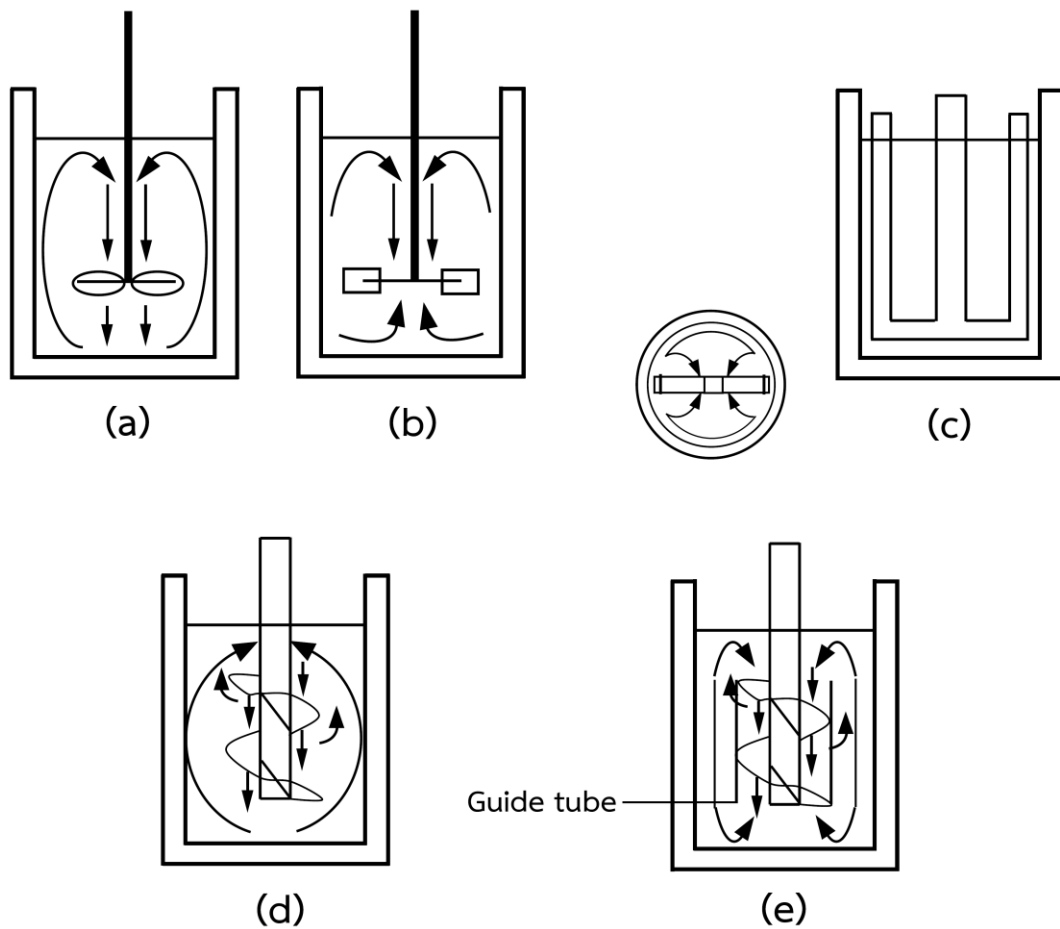


รูปที่ 2.9 แสดงใบพัดชนิดต่างๆ

(คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร รหัสวิชา 09-212-303)



รูปที่ 2.10 แสดง agitators แบบต่างๆ



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะการหมุนของเครื่องกวนแบบต่างๆ ใน batch reactor

2. การทำงานแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous operation)

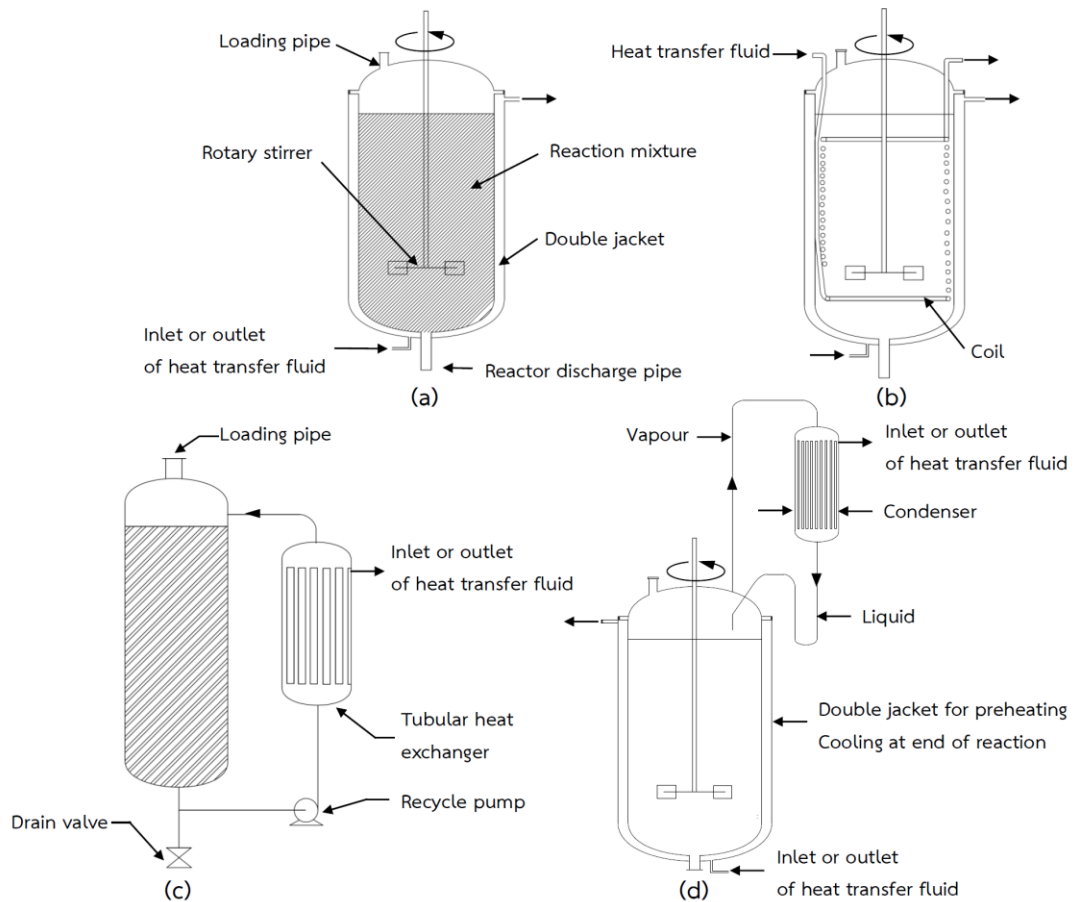
สารทำปฏิกิริยาป้อนเข้าที่ทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง ผลผลิตที่
ได้ไหลออกมาที่ทางออกลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้มีทั้งรูปแบบถังกวนและแบบท่อไหล

3. การทำงานแบบเฟดแบทช์ (fed-batch operation) หรือเซมิแบทช์ (semi-batch operation)

จะมีลักษณะการทำงานก้ำกึ่งระหว่างแบบกะกับแบบไหลต่อเนื่อง

2.6.2 เครื่องปฏิกรณ์ของปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์

ปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์คือปฏิกิริยาที่เกิดในหลายวัฏภาค เป็นสารที่แยกเฟสกัน เครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ระหว่างแก๊สกับแคทาลิสต์ของแข็ง แยกตามลักษณะได้ 3 ประเภท คือ ฟิกซ์เบด (Fixed bed) ฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed) และมูฟวี่งเบด (moving bed) เครื่องปฏิกรณ์ฟิกซ์เบดแบบแอเดียแบติก (จลนศาสตร์วิศวกรรมเคมีและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ)



รูปที่ 2.12 แสดง batch reactor แบบต่างๆ

(a) batch reactor ที่มี double jacket (b) batch reactor ที่มี double jacket และ coil อยู่ภายใน (c) batch reactor ที่มี external heat exchanger และ (d) batch reactor ที่มีเครื่องทำความเย็น

2.7 วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว

ในการออกแบบการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการทดลองเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองอาจเป็นเส้นตรงหรือเชิงเส้นโค้ง บางกระบวนการในอุตสาหกรรมมักพบความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งบ่อย ๆ และทางออกสำหรับการศึกษาตัวแปรที่อาจมีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งเพื่อให้ได้ผลที่มีความเหมาะสม คือการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยสามารถศึกษาผลของหลายๆ ปัจจัยพร้อมกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของ input (factors) และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ output (response) ที่เกิดขึ้น ในการออกแบบการทดลองต้องทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของ Y และ X ต่างๆ โดย

ใช้ทรัพยากรในการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ความสัมพันธ์เชิงสถิติที่ได้จะให้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ (process knowledge) เพื่อนำไปปรับปรุงกระบวนการต่อไป

วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response Surface Methodology; RSM) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่ใช้ในการสร้างแบบหุ่นและวิเคราะห์ปัญหาที่ตัวแปรต่าง ๆ โดยผลตอบสนองที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนอง ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$Y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2.1)$$

โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย x และ ε คือ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของผลตอบสนอง y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า $E(Y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2.2)$$

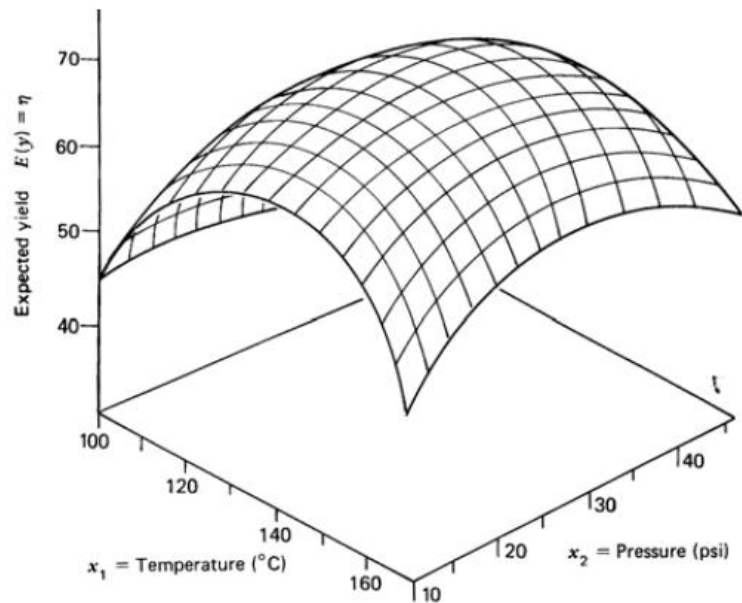
เรียกว่า “พื้นผิวผลตอบ (Response Surface)” โดยการนำค่า η มาพล็อตกับระดับของตัวแปร x_1 และ x_2 แสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวดังรูปที่ 2.13 และ 2.14 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น

ในการศึกษาโดยวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวจำเป็นต้องค้นหาฟังก์ชันที่แท้จริงระหว่างค่าตอบสนอง และตัวแปรอิสระต่าง ๆ ซึ่งการค้นหาฟังก์ชันต่าง ๆ เหล่านี้มักใช้ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียล (Polynomial) ลำดับต้น ๆ เช่น ลำดับหนึ่งหรือกำลังหนึ่ง (First order) ลำดับสองหรือกำลังสอง (Second order) เป็นต้น โดยทั่วไปฟังก์ชันซึ่งประมาณความสัมพันธ์แบบกำลังหนึ่ง มีแบบหุ่นดังแสดงในสมการที่ 2.3

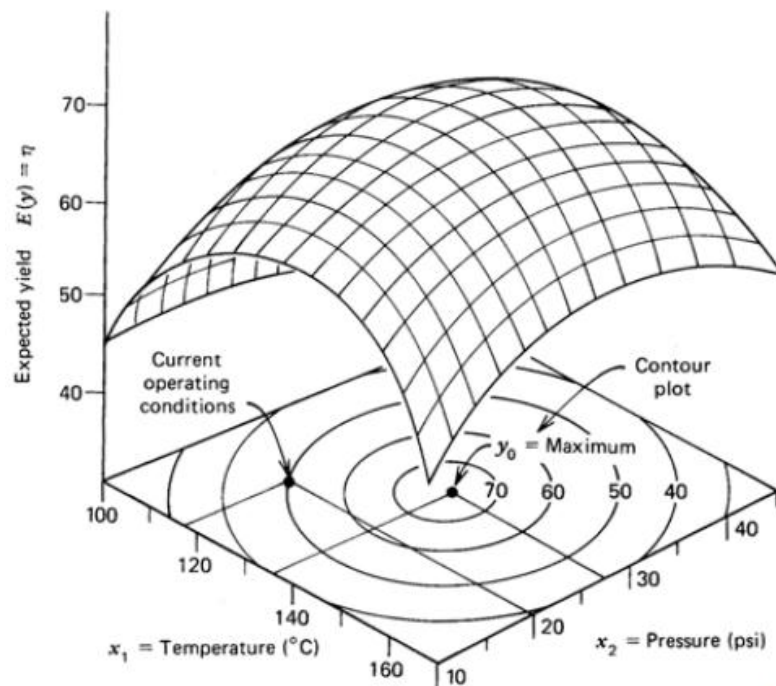
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2.3)$$

และระบบที่มีลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง ต้องใช้โพลีโนเมียลที่มีลำดับสูงขึ้น เช่นลำดับสองหรือกำลังสองซึ่งมีรูปแบบดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j \substack{j \\ i < j}} \beta_{ji} X_i X_j + \varepsilon \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.13 ภาพ 3 มิติของผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว
(Montgomery, 1991)



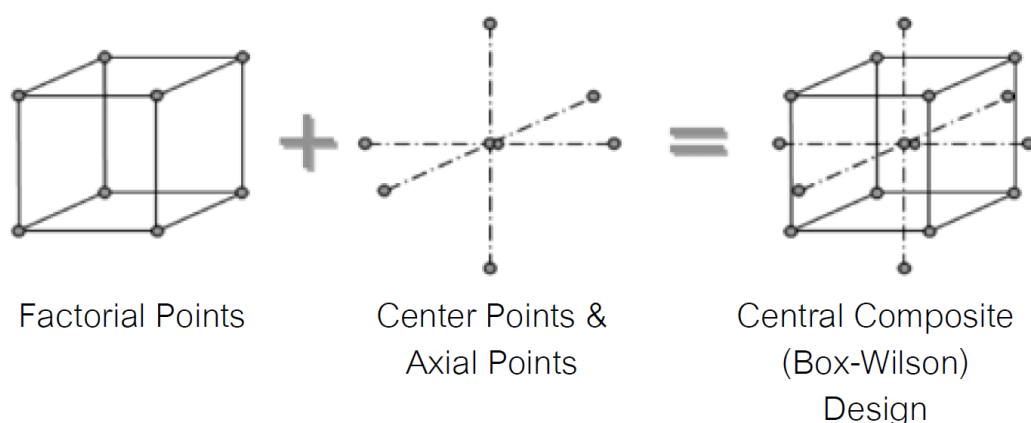
รูปที่ 2.14 ภาพ contour plot ของผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว
(Montgomery, 1991)

โดยปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบสนองส่วนใหญ่จะใช้แบบจำลองกำลังหนึ่งหรือแบบจำลองกำลังสองในการหาผลตอบสนอง แต่ไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระได้ ถ้าพื้นผิวที่สนใจมีขนาดใหญ่ โดยการออกแบบพื้นผิวผลตอบมีวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนองอยู่หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธีการกำลังสองน้อยสุด การ

ป็นด้วยทางชัน การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง และการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สอง ซึ่งการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สองเป็นการเน้นการสร้างแบบจำลองควอดราติกของผลตอบสนอง และมีหนึ่งวิธีการที่น่าสนใจ คือการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD)

2.7.1 การออกแบบส่วนประสมกลาง

การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) (หรือ box-wilson design) เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวผลตอบสนองที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสมเป็นการทดลองที่ 3 ระดับ (นิยมแทนด้วยสัญลักษณ์ $-1, 0, +1$) คือจะปรับตัวแปรที่ต้องการศึกษาตัวแปรละ 3 ค่า ซึ่งจะไม่ปรับตัวแปรแบบ Full Combination หรือ Full Factorial แต่เลือกบาง Runs หรือบางสภาวะการทดลองที่จำเป็น เพื่อได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติ โดย Model ที่ได้จะมีทั้ง Main Effect, Interaction และ Quadratic Terms ซึ่งใช้ทรัพยากรไม่มากเกินไป ตัวอย่างของ Central Composite Design สำหรับการศึกษิตัวแปร 3 ตัว ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 Central Composite Design สำหรับ 3 Factors
(จรัล ทรัพย์เสรี, 2009)

2.7.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA) เป็นวิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง ตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป เป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-group variance) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within-group variance) ซึ่งความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม เป็นค่าที่เกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่าง ๆ ถ้าค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่าง ๆ แตกต่างกันมาก ค่าความแปรปรวนระหว่าง

กลุ่มก็จะมากตามไปด้วย ส่วนความแปรปรวนภายในกลุ่มเป็นค่าที่แสดงว่า คะแนนแต่ละตัวที่รวบรวมภายในแต่ละกลุ่มมีการกระจายมากหรือน้อย ซึ่งค่าที่คำนวณได้เรียกว่าความคลาดเคลื่อน

2.7.3 แบบจำลองการถดถอย

แบบจำลองการถดถอย (Regression Model) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย เพื่อสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง สามารถหาผลตอบสนองที่จุดใดๆ ในแต่ละช่วงของปัจจัยได้ โดยวิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองส่วนใหญ่คือ วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) ซึ่งเป็นการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (β) เพื่อให้ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด (2ϵ) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งบางครั้งเรียก β เหล่านี้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย โดยมีขั้นตอนในการประมาณค่าดังนี้

1. สร้างผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาด โดยการพิทผลตอบสนอง
2. ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยในเทอมต่างๆ ที่ทำให้ผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด
3. นำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้ไปเขียนสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง

2.7.4 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง

1) ทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและเซตของตัวแปรถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพิจารณาสมมติฐานที่เหมาะสมของแต่ละแบบ ซึ่งพิจารณาจากค่า P-value

2) ทดสอบ Lack of Fit เป็นการทดสอบว่าฟังก์ชันถดถอยหรือแบบจำลองการถดถอยที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งพิจารณาจากค่า P-value

3) วิเคราะห์ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองพิจารณาค่าดังต่อไปนี้

3.1) Standard Deviation (Std. Dev.) คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่าหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Y รอบเส้นถดถอย

3.2) R-Squared (R^2) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของความแปรผันทั้งหมดใน Y อธิบายอธิบายโดยความสัมพันธ์ระหว่าง X กับ Y ดังนั้นจึงเป็นค่าที่ใช้วัดว่าสมการที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลเพียงใด ถ้า R^2 มีค่ามากขึ้น แสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลมากขึ้น คำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (2.5)$$

3.3) Adjusted R-Squared (Adj- R^2) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ที่ตัวแปรอิสระ X ในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ที่เป็นค่าประเมินว่ารูปแบบ

เหมาะสมกับข้อมูลอย่างไร โดยการนำ Degree of freedom มาพิจารณา ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.6

$$Adj - R^2 = 1 - \frac{SSE/(n - k - 1)}{SST/(n - 1)}, 0 \leq Adj - R^2 \leq 1 \quad (2.6)$$

3.4) Predicted R-Squared (Pred-R²) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ตัวแปรอิสระ X ที่อธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y จากการทำนาย ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$$Pred - R^2 = 1 - \frac{PRESS}{SS_{total}} \quad (2.7)$$

3.5) Predicted Residual Error Sum of Square (PRESS) คือ ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่ตัดออก เป็นการประเมินว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมกับจุดที่ออกแบบไว้หรือไม่ ซึ่งแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมจะมีค่า PRESS ต่ำ คำนวณได้จากสมการ 2.8 (จรัล, 2009)

$$PRESS = \sum \left(\frac{e_i}{1 - h_{ii}} \right)^2 \quad (2.8)$$

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมี

ในการศึกษานี้ใช้น้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บวมที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูงเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ จึงมีการทำปฏิกิริยาสองขั้นตอนเพื่อผลิตเอทิลเอสเทอร์ คือ ปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน ในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระ และปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันในการผลิตเอทิลเอสเทอร์

3.1.1 วัตถุดิบและสารเคมีในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระ

1. น้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บวม มีคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1
2. เอทานอลเกรดการคำนวณบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการคำนวณบริสุทธิ์ 99.9% และ เอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% โดยมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.2
3. กรดซัลฟิวริกเกรดการคำนวณบริสุทธิ์ 98% (H_2SO_4)

3.1.2 วัตถุดิบและสารเคมีในการผลิตเอทิลเอสเทอร์

1. น้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บวม (กรดไขมันอิสระต่ำกว่า 5 gKOH/Liter of oil)
2. เอทานอลเกรดการคำนวณบริสุทธิ์ 99.9%
3. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกรดการคำนวณ (KOH)

3.1.3 สารเคมีในการวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดในน้ำมันลดกรด

1. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกรดวิเคราะห์ (AR-grade potassium hydroxide (KOH))
2. ฟีนอล์ฟทาลีน (pH indicator)
3. ไอโซโพรพานอล (IPA)

3.1.4 สารเคมีในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบน้ำมัน ด้วยเทคนิค thin layer chromatography/flame ionization detection (TLC/FID)

1. ไอโซโพรพานอล
2. ฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์
3. เฮกเซน
4. กรดฟอร์มิก
5. เบนซีน
6. ไดเอทิล อีเทอร์

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบ

| คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบ | |
|--|--------|
| Density at 75°C (kg.L ⁻¹) | 0.873 |
| Viscosity at 75°C (cSt) | 13.72 |
| Free fatty acid (wt.%) | 15.233 |
| Triglyceride (wt.%) | 82.116 |
| Diglyceride (wt.%) | 2.348 |
| Monoglyceride (wt.%) | 0.244 |
| Ester (wt.%) | 0.059 |
| Acid value (mgKOH.g ⁻¹) | 34.500 |

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเอทานอล

| คุณสมบัติ | 95% com. grade of | 99.9% com. grade of | 99% AR grade of |
|--------------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------|
| | EtOH | EtOH | EtOH |
| Ethanol content (vol.%) | 95 Min. | 99.9 Min. | 99.9 Min. |
| Density @20 °C (kg.L ⁻¹) | 0.8 | 0.7892-0.7896 | 0.79 |
| Water Content (%mass) | N/A | 0.1 Max. | 0.2 Max. |
| Alkalinity | N/A | Nil | 0.0002 Max. |
| Colour (Pt-Co) | 15 Max. | 10 Max. | 10 Max. |
| Methanol (%) | 0.01 Max. | Nil | 0.05 |
| Residue on Evaporation (%mass) | N/A | 0.002 Max. | 0.001 Max. |

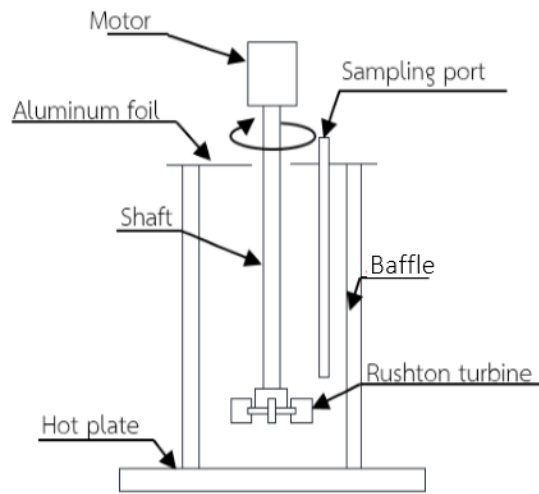
3.2 อุปกรณ์การทดลอง

3.2.1 ชุดเครื่องปฏิบัติการทดลองการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บรวมน

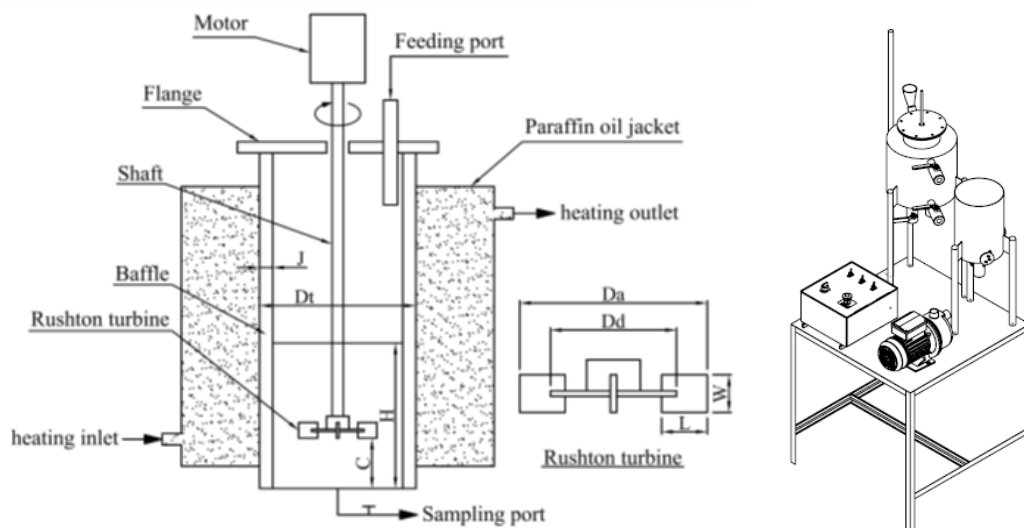
เนื่องจากการศึกษาทดลองนี้จะใช้ชุดทดลองในการศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของการลดกรดไขมันอิสระ 2 ประเภทด้วยกัน คือ ชุดทดลองแบบใบกวน และชุดทดลองแบบท่อผสมสถิต

สำหรับชุดทดลองแบบใบกวนประกอบด้วยชุดทดลองขนาดเล็กบรรจุน้ำมันเริ่มต้นได้ 0.5 ลิตร/ครั้ง แสดงในรูปที่ 3.1 ถูกใช้ในการศึกษาขอบเขตเงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสมของเอทานอลสามเกรดคือ เอทานอลเกรดการคำนวณบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการคำนวณบริสุทธิ์ 99.9% และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% และใช้กรดซัลฟิวริกความบริสุทธิ์ 98% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน ซึ่งชุดทดลองนี้ประกอบด้วยปีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความสูง 140 มิลลิเมตร และมีครีบริบติดทะแยงภายในปีกเกอร์ 4 ครีบริบ แต่ละครีบริบกว้าง 10 มิลลิเมตร มีใบกวนแบบ 6-blade disk turbine (Rushton turbine) ที่ใช้ในการผสมน้ำมันและทำปฏิกิริยาทางเคมี มีเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน 70 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางจานใบกวน 47 มิลลิเมตร ความกว้างของใบกวน 14 มิลลิเมตร ความยาวของใบกวน 17 มิลลิเมตร และความสูงของใบพัดจากกันถึง 25 มิลลิเมตร มี hotplate เพื่อให้ความร้อนตลอดการทำปฏิกิริยา

ชุดทดลองแบบใบกวนขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 2 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เป็นชุดทดลองที่ใช้ในขั้นตอนของการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของเอทานอลแต่ละเกรดในการศึกษาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งประกอบด้วยใช้ถังกวนทำปฏิกิริยาลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บรวมน โดยใช้ 6-blade disk turbine (Rushton turbine) ในการผสมน้ำมันและสารเคมี โดยขนาดของถังกวนผสม คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวน (Dt) 140 มิลลิเมตร ความสูงของถังกวน (H) 130 มิลลิเมตร และ ความกว้างของครีบริบ (J) 11.7 มิลลิเมตร และขนาดของ 6-blade disk turbine คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน (Da) 70 mm, เส้นผ่านศูนย์กลางจานใบกวน (Dd) 47 มิลลิเมตร ความกว้างของใบกวน (W) 14 มิลลิเมตร ความยาวของใบกวน (L) 17 มิลลิเมตร และ ความสูงของใบพัดจากกันถึง (C) 45 มิลลิเมตร และมีถัง paraffin oil หุ้มถังกวนทำปฏิกิริยาเพื่อหล่อร้อนควบคุมอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยา โดยมีฮีตเตอร์ขนาด 500 W ให้ความร้อนกับ paraffin oil

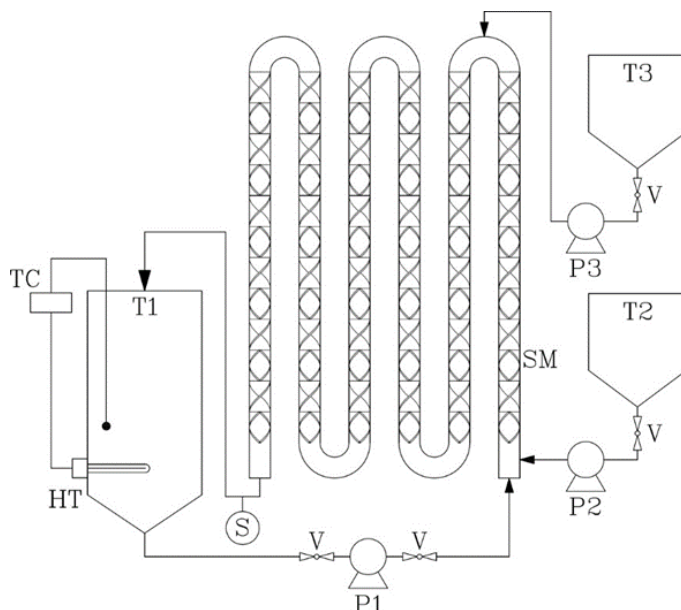


รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพของชุดขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 0.5 ลิตร



รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพและชุดทดลองขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 2 ลิตร

สำหรับชุดทดลองแบบท่อผสมสเถิตประกอบด้วย ชุดทดลองขนาดเล็กบรรจุน้ำมันเริ่มต้นได้ 5 ลิตร/ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เป็นชุดทดลองที่ใช้ในขั้นตอนของการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการศึกษาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อผสมสเถิตหมุนวน ซึ่งประกอบด้วย ถังน้ำมันปาล์มดิบปริมาตร 15 ลิตร ถังเอทานอลปริมาตร 60 ลิตร ถังกรดซัลฟิวริกปริมาตร 20 ลิตร ท่อผสมแบบสเถิต ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 10 มิลลิเมตร ยาว 1 เมตร มีไส้ท่อเป็นแผ่นสแตนเลส กว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร บิด 180° แผ่นสแตนเลสแต่ละชั้นต่อเชื่อมจุดกันด้วยมุม 90° ตลอดความยาวท่อ จำนวน 6 ท่อ และมีฉนวนหุ้มท่อผสมแบบสเถิตแต่ละท่อเพื่อควบคุมความร้อนสูญเสียระหว่างทำปฏิกิริยา



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวนในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม
ดิบชนิดที่บรวมขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร

(T1: ถังน้ำมันปาล์มดิบและถังทำปฏิกิริยา T2: ถังเอทานอล T3: ถังกรดซัลฟิวริก P1: ปั๊มหมุนวน P2:
ปั๊มผสม P3: ปั๊มกรดซัลฟิวริก HT: ฮีทเตอร์ V: วาล์ว TC: ชุดควบคุมอุณหภูมิ SM: ท่อผสมสติด และ
S: ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง)

ชุดทดลองแบบท่อผสมสติดขนาดนำร่องบรรจุน้ำมันเริ่มต้นได้ 100 ลิตร/ครั้ง ดัง
แสดงในรูปที่ 3.4 เป็นชุดทดลองที่ใช้ในขั้นตอนของการผลิต น้ำมันปาล์ม esterified เพื่อเป็นวัตถุดิบ
เริ่มต้นในการศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อผสมสติดหมุนวนต่อไป ซึ่ง
สามารถผลิต น้ำมันปาล์ม esterified ได้เกิน 10 ลิตร/ครั้ง ประกอบด้วย ถังน้ำมันปาล์มดิบ ถังเอทา
นอล ถังกรดซัลฟิวริก ท่อผสมแบบสติด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 10 มิลลิเมตร ยาว 1 เมตร มีไส้
ท่อผสมเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาเป็นแผ่นสแตนเลส กว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร บิด 180° แผ่น
สแตนเลสแต่ละชั้นต่อเชื่อมจุดกันด้วยมุม 90° ตลอดความยาวท่อ จำนวน 14 ท่อผสม โดยแบ่งเป็น 2
กลุ่มท่อชุดใหญ่ มีท่อผสมจำนวน 7 ท่อผสมต่อกลุ่มท่อชุดใหญ่ และมีฉนวนหุ้มท่อผสมแบบสติดแต่ละ
กลุ่มเพื่อควบคุมความร้อนสูญเสียระหว่างทำปฏิกิริยา โดยผสมสารด้วยปั๊มสารเคมีแบบหมุนวน ซึ่ง
สารผสมจะไหลผ่านท่อผสมแบบสติดขนาดความยาว 1 เมตร จำนวน 14 ท่อผสม ด้วยอัตราการไหล
500 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 3.4 ชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวนในการทดลองการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ
ที่รวบรวมชนิดกรดไขมันอิสระสูง

(1: ถังน้ำมันปาล์มดิบ ขนาด 180 ลิตร, 2: ถังเอทานอล ขนาด 70 ลิตร, 3: ถังกรดซัลฟิวริก ขนาด 20 ลิตร, 4: ท่อผสมแบบสติด จำนวน 2 กลุ่มท่อชุดใหญ่, 5: ป้อนสารเคมีแบบหมุนวน และ 6: ถังเก็บน้ำมันลดกรด)

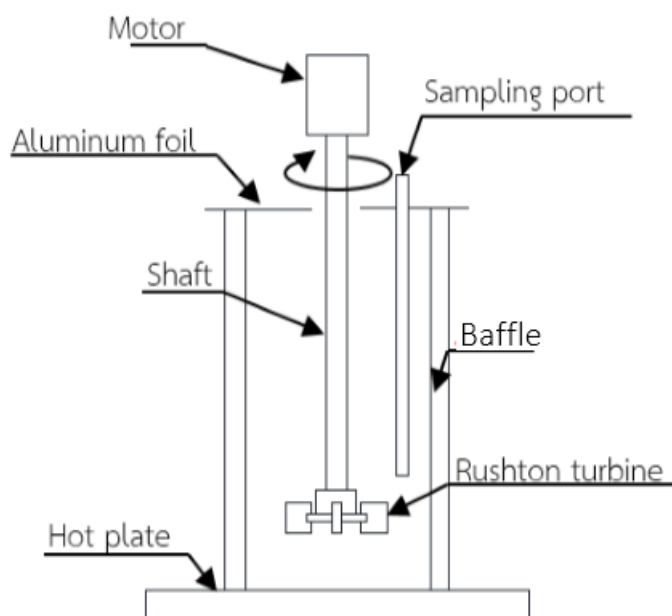
3.2.2 ชุดเครื่องปฏิกรณ์การทดลองการผลิตเอทิลเอสเทอร์

เนื่องจากในการศึกษาทดลองนี้จะใช้ชุดทดลอง 2 ชุด ในการศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของการผลิตเอทิลเอสเทอร์คือ ชุดทดลองแบบใบกวนขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 0.5 ลิตร และชุดทดลองแบบท่อผสมสติดแบบหมุนวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร

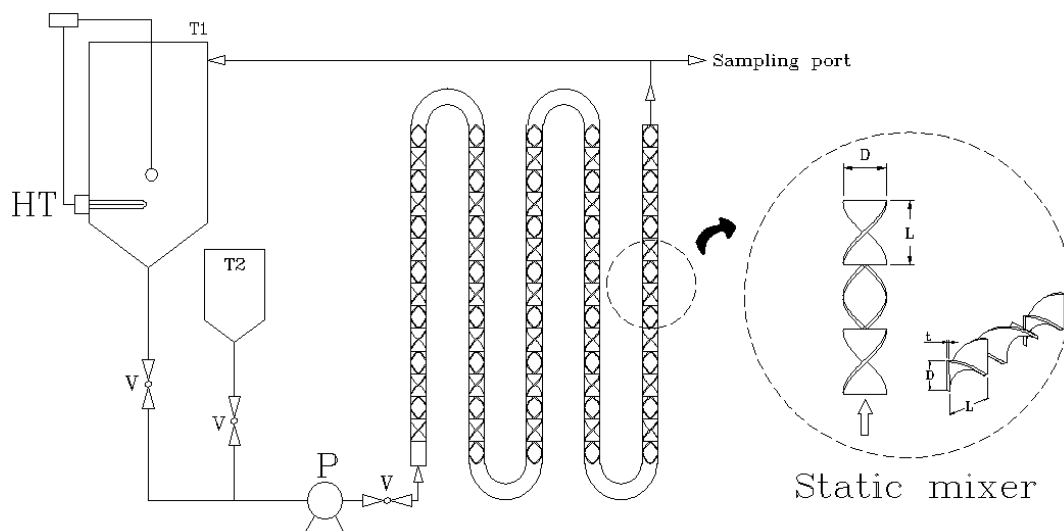
ซึ่งสำหรับชุดทดลองแบบใบกวนขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 0.5 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ถูกใช้ในการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการใช้เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9%

และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกรดการค้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ซึ่งชุดทดลองนี้ประกอบด้วยบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความสูง 140 มิลลิเมตร และมีครีบริดตตะแยงภายในบีกเกอร์ 4 ครีบริด แต่ละครีบริดกว้าง 10 มิลลิเมตร มีใบกวนแบบ 6-blade disk turbine (Rushton turbine) ที่ใช้ในการผสมน้ำมันและทำปฏิกิริยาทางเคมี มีเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน 70 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางจานใบกวน 47 มิลลิเมตร ความกว้างของใบกวน 14 มิลลิเมตร ความยาวของใบกวน 17 มิลลิเมตร และความสูงของใบกวนจากก้นบีกเกอร์ 25 มิลลิเมตร มี hotplate เพื่อให้ความร้อนตลอดการทำปฏิกิริยา

ชุดทดลองท่อผสมสติดแบบหมุนวนขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร แสดงในรูปที่ 3.6 เป็นชุดทดลองขนาดนำร่องที่ใช้ในขั้นตอนของการศึกษาการทำปฏิกิริยาในการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% และใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกรดการค้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งประกอบด้วย ถังน้ำมันปาล์มดิบ ถังเอทานอล ท่อผสมแบบสติด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 10 มิลลิเมตร ยาว 1 เมตร มีไส้ท่อผสมเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาเป็นแผ่นสแตนเลส กว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร บิด 180° แผ่นสแตนเลสแต่ละชั้นต่อเชื่อมจุดกันด้วยมุม 90° ตลอดความยาวท่อ จำนวน 14 ท่อผสม โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มท่อชุดใหญ่ มีท่อผสมจำนวน 7 ท่อผสมต่อกลุ่มท่อชุดใหญ่ และมีฉนวนหุ้มท่อผสมแบบสติดแต่ละกลุ่มเพื่อควบคุมความร้อนสูญเสียระหว่างทำปฏิกิริยา โดยผสมสารด้วยปั๊มสารเคมีแบบหมุนวน ซึ่งสารผสมจะไหลผ่านท่อผสมแบบสติดขนาดความยาว 1 เมตร จำนวน 14 ท่อผสม ด้วยอัตราการไหล 500 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 3.5 แสดงแผนภาพของชุดขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 0.5 ลิตร



รูปที่ 3.6 แบบชุดทดลองผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มชนิดกรดไขมันอิสระสูงด้วยท่อผสมสถิต แบบหมุนวน

(L: ความยาวของแผ่นสแตนเลส D: ความกว้างของแผ่นสแตนเลส และ t: ความหนาของแผ่นสแตนเลส T1: ถังน้ำมันปาล์ม T2: ถังสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์+เอทานอล) P: ปั๊มสารเคมีแบบหมุนวน HT: ฮีตเตอร์ V: วาล์ว และ TC: ชุดควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ)

3.2.3 ชุดอุปกรณ์การไตรเตรตน้ำมัน

ชุดอุปกรณ์การไตรเตรตน้ำมันประกอบด้วย ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร ปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร และหลอดหยดแก้วยาว 8 เซนติเมตร

3.2.4 ชุดอุปกรณ์การล้างน้ำมัน

ชุดอุปกรณ์การล้างน้ำมันประกอบด้วย กรวยแยกขนาด 500 มิลลิลิตร ปั๊มลม ปีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร และ hot plate stirrer

3.2.5 ชุดอุปกรณ์การวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมัน

การวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันใช้เครื่อง Itronscan MK6, chromarod trpe S-II quartz rod (Mitshubishi Kagaku Iatron Inc., Japan) และเครื่อง rod dryer TK-8

3.3 การวางแผนการทดลอง

การศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มชนิดกรดไขมันอิสระสูงด้วยปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน คือปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันที่มีกรดต่ำ จากการศึกษาปฏิกิริยาทั้งสองขั้นตอนพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของเอทานอล อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ความรุนแรงในการผสม และความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้น และเมื่อ

ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ดังกล่าวเพื่อวางแผนออกแบบการทดลองโดยเบื้องต้นสามารถสรุปอุณหภูมิกึ่งที่ในการทำปฏิกิริยา 75°C ตามจุดเดือดของเอทานอล ความรุนแรงในการผสม 900 รอบต่อนาที ในชุดทดลองแบบใบกวน ที่อัตราการไหลสูงสุดของปั๊มหมุนวนในระบบหมุนวนด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสถิติ และความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้นให้เป็นไปตามน้ำมันปาล์มดิบเริ่มต้นที่ศึกษา คือมีค่ากรดไขมันอิสระเริ่มต้นที่ 34.5 mg KOH/g ส่วนน้ำมันลดกรดที่ใช้ในกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ต้องมีค่ากรดไขมันอิสระต่ำกว่า 2 mg KOH/g ดังนั้นจึงเหลือตัวแปรในการพิจารณาออกแบบการทดลองคือปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณของเอทานอล ศึกษาเงื่อนไขการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธี Response Surface Methodology, RSM และใช้แผนการทดลองแบบ Central Composite Design เพื่อได้เงื่อนไขการทดลองที่ครอบคลุมและนำไปหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ซึ่งให้รูปแบบสมการการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ คือปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณของเอทานอลที่มีอิทธิพลต่อค่าผลตอบสนอง คือค่ากรดไขมันอิสระในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระและปริมาณเอสเทอร์ในขั้นตอนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 3.2 และสมการที่ 3.3

$$AV = f(S, E) \quad (3.2)$$

$$ES = f(K, E) \quad (3.3)$$

| | | | | | | |
|--------|----|-----|----------------------------|----|-----|-------------------|
| โดยที่ | AV | คือ | ค่ากรดไขมันอิสระ | ES | คือ | ค่าปริมาณเอสเทอร์ |
| | S | คือ | ปริมาณกรดซัลฟิวริก | E | คือ | ปริมาณเอทานอล |
| | K | คือ | ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ | | | |

การศึกษานี้ใช้โปรแกรม Essential Experimental Design version 2.213 ในการออกแบบการทดลอง โดยเลือกการออกแบบแผนการทดลองเป็นแบบ central composite design, CCD ซึ่งจากการออกแบบการทดลองของการศึกษานี้เป็นแบบ central composite design, CCD สำหรับ 2 ตัวแปรคือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณเอทานอล ได้รูปสมการเป็น quadratic ได้ 8 รูปแบบเงื่อนไขการทดลอง และอีก 4 จุดศูนย์กลางเงื่อนไขการทำซ้ำ มีตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร ดังจะประกอบด้วย 5 ระดับของแต่ละปัจจัย คือ (-1.414, -1, 0, +1, +1.414) หรือสามารถหาจุดแกนของระดับในแต่ละตัวแปรอิสระของการทดลองได้จากสมการที่ 3.4

$$\alpha = \sqrt[4]{2^k} \quad (3.4)$$

| | | | |
|--------|----------|-----|------------------|
| โดยที่ | α | คือ | จุดแกน |
| | k | คือ | จำนวนตัวแปรอิสระ |

ได้เงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 12 เงื่อนไข ในแต่ละขั้นตอน แล้วนำไปวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองด้วยโปรแกรม Essential Regression version 2.215 ซึ่งสามารถหาสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่สนใจ คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณเอทานอล ที่ส่งผลต่อการลดกรดไขมันอิสระในขั้นตอนการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ และปริมาณเอสเทอร์ในขั้นตอนการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มกรดต่ำ

3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

การผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงจะใช้กระบวนการผลิตแบบสองขั้นตอน คือกระบวนการลดกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน และกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยทั้ง 2 ขั้นตอนมีวิธีการดำเนินการดังนี้

3.4.1 ขั้นตอนการทดลองการลดกรดไขมันอิสระ

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการลดกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูง โดยใช้เอทานอลในการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันกับน้ำมันปาล์มดิบ มีขั้นตอนการเปรียบเทียบศักยภาพของเอทานอลแต่ละเกรดในการทำปฏิกิริยา ซึ่งประกอบด้วย เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% และศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ ดังนี้

3.4.1.1 การเปรียบเทียบศักยภาพของเอทานอลแต่ละเกรดในการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันกับน้ำมันปาล์มดิบ

การศึกษาหาขอบเขตเงื่อนไขที่มีความเป็นไปได้ของการลดกรดไขมันอิสระด้วยการพิจารณาเลือกเกรดเอทานอล โดยกำหนดตัวแปรผลต่อการลดกรดไขมันอิสระของเงื่อนไขการทดลองคือ กำหนดความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 500, 700 และ 900 รอบต่อนาที กำหนดปริมาตรกรดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็น 6, 8, 10 และ 12 %โดยปริมาตร และ กำหนดปริมาณเอทานอลเป็น 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 %โดยปริมาตร โดยใช้ชุดทดลองขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 0.5 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 การทดลองเริ่มจากเทน้ำมันปาล์มดิบ 0.5 ลิตร ลงในบีกเกอร์ และในขณะเดียวกันก็เปิด hotplate เพื่อให้ความร้อนและเปิดมอเตอร์กำหนดความเร็วรอบตามที่ออกแบบ ให้ใบพัดกวนกระจายอุณหภูมิเพื่อลดความหนืดของน้ำมัน ใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิของน้ำมันเมื่ออุณหภูมิประมาณ 75 °C เทเอทานอลลงไปผสมในบีกเกอร์ตามปริมาณที่ออกแบบการทดลอง ซึ่งเอทานอลจะทำให้อุณหภูมิของน้ำมันลดลง รอจนกว่าอุณหภูมิประมาณ 65 °C เทกรดซัลฟิวริกปริมาณตามที่ออกแบบลงในบีกเกอร์ช้า ๆ และเริ่มจับเวลาทันทีที่เริ่มเติมกรด โดยควบคุมอุณหภูมิตลอดการทำปฏิกิริยาที่ 75 °C และเก็บตัวอย่างเป็นช่วงเวลาตามที่ออกแบบ การเก็บตัวอย่างทุกครั้งนำตัวอย่างไปหยุดการเกิดปฏิกิริยาด้วยการแช่ในน้ำเย็นโดยทันที หลังจากนั้นวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เทใส่กรวยแยกและถ่ายของเสียทิ้ง แล้วล้างด้วยน้ำร้อนจนสะอาด นำไปเตรียมหาค่าความเป็นกรดที่หลงเหลืออยู่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.1 และวิเคราะห์องค์ประกอบ Ester, Tri-glyceride, Free fatty acid, Di-glyceride และ Mono-glyceride ในน้ำมันด้วยเทคนิค thin layer chromatography/flame ionization detection (TLC/FID)

$$\text{ค่าความเป็นกรด(mgKOH/g)} = \frac{\text{ปริมาณสารละลายที่ใช้(ml)} \times \text{ความเข้มข้นสารละลาย(N)} \times 56.1}{\text{น้ำหนักน้ำมันตัวอย่าง(g)}} \quad (3.1)$$

เมื่อได้เงื่อนไขการทดลองที่เป็นไปได้ในการใช้เอทานอลแต่ละเกรดลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ นำขอบเขตเงื่อนไขดังกล่าวมาออกแบบการทดลองและศึกษาเงื่อนไขการทดลองโดยใช้ Response Surface Methodology (RSM) และใช้แผนการทดลองแบบ Central Composite Design โดยศึกษาตัวแปรที่ระดับต่าง ๆ 5 ระดับ ตัวแปร 2 ตัวแปร จะมีทั้งหมด 12 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.3 ซึ่งทดลองด้วยชุดทดลองขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 2 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2 การทดลองเริ่มจากเติมน้ำมันปาล์มดิบ 2 ลิตร ลงในถังทำปฏิกิริยา ในขณะที่เดียวกันก็เปิดฮีทเตอร์ให้ความร้อน paraffin oil และเปิดปั๊มหมุนวน paraffin oil เพื่ออุ่นน้ำมันปาล์มดิบและเปิดมอเตอร์ 900 รอบต่อนาที ใช้เทอร์โมสแตทควบคุมอุณหภูมิตลอดการทำปฏิกิริยาที่ 75 °C เมื่ออุณหภูมิประมาณ 75 °C เทเอทานอลลงไปผสมในถังทำปฏิกิริยาตามปริมาณที่ออกแบบ รอจนอุณหภูมิประมาณ 65 °C เทกรดซัลฟิวริกปริมาตรตามที่ออกแบบซ้ำ ๆ ลงในถังทำปฏิกิริยา และเริ่มจับเวลาทันทีที่เริ่มเติมกรด และเก็บตัวอย่างทุก ๆ 10 นาที ครั้งละ 40 มิลลิลิตร ตลอด 40 นาที โดยการเก็บตัวอย่างทุกครั้งต้องนำตัวอย่างแช่ลงในน้ำเย็นโดยทันที หลังจากนั้นวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องแล้วเทใส่กรวยแยกและถ่ายของเสียทิ้ง แล้วล้างด้วยน้ำร้อนจนสะอาด นำไปไตรเตรทหาค่าความเป็นกรดที่หลงเหลืออยู่ได้ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และวิเคราะห์หาองค์ประกอบน้ำมันได้ด้วยเทคนิควิธี TLC/FID

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการทดลองในการพิจารณาเปรียบเทียบศักยภาพของเอทานอลแต่ละเกรดในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ ด้วยชุดปฏิกรณ์แบบในกวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 2 ลิตร

| Run | Ethanol, <i>E</i> (vol.%) | Sulfuric acid, <i>S</i> (vol.%) |
|-----|---------------------------|---------------------------------|
| 1 | 95.3 | 10.0 |
| 2 | 85.0 | 8.0 |
| 3 | 60.0 | 7.2 |
| 4 | 35.0 | 12.0 |
| 5 | 24.6 | 10.0 |
| 6 | 60.0 | 12.8 |
| 7 | 60.0 | 10.0 |
| 8 | 60.0 | 10.0 |
| 9 | 85.0 | 12.0 |
| 10 | 60.0 | 10.0 |
| 11 | 35.0 | 8.0 |
| 12 | 60.0 | 10.0 |

3.4.1.2 การศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมัน

ปาล์มดิบ

เมื่อได้เกรดของเอทานอลที่เหมาะสม และเงื่อนไขการทดลองของการใช้เอทานอลในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่เหมาะสมแล้ว นำเงื่อนไขดังกล่าวมาหาขอบเขตการทดลอง โดยกำหนดตัวแปรที่มีผลต่อการลดกรดไขมันอิสระคือ กำหนดปริมาณกรดเป็น 2, 5 และ 10 % โดยปริมาตร และกำหนดปริมาณเอทานอลเป็น 30, 60 และ 80 % โดยปริมาตร ได้ขอบเขตการทดลองนำมาออกแบบและศึกษาเงื่อนไขการทดลองโดยใช้ Response Surface Methodology (RSM) และใช้แผนการทดลองแบบ Central Composite Design โดยศึกษาตัวแปรที่ระดับต่าง ๆ 5 ระดับ ตัวแปร 2 ตัวแปร จะมีทั้งหมด 12 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.4 โดยใช้ชุดทดลองขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เริ่มจากเทน้ำมันปาล์มดิบ 5 ลิตร ลงในถังน้ำมันปาล์มดิบ ในขณะเดียวกันก็เปิดปั๊มหมุนวนน้ำมันปาล์มดิบ (P1: GRUNDFOS ALLDOS DMX 50-10 circulating pump) และให้ฮีทเตอร์ (HT: heater 500 watts) ทำงานโดยควบคุมอุณหภูมิคงที่ 75 °C ตลอดการทำปฏิกิริยา และเติมเอทานอลลงในถังเอทานอลปริมาณตามกำหนดและเปิดปั๊มเอทานอล (P2: GRUNDFOS DME mixture pump) ป้อนเอทานอลเข้าที่ผสมสเถิตที่อัตราการไหลสูงสุด 37 ลิตรต่อชั่วโมง ในขณะเดียวกันก็ปิดปั๊มหมุนวนน้ำมันดิบและเปิดปั๊มหมุนวนน้ำมันของระบบที่อัตราการไหลสูงสุด 56 ลิตรต่อชั่วโมง และเติมกรดซัลฟิวริกลงในถังกรดซัลฟิวริกปริมาณตามเงื่อนไขสังเกตดูเมื่อปริมาณของเอทานอลในถังเอทานอลถูกป้อนเข้าระบบหมุนวนหมดแล้วจึงเปิดปั๊มป้อนกรดซัลฟิวริก (P3: GRUNDFOS DDC sulfuric acid pump) ที่อัตราการไหลสูงสุด 2.5 ลิตรต่อชั่วโมง และเริ่มจับเวลาการทำปฏิกิริยาตั้งแต่เริ่มเติมกรดซัลฟิวริก และเก็บตัวอย่างน้ำมันทุก ๆ 5 นาที ครั้งละ 40 มิลลิลิตร ตลอด 60 นาที โดยทุกครั้งต้องนำตัวอย่างแช่ในน้ำเย็นโดยทันที หลังจากนั้นวางน้ำมันตัวอย่างทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปเทใส่กรวยแยกและถ่ายของเสียทิ้ง แล้วนำมาล้างด้วยน้ำร้อนจนสะอาด ไตรเตรทหาค่าความเป็นกรดที่หลงเหลืออยู่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และวิเคราะห์หาองค์ประกอบน้ำมันได้ด้วยเทคนิควิธี TLC/FID

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขการทดลองในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสถิติแบบหมุนวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร

| Run | Ethanol, E(vol.%) | Sulfuric acid, S(vol.%) |
|-----|-------------------|-------------------------|
| 1 | 60 | 5 |
| 2 | 95 | 5 |
| 3 | 60 | 5 |
| 4 | 60 | 5 |
| 5 | 85 | 8 |
| 6 | 35 | 8 |
| 7 | 60 | 1 |
| 8 | 35 | 2 |
| 9 | 85 | 2 |
| 10 | 25 | 5 |
| 11 | 60 | 5 |
| 12 | 60 | 9 |

ได้เงื่อนไขการทดลองของการลดกรดไขมันอิสระด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสถิติแบบหมุนวนขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร แล้วนำเงื่อนไขดังกล่าวมาศึกษาการลดกรดไขมันอิสระขนาดนำร่องด้วยชุดทดลองขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เริ่มจากเทน้ำมันปาล์มดิบ 100 ลิตร ลงในถังน้ำมันปาล์มดิบ ในขณะที่เดียวกันก็เปิดปั๊มหมุนวนน้ำมันปาล์มดิบที่อัตราการไหล 500 ลิตรต่อชั่วโมง และเปิดฮีทเตอร์ ขนาด 2,000 W และมีอุปกรณ์ตัดต่อฮีทเตอร์ควบคุมอุณหภูมิภายในถังผสมแบบหมุนวนหรือถังน้ำมันปาล์มดิบตลอดการทำปฏิกิริยาให้คงที่ 75°C และเติมเอทานอล 66 ลิตร (66 %โดยปริมาตร, เงื่อนไขจากการทดลองด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสถิติขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร) ลงในถังเอทานอล และเปิดวาล์วปล่อยเอทานอลด้วยอัตราการไหล 495 ลิตรต่อชั่วโมง สังเกตดูเมื่อปริมาณของเอทานอลในถังเอทานอลถูกปล่อยเข้าระบบหมุนวนหมดแล้ว จึงเติมกรดซัลฟิวริก 7 ลิตร (7 %โดยปริมาตร, เงื่อนไขจากการทดลองด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสถิติขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร) ลงในถังกรดซัลฟิวริก และเริ่มจับเวลาการทำปฏิกิริยาทันทีที่เติมกรดซัลฟิวริก โดยเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นตัวแปรของการทดลอง ซึ่งจะกำหนดระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาเป็น 0.5, 1, 2, 3, 6, 9 และ 12 ชั่วโมง และในการเก็บตัวอย่างทุกครั้งต้องนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำเย็นโดยทันทีเพื่อหยุดปฏิกิริยาหลังจากนั้นตั้งน้ำมันตัวอย่างทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เทใส่กรวยแยกถ่ายน้ำซึ่งอยู่ด้านล่างทิ้ง แล้วนำมาล้างด้วยน้ำร้อนจนสะอาด นำไปเตรียมหาค่าความเป็นกรดที่หลงเหลือด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ วิเคราะห์หาองค์ประกอบน้ำมันด้วยเทคนิควิธี TLC/FID และนำไปทดสอบความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ด้วยเครื่องมือทดสอบ Fourier Transform NMR Spectrometer 500 MHz, Model: Unity Inova, Varian, Germany หรือ NMR

3.4.2 ขั้นตอนการทดลองการผลิตเอทิลเอสเทอร์

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์โดยใช้เอทานอลเกรดการค้ำความบริสุทธิ์ 99.9% ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

3.4.2.1 การศึกษากระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุดปฏิกรณ์แบบใบกวน

ซึ่งในขั้นตอนการศึกษานี้ใช้น้ำมันที่ผ่านกระบวนการลดกรดไขมันอิสระให้ต่ำกว่า 2 mgKOH/g เป็นน้ำมันเริ่มต้น ทำปฏิกิริยากับเอทานอลเกรดการค้ำความบริสุทธิ์ 99.9% และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกรดการค้ำ ในเบื้องต้นศึกษาหาเงื่อนไขขอบเขตการทดลองของการทำปฏิกิริยาด้วยใบกวนแบบ six-blade turbine ซึ่งทำปฏิกิริยาในปิกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร เก็บตัวอย่างที่เวลาการทำปฏิกิริยาทุก ๆ 10 นาที ตลอด 70 นาที ที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ และเมื่อได้เงื่อนไขการทดลองที่สามารถผลิตเอทิลเอสเทอร์ได้ จึงออกแบบเงื่อนไขการทดลองโดยกำหนดตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการ คือ ปริมาณของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และปริมาณเอทานอล ได้ 12 เงื่อนไขการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.5 โดยใช้ชุดทดลองขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 0.5 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เริ่มจากการเทน้ำมันปาล์มดิบ 0.5 ลิตร ลงในปิกเกอร์ และในขณะเดียวกันก็เปิด hotplate เพื่อให้ความร้อนและเปิดมอเตอร์ที่ 900 รอบต่อนาที ใช้เทอร์โมมิเตอร์ควบคุมอุณหภูมิตลอดการทำปฏิกิริยาคงที่ 75 °C เมื่อน้ำมันอุณหภูมิประมาณ 75 °C เทเอทานอลที่ผสมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ตามปริมาณของเงื่อนไขที่ออกแบบบวกกับค่ากรดไขมันอิสระของน้ำมันเริ่มต้นลงไปผสมในปิกเกอร์ตามปริมาณที่ออกแบบ และเริ่มจับเวลาทันทีที่เริ่มเติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลงไป ทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 10 นาที ตลอด 150 นาที ครั้งละ 6 มิลลิลิตร โดยในการเก็บตัวอย่างจะเก็บในขณะชุดทดลองยังคงทำงานอยู่ และทุกครั้งของการเก็บตัวอย่างต้องนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำเย็นทันที และวางตัวอย่างทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 20 นาที จะเกิดการแยกชั้นของกลีเซอรอลและน้ำมันไบโอดีเซล โดยจะได้น้ำมันไบโอดีเซลอยู่ด้านบนแยกชั้นเป็นสีที่ต่างกันชัดเจน แล้วแยกส่วนที่เป็นกลีเซอรอลออก จากนั้นนำน้ำมันไบโอดีเซลไปล้างด้วยน้ำร้อน และวิเคราะห์ค่าความบริสุทธิ์ด้วย TLC/FID

ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขการทดลองในการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์ม ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบ ไบคอน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 0.5 ลิตร

| Run | Ethanol, <i>E</i> (vol.%) | Potassium hydroxide, <i>K</i> (g /L of oil) |
|-----|------------------------------|--|
| 1 | 14 | 10 |
| 2 | 14 | 12 |
| 3 | 14 | 14 |
| 4 | 17 | 10 |
| 5 | 17 | 12 |
| 6 | 17 | 14 |
| 7 | 20 | 10 |
| 8 | 20 | 12 |
| 9 | 20 | 14 |
| 10 | 23 | 10 |
| 11 | 23 | 12 |
| 12 | 23 | 14 |

3.4.2.2 การศึกษากระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อ

ผลผลิตแบบหมุนวน

ในขั้นตอนการศึกษานี้ใช้น้ำมันที่ผ่านกระบวนการลดกรดไขมันอิสระให้ต่ำกว่า 2 mgKOH/g เป็นน้ำมันเริ่มต้น ทำปฏิกิริยากับเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกรดการค้า ในเบื้องต้นมีการศึกษาหาเงื่อนไขขอบเขตการทดลอง แล้วนำขอบเขตเงื่อนไขการทดลองดังกล่าวมาศึกษาโดยใช้ Response Surface Methodology (RSM) และใช้แผนการทดลองแบบ Central Composite Design โดยศึกษาตัวแปรที่ระดับต่าง ๆ 5 ระดับ ตัวแปร 2 ตัวแปร จะมีทั้งหมด 12 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.6 โดยใช้ชุดทดลองท่อผสมสเถิตแบบหมุนวนขนาดนำร่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เริ่มจากเทน้ำมันปาล์ม 25 ลิตร ลงในถังน้ำมันปาล์ม ในขณะที่เดียวกันก็เปิดปั๊มหมุนวนน้ำมันปาล์มดิบที่อัตราการไหล 500 ลิตรต่อชั่วโมง และเปิดฮีตเตอร์ขนาด 2,000 W และใช้อุปกรณ์ตัดต่อฮีตเตอร์ควบคุมอุณหภูมิภายในถังผสมแบบหมุนวนหรือถังน้ำมันปาล์มตลอดการทำปฏิกิริยาที่ 75 °C และเติมเอทานอลที่ละลายกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ตามปริมาณที่ออกแบบบวกกับค่ากรดไขมันอิสระของน้ำมันเริ่มต้นลงในถังสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และเปิดวาล์วปล่อยสารละลายด้วยอัตราการไหล 495 ลิตรต่อชั่วโมง โดยเริ่มจับเวลาการทำปฏิกิริยาทันทีที่เติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สังเกตดูเมื่อปริมาณของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในถังสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ถูกป้อนเข้าระบบหมุนวนหมดแล้ว จึงปิดวาล์วปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยเก็บตัวอย่างเป็นช่วงเวลาที่ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 และ 120 นาที และในการเก็บตัวอย่างทุกครั้งต้องนำ

ตัวอย่างไปแช่ในน้ำเย็นโดยทันที จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องแล้วถ่ายกลีเซอรอลซึ่งอยู่ด้านล่างทิ้ง แล้วนำไปโอดีเซลซึ่งอยู่ด้านบนมาล้างด้วยน้ำร้อนจนสะอาด นำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบน้ำมันได้ด้วยเทคนิควิธี TLC/FID และสามารถนำไปทดสอบความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ด้วยเครื่องมือทดสอบ Fourier Transform NMR Spectrometer 500 MHz, Model: Unity Inova, Varian, Germany หรือ NMR

ตารางที่ 3.6 เงื่อนไขการทดลองในการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสถิติแบบหมุนวนขนาดนำร่อง บรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร

| Run | Ethanol, <i>E</i> (vol.%) | Potassium hydroxide, <i>K</i> (g /L of oil) |
|-----|------------------------------|--|
| 1 | 9 | 12 |
| 2 | 28 | 6 |
| 3 | 20 | 12 |
| 4 | 20 | 12 |
| 5 | 20 | 20 |
| 6 | 31 | 12 |
| 7 | 28 | 18 |
| 8 | 20 | 12 |
| 9 | 12 | 6 |
| 10 | 20 | 12 |
| 11 | 12 | 18 |
| 12 | 20 | 4 |

3.4.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.4.3.1 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระ

การวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดในตัวอย่างน้ำมันในการศึกษานี้ใช้วิธีการของ The American Oil Chemists' Society Method Cd 3a-63 for Acid Value (AOCS, 1998) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับไอโซโพรพานอลด้วยอัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.8 กรัม ต่อไอโซโพรพานอล 786.9 กรัม (ความเข้มข้น 0.05 นอร์มอล)

2. หยดน้ำมันตัวอย่างลงในขวดรูปชมพู่ประมาณ 0.6-1.0 กรัม

3. หยดไอโซโพรพานอล 6-8 หยดลงไปผสมกับน้ำมันในขวดรูป

ชมพู่แล้วเขย่าให้เข้ากัน

4. หยดฟีนอล์ฟทาลีน 3-5 หยด ลงไปผสมกับน้ำมัน และไอโซโพรพานอล เขย่าให้เข้ากัน

5. ไตรเตรทสารละลายตัวอย่างด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้ โดยค่อย ๆ หยดสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายตัวอย่างช้า ๆ และเขย่าอย่างแรงจนกว่าสารละลายตัวอย่างจะเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีชมพูอ่อนคงที่ประมาณ 30 วินาที แล้วจดบันทึกค่าปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำให้สารละลายตัวอย่างเปลี่ยนสีเป็นสีชมพูอ่อน

6. หาค่าความเป็นกรดด้วยการคำนวณจากสมการที่ 3.1 โดยที่มวลโมเลกุลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์คือ 56.1 กรัมต่อโมล

3.4.3.2 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบในน้ำมันด้วยเทคนิค thin layer chromatography – flame ionization detection

1. อุ่นน้ำมันลดความหนืดเพื่อเตรียมวิเคราะห์หาองค์ประกอบ
2. เตรียมสาร TLC 1 ที่ประกอบด้วย เฮกเซน ไดเอทิลอีเทอร์ และกรดฟอร์มิก ตามอัตราส่วน 50:20:0.3 โดยปริมาตร และเตรียมสาร TLC 2 ที่ประกอบด้วย เฮกเซน และเบนซีน ตามอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร

3. เตรียมน้ำมันตัวอย่าง โดยเตรียมเฮกเซน 0.75 มิลลิลิตร ลงในหลอด lite touch แล้วหยदन้ำมันตัวอย่าง 1 หยดลงในเฮกเซนเขย่าให้เข้ากัน

4. หยดน้ำตัวอย่างที่เตรียมไว้ลงบน Chromarod และนำ Chromarod ไปแช่ในสาร TLC 1 รอจนสารเคลื่อนที่ได้ 80 มิลลิเมตร แล้วนำไปแช่ในสาร TLC 2 ต่อรอจนสารเคลื่อนที่ได้ 100 มิลลิเมตร

5. นำ Chromarod ที่แช่สาร TLC 1 และสาร TLC 2 แล้วไปอบด้วยเครื่อง rod dryer TK-8 ที่อุณหภูมิ 105 °C ประมาณ 10 นาที

6. นำ Chromarod ไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง Itronscan MK6 ซึ่งวิธีการนี้เป็นการแยกสารแต่ละชนิดด้วยอัตราการเคลื่อนที่ที่ไม่เท่ากัน และหาตำแหน่งของไขมันที่แยกออกจากกันด้วยวิธี flam ionization detection โดยใช้อากาศที่อัตราการไหล 2.5 ลิตรต่อนาที และใช้ไฮโดรเจนที่อัตราการไหล 165 ลิตรต่อนาที

3.5 การหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์

การศึกษาเงื่อนไขการทดลองด้วยวิธี response surface methodology, RSM ในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมและสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามโดยใช้ Multiple Regression ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และพิจารณาสมการตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญออก ซึ่งสังเกตได้จากค่า *P*-value ถ้า *P*-value มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าพจน์ดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญต่อ response ส่วนค่า *P*-value ที่น้อยกว่า 0.05 มีนัยสำคัญต่อสมการทำนายความสัมพันธ์ รูปแบบสมการที่ได้

สามารถนำไปสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (response surface) และกราฟ contour ของเงื่อนไขการทดลองในช่วงการแปรค่าตัวแปรอิสระและผลตอบสนองได้

3.6 การหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระ

การหาสถานะที่เหมาะสมในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมชนิดกรดไขมันอิสระสูงสามารถหาได้จากการแก้สมการทำนายความสัมพันธ์ซึ่งสามารถทำนายค่าตัวแปรอิสระทั้ง 2 ได้ คือปริมาณเอทานอลและปริมาณกรดซัลฟิวริก โดยแก้สมการด้วย excel solver ซึ่งอยู่ภายในขอบเขตเงื่อนไขที่กำหนด แล้วจึงทำการทดลองจริงซ้ำเพื่อยืนยันเงื่อนไขการทำปฏิกิริยาที่ได้จากการแก้สมการการทำนาย

3.7 การหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตเอทิลเอสเทอร์

การหาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มสามารถหาได้จากการแก้สมการทำนายความสัมพันธ์ซึ่งสามารถทำนายค่าของตัวแปรอิสระทั้ง 2 ได้ คือปริมาณเอทานอลและปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยแก้สมการด้วย excel solver ซึ่งอยู่ภายในขอบเขตเงื่อนไขที่กำหนด แล้วจึงทำการทดลองจริงซ้ำเพื่อยืนยันเงื่อนไขการทำปฏิกิริยาที่ได้จากการแก้สมการการทำนาย

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

เนื่องจากในการศึกษานี้ใช้น้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บวมที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูงเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ จึงมีการทำปฏิกิริยาสองขั้นตอนเพื่อผลิตเอทิลเอสเทอร์ คือ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระ และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ในการผลิตเอทิลเอสเทอร์ จึงสามารถแสดงผลการทดลองของแต่ละกระบวนการได้ดังนี้

4.1 ผลการทดลองในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

การศึกษาเลือกเกรดเอทานอล สามารถสรุปเลือกความเร็วรอบที่เหมาะสมในการศึกษาที่ 900 รอบต่อนาที และได้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลองเพื่อออกแบบและศึกษาเงื่อนไขการทดลองโดยใช้วิธี Response Surface Methodology (RSM) และใช้แผนการทดลองแบบ Central Composite Design โดยในการทดลองจะทำการศึกษาตัวแปรที่ระดับต่าง ๆ 5 ระดับ ศึกษาตัวแปร 2 ตัวแปร ได้ทั้งหมด 9 เงื่อนไข 12 การทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 และแสดงรหัสตัวแปรอิสระในการศึกษาการเลือกเกรดเอทานอลด้วยชุดปฏิกรณ์แบบใบกวนดังแสดงในตารางที่ 4.2

เมื่อทำการทดลองตามเงื่อนไขที่ออกแบบสามารถวิเคราะห์สรุปผลการทดลองของการลดกรดไขมันอิสระด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% โดยเก็บตัวอย่างเป็นช่วงเวลา ที่ 10, 20, 30 และ 40 นาที แสดงผลดังตารางที่ 4.3 เมื่อควบคุมอุณหภูมิคงที่ตลอดการทำปฏิกิริยา 75 °C และควบคุมมอเตอร์ใบกวนให้ทำงานด้วยความเร็วรอบคงที่ 900 รอบต่อนาที ซึ่งให้ผลการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บวมอยู่ในช่วง 13.025-1.117 mg KOH/g ซึ่งผลจากการวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระตามแผนการทดลองสามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระกับตัวแปรอิสระได้สมการรูปแบบ quadratic polynomial โดยใช้วิธี multiple regression ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ของเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% ตามลำดับ สรุปได้ว่าตัวแปรอิสระคือ ปริมาณเอทานอล และปริมาณกรดซัลฟิวริก มีผลต่อการลดลงของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ

ตารางที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขการทดลองของการลดกรดไขมันอิสระด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% โดยชุดปฏิกรณ์แบบใบกวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 2 ลิตร

| Test no. | Ethanol, E (vol.%) | H ₂ SO ₄ , S (vol.%) |
|----------|--------------------|--|
| 1 | 95.3 | 10.0 |
| 2 | 85.0 | 8.0 |
| 3 | 60.0 | 7.2 |
| 4 | 35.0 | 12.0 |
| 5 | 24.6 | 10.0 |
| 6 | 60.0 | 12.8 |
| 7 | 60.0 | 10.0 |
| 8 | 60.0 | 10.0 |
| 9 | 85.0 | 12.0 |
| 10 | 60.0 | 10.0 |
| 11 | 35.0 | 8.0 |
| 12 | 60.0 | 10.0 |

ตารางที่ 4.2 แสดงรหัสตัวแปรอิสระที่ใช้ในการศึกษาการทดลองของการลดกรดไขมันอิสระด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% โดยชุดปฏิกรณ์แบบใบกวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 2 ลิตร

| Independent variable | Coded level | | | | |
|--|-------------|----|----|----|--------|
| | -1.414 | -1 | 0 | +1 | +1.414 |
| E: Ethanol concentration (vol.%) | 24.6 | 35 | 60 | 85 | 95.3 |
| S: Sulfuric acid concentration (vol.%) | 7.2 | 8 | 10 | 12 | 12.8 |

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองของการลดกรดไขมันอิสระด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% โดยชุดปฏิกรณ์แบบไปกาน ขนาดบรรจุน้ำมีเริ่มต้น 2 ลิตร

| Test no. | Ethanol (E) (vol.%) | Acid value (mgKOH/g) | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------|------------------------------------|--------------------------|----------------|------------------------|--------------------------|----------------|------------------------|--------------------------|----------------|------------------------|--------------------------|----------------|--------|--|--|
| | | H ₂ SO ₄ (S) | | | 10 min | | | 20 min | | | 30 min | | | 40 min | | |
| | | 95% commercial ethanol | 99.9% commercial ethanol | 99% AR ethanol | 95% commercial ethanol | 99.9% commercial ethanol | 99% AR ethanol | 95% commercial ethanol | 99.9% commercial ethanol | 99% AR ethanol | 95% commercial ethanol | 99.9% commercial ethanol | 99% AR ethanol | | | |
| 1 | 95.3 | 3.925 | 2.025 | 1.996 | 2.450 | 1.775 | 2.693 | 2.300 | 1.675 | 2.326 | 2.625 | 1.250 | 3.060 | | | |
| 2 | 85.0 | 3.100 | 1.150 | 2.260 | 2.100 | 1.400 | 3.140 | 2.600 | 1.175 | 2.842 | 2.625 | 1.475 | 2.639 | | | |
| 3 | 60.0 | 4.175 | 2.800 | 2.800 | 3.350 | 1.475 | 2.317 | 3.000 | 1.575 | 2.361 | 3.425 | 1.675 | 2.500 | | | |
| 4 | 35.0 | 7.475 | 4.600 | 5.675 | 6.000 | 2.450 | 4.030 | 5.650 | 2.625 | 4.220 | 5.600 | 2.925 | 5.157 | | | |
| 5 | 24.6 | 13.025 | 9.125 | 8.074 | 8.875 | 4.575 | 7.101 | 8.201 | 4.750 | 6.459 | 7.950 | 5.000 | 6.677 | | | |
| 6 | 60.0 | 4.025 | 2.350 | 1.719 | 3.200 | 2.225 | 1.874 | 3.275 | 2.650 | 2.189 | 3.250 | 2.175 | 2.336 | | | |
| 7 | 60.0 | 3.850 | 2.000 | 1.752 | 2.825 | 1.575 | 1.805 | 2.575 | 1.800 | 1.935 | 3.125 | 1.950 | 2.139 | | | |
| 8 | 60.0 | 3.325 | 1.900 | 2.176 | 2.775 | 1.550 | 2.018 | 2.625 | 1.600 | 2.109 | 3.000 | 1.600 | 2.133 | | | |
| 9 | 85.0 | 2.900 | 1.550 | 1.970 | 1.775 | 1.450 | 1.959 | 2.500 | 1.675 | 1.338 | 2.800 | 1.550 | 1.820 | | | |
| 10 | 60.0 | 3.850 | 2.000 | 1.752 | 2.825 | 1.575 | 1.805 | 2.575 | 1.800 | 1.935 | 3.125 | 1.950 | 2.189 | | | |
| 11 | 35.0 | 5.000 | 2.275 | 2.442 | 4.425 | 2.300 | 2.042 | 4.412 | 2.500 | 2.412 | 4.325 | 3.050 | 2.418 | | | |
| 12 | 60.0 | 3.325 | 1.900 | 2.176 | 2.775 | 1.550 | 2.018 | 2.625 | 1.600 | 2.109 | 3.000 | 1.600 | 2.133 | | | |

$$AV_1 = \beta_0 + \beta_1 E_1 + \beta_2 S + \beta_3 E_1 S + \beta_4 S^2 + \beta_5 S E_1^2 + \beta_6 E_1 S^2 \quad (4.1)$$

$$AV_2 = \beta_0 + \beta_1 E_2^2 + \beta_2 E_2 S + \beta_3 E_2 S^2 \quad (4.2)$$

$$AV_3 = \beta_0 + \beta_1 E_3 + \beta_2 S + \beta_3 E_3 S + \beta_4 S^2 + \beta_5 S E_3^2 + \beta_6 E_3 S^2 \quad (4.3)$$

เมื่อ AV_1 คือ ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% ทำปฏิกิริยาที่ระยะเวลา 30 นาที

AV_2 คือ ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% ทำปฏิกิริยาที่ระยะเวลา 20 นาที

AV_3 คือ ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้เอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% ทำปฏิกิริยาที่ระยะเวลา 20 นาที

E_1 คือ เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95%

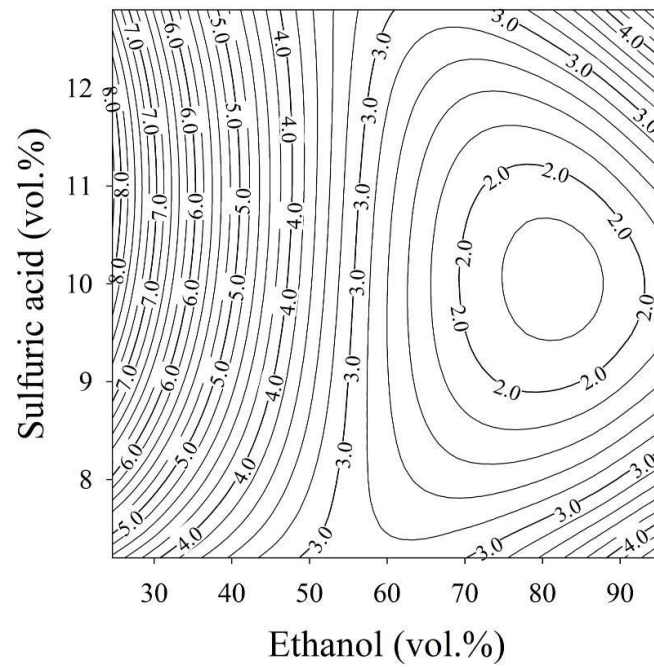
E_2 คือ เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9%

E_3 คือ เอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99%

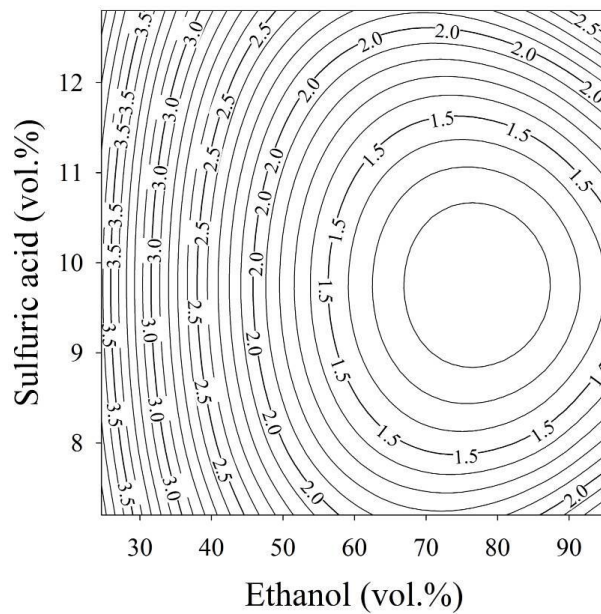
S คือ กรดซัลฟิวริก

β คือ ค่าสัมประสิทธิ์

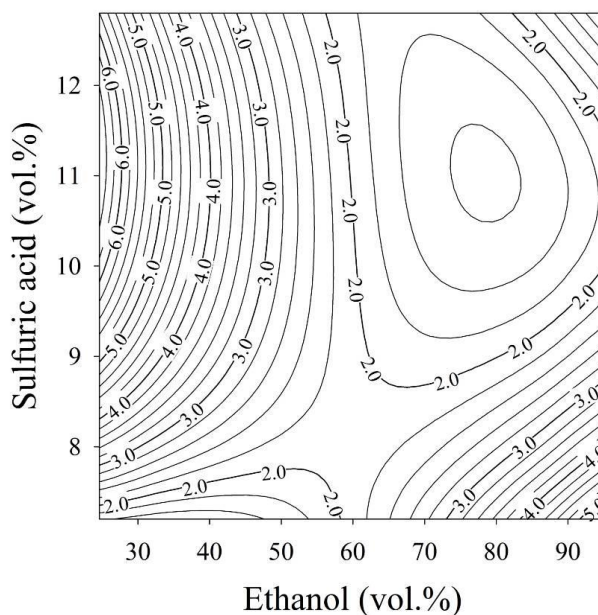
นำเสนอการทำนายความสัมพันธ์ของปริมาณกรดไขมันอิสระกับตัวแปรอิสระไปสร้างกราฟ contour ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณเอทานอลและปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณกรดไขมันอิสระที่สภาวะเหมาะสมของเอทานอลแต่ละเกรด ดังแสดงในรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ของเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แสดงค่าความเป็นกรดที่ค่าของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% และกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



รูปที่ 4.2 แสดงค่าความเป็นกรดที่ค่าของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% และกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที

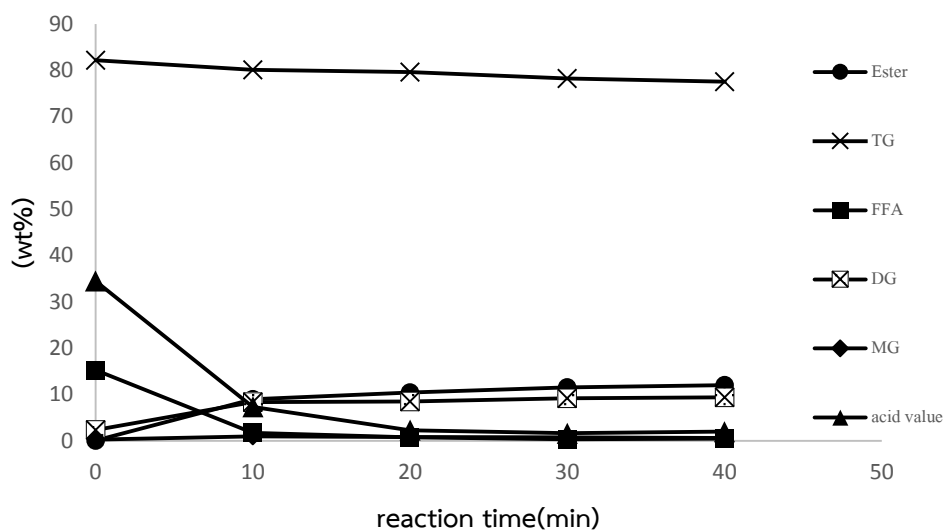


รูปที่ 4.3 แสดงค่าความเป็นกรดที่ค่าของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% และกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที

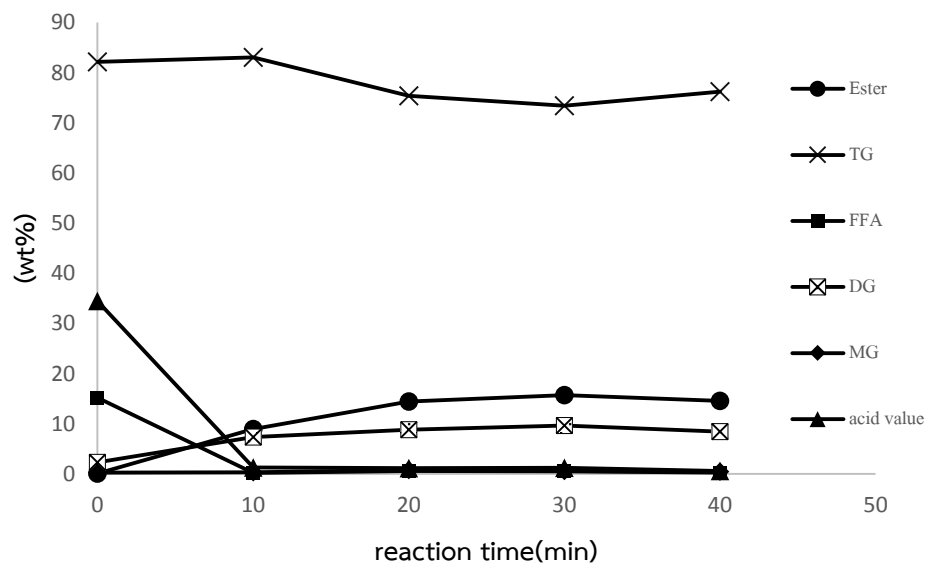
สภาวะที่เหมาะสมของการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บรวมน้ำมันที่มีค่าความเป็นกรดน้อยกว่า 2 mgKOH/g สำหรับกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันขึ้นอยู่กับสมการการทำนายความสัมพันธ์ ซึ่งมีรูปแบบสมการเป็นแบบ second-order polynomial และเมื่อนำสมการไปสร้างพื้นผิวตอบสนอง และกราฟ contour พบสภาวะที่เหมาะสมของเอทานอลเกรดการคำนวณความบริสุทธิ์ 95% ที่เงื่อนไขเอทานอล 81.3 %โดยปริมาตร กรดซัลฟิวริก 10 %โดยปริมาตร เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที เอทานอลเกรดการคำนวณความบริสุทธิ์ 99.9% ที่เงื่อนไขเอทานอล 77.2 %โดยปริมาตร กรดซัลฟิวริก 9.8 %โดยปริมาตร เวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% ที่เงื่อนไขเอทานอล 78.4 %โดยปริมาตร กรดซัลฟิวริก 11 %โดยปริมาตร เวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิตลอดการทำปฏิกิริยาคงที่ 75 °C และความเร็วรอบคงที่ 900 รอบต่อนาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการลดกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บรวมน้ำมัน แสดงผลผลิตของแต่ละการทดลองของเอทานอลเกรดการคำนวณความบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการคำนวณความบริสุทธิ์ 99.9% และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% หลังจากการแยกเฟสเมื่อกำหนด น้ำมันปาล์มดิบเท่ากับ 100% ดังในตารางที่ 4.4 และแสดงแนวโน้มจากผลตรวจสอบองค์ประกอบแต่ละตัวอย่างในแต่ละเงื่อนไข ของเอทานอลเกรดการคำนวณความบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการคำนวณความบริสุทธิ์ 99.9% และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธี TLC / FID ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 และได้องค์ประกอบของน้ำมัน esterified ภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดของกรดที่แตกต่างกันของเอทานอล ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.4 แสดงผลผลิตของแต่ละการทดลองของเอทานอลเกรดต่าง ๆ หลังจากการแยกเฟสของการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95%

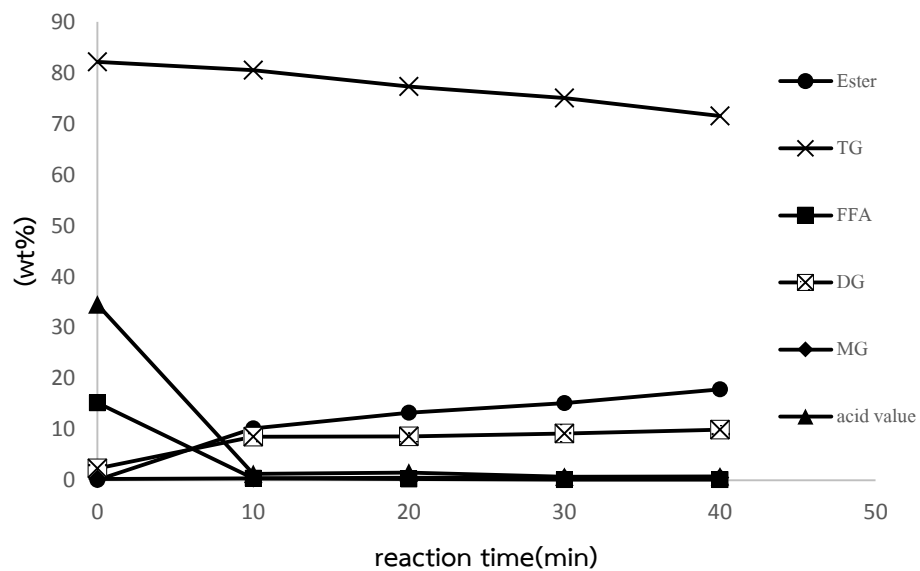
| กระบวนการ | Yield (vol.%) |
|--|---------------|
| การลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% | 115.1 |
| การลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% | 114.2 |
| การลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมด้วยเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% | 118.0 |



รูปที่ 4.4 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% ที่เวลาการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ



รูปที่ 4.5 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% ที่เวลาการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ



รูปที่ 4.6 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% ที่เวลาการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ

การออกแบบการทดลองการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บรวมที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูงให้มีค่าน้อยกว่า 1 %โดยน้ำหนักโดยใช้เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% ในกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน และใช้ถังกวนผสมแบบใบกวน six-blade disk turbine พิจารณาปริมาณการใช้เอทานอล ปริมาณกรดซัลฟิวริก และเวลาในการทำปฏิกิริยา พบว่าการใช้เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% ใช้ปริมาณน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเอทานอลอีกสองชนิด และใช้ปริมาณกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยที่สุด สามารถลดค่าความเป็นกรดจาก 34.5 mg KOH/g เหลือ 1.192 mg KOH/g คิดได้เป็น 96.54% จากเริ่มต้น ภายในเวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที ซึ่งเร็วกว่าการใช้เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% และเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% ซึ่งในสภาวะดังกล่าวพบว่า การใช้เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% ให้สมการการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระกับตัวแปรอิสระทั้ง 2 จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี multiple regression มีค่า coefficient of multiple determination ค่า $R^2 = 0.756$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยจากสมการสามารถสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองและกราฟ contour ของปริมาณกรดไขมันอิสระกับเงื่อนไขการทดลองในช่วงการแปรค่าตัวแปรอิสระ ให้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการลดกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บรวม คือเอทานอล 77.2 %โดยปริมาตร กรดซัลฟิวริก 9.8 %โดยปริมาตร อุณหภูมิ 75 °C และกวนผสมคงที่ตลอดการทำปฏิกิริยา 900 รอบต่อนาที

ตารางที่ 4.5 แสดงแนวโน้มองค์ประกอบของแต่ละตัวอย่างในแต่ละเงื่อนไขของเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% และเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99% ซึ่งถูกวิเคราะห์ด้วยวิธี TLC / FID

| | | เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% | | | | | เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% | | | | | เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99% | | | | | | |
|------------------------------|---------------|------------------------------------|--------|--------|-------|-------|--------------------------------------|--------|--------|--------|-------|------------------------------------|---------------|--------|--------|--------|-------|-------|
| เวลาที่ ถูกศึกษา (min) | acid value | Ester | TG | FFA | DG | MG | acid value | Ester | TG | FFA | DG | MG | acid value | Ester | TG | FFA | DG | MG |
| 0 | 34.5 | 0.059 | 82.166 | 15.233 | 2.348 | 0.244 | 34.5 | 0.059 | 82.166 | 15.233 | 2.348 | 0.244 | 34.5 | 0.059 | 82.166 | 15.233 | 2.348 | 0.244 |
| 10 | 7.32 | 8.954 | 80.107 | 1.686 | 8.338 | 0.915 | 1.321 | 8.975 | 83.059 | 0.236 | 7.368 | 0.326 | 1.225 | 10.201 | 80.530 | 0.345 | 8.545 | 0.379 |
| 20 | 2.294 | 10.386 | 79.636 | 0.709 | 8.451 | 0.818 | 1.192 | 14.454 | 75.394 | 0.569 | 8.807 | 0.776 | 1.478 | 13.290 | 77.330 | 0.239 | 8.620 | 0.521 |
| 30 | 1.621 | 11.538 | 78.199 | 0.357 | 9.189 | 0.717 | 1.243 | 15.751 | 73.456 | 0.531 | 9.682 | 0.580 | 0.678 | 15.160 | 75.059 | 0.141 | 9.201 | 0.439 |
| 40 | 1.954 | 12.000 | 77.550 | 0.473 | 9.371 | 0.607 | 0.564 | 14.543 | 76.264 | 0.246 | 8.474 | 0.473 | 0.755 | 17.869 | 71.534 | 0.137 | 9.959 | 0.501 |

หมายเหตุ : จากตารางแสดงแนวโน้มองค์ประกอบของน้ำมันตั้งแต่แสดงในตารางข้างต้น พบว่า ค่าการตกตะกอนในแต่ละเงื่อนไขของเอทานอลทั้ง 3 เกรดไม่เป็นสัดส่วนแนวโน้มเดียวกัน เพราะค่าที่แสดงได้จากข้อมูลที่ได้จากการเฉลี่ยจากผลของการวิเคราะห์ 5 ครั้งด้วยกัน จึงเกิดความคลาดเคลื่อนเช่นเดียวกับในคอลัมน์ของเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% เกิดค่าของเอสเทอร์ที่ลดลงในนาทีที่ 40 ในขณะที่เดียวกันค่าไตรกลีเซอไรด์ก็เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.6 แสดงองค์ประกอบของน้ำมัน esterified ภายใต้เงื่อนไขที่ดีที่สุดของเกรดที่แตกต่างกันของเอทานอล

| Property | Esterified oil under optimal conditions | | |
|-------------------------------------|---|------------------------|---------------------|
| | 95% commercial grade | 99.9% commercial grade | 99% anhydrous grade |
| | @ 30 min. | @ 20 min. | @ 30 min. |
| Free fatty acid (wt.%) | 0.857 | 0.569 | 0.571 |
| Triglyceride (wt.%) | 76.699 | 75.393 | 75.058 |
| Diglyceride (wt.%) | 9.189 | 8.807 | 9.201 |
| Monoglyceride (wt.%) | 0.717 | 0.777 | 0.439 |
| Ester (wt.%) | 12.538 | 14.454 | 14.731 |
| Acid value (mgKOH.g ⁻¹) | 1.621 | 1.192 | 1.278 |

จากผลทดลองเลือกเกรดเอทานอลในการลดกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์มดิบชนิดหีบรวม สรุปได้ว่าเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% เป็นเกรดที่เหมาะสมที่สุด และนำเงื่อนไขที่ได้เบื้องต้นมาศึกษาการทำปฏิกิริยาด้วยชุดปฏิกรณ์แบบท่อผสมสเถิตหมุนวน โดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบให้ต่ำกว่า 1% โดยน้ำหนัก พบว่าการทำปฏิกิริยาของเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% ภายใต้เงื่อนไขเอทานอล 80 % โดยปริมาตรสามารถลดกรดไขมันได้ดีที่สุด แต่ที่ปริมาณเอทานอลต่ำลงมากคือ 60 % โดยปริมาตร ก็สามารถลดค่าความเป็นกรดในน้ำมันปาล์มดิบได้ต่ำกว่า 2 mg KOH/g จึงเลือกเอทานอล 60 % โดยปริมาตร เป็นขอบเขตเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง และศึกษาเงื่อนไขการทดลองโดยวิธี Response Surface Methodology (RSM) และใช้แผนการทดลองแบบ Central Composite Design โดยในการทดลอง จะทำการศึกษาตัวแปรที่ระดับต่าง ๆ 5 ระดับ 2 ตัวแปร ได้ทั้งหมด 9 เงื่อนไข 12 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และได้แสดงรหัสตัวแปรอิสระที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และทดลองวิเคราะห์สรุปผลการทดลองของการลดกรดไขมันอิสระด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% เก็บตัวอย่าง ทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้ผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.7 แสดงเงื่อนไขการทดลองในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องปฏิกรณ์ต่อผสมสเถิตแบบหมุนวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร

| Test no. | Ethanol (vol.%) | H ₂ SO ₄ (S) (vol.%) |
|----------|-----------------|--|
| 1 | 60 | 5 |
| 2 | 95 | 5 |
| 3 | 60 | 5 |
| 4 | 60 | 5 |
| 5 | 85 | 8 |
| 6 | 35 | 8 |
| 7 | 60 | 1 |
| 8 | 35 | 2 |
| 9 | 85 | 2 |
| 10 | 25 | 5 |
| 11 | 60 | 5 |
| 12 | 60 | 9 |

ตารางที่ 4.8 แสดงรหัสตัวแปรอิสระที่ใช้ในการศึกษาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องปฏิกรณ์ต่อผสมสเถิตแบบหมุนวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร

| Independent variable | Coded level | | | | |
|---|-------------|----|----|----|--------|
| | -1.414 | -1 | 0 | +1 | +1.414 |
| E: Ethanol concentration (vol.%) | 25 | 35 | 60 | 85 | 95 |
| S: Sulfuric acid concentration (vol.%) | 1 | 2 | 5 | 8 | 9 |

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองของการลดกรดไขมันอิสระด้วยเอทานอลเกรดการคำนวณบริสุทธิ์ 99.9% โดยชุดปฏิบัติการห้องผสมสกัดแบบหมุนวน ขนาดปริมาตรน้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร

| Test no. | Ethanol (vol%) | H ₂ SO ₄ (S) (vol%) | AV 5min (mgKOH/g) | AV 10min (mgKOH/g) | AV 15min (mgKOH/g) | AV 20min (mgKOH/g) | AV 25min (mgKOH/g) | AV 30min (mgKOH/g) | AV 35min (mgKOH/g) | AV 40min (mgKOH/g) | AV 45min (mgKOH/g) | AV 50min (mgKOH/g) | AV 55min (mgKOH/g) | AV 60min (mgKOH/g) |
|----------|----------------|---|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 60 | 5 | 4.2874 | 2.5525 | 1.7845 | 1.9940 | 1.9702 | 1.9227 | 1.8972 | 1.7334 | 1.8516 | 1.7935 | 1.9329 | 2.2226 |
| 2 | 95 | 5 | 3.3095 | 2.2087 | 1.9673 | 1.8532 | 1.828 | 2.5748 | 2.1617 | 3.0728 | 1.8390 | 1.9269 | 2.5490 | 2.2900 |
| 3 | 60 | 5 | 4.2874 | 2.5525 | 1.7845 | 1.9940 | 1.9702 | 1.9227 | 1.8972 | 1.7334 | 1.8516 | 1.7935 | 1.9329 | 2.2226 |
| 4 | 60 | 5 | 4.2874 | 2.5525 | 1.7845 | 1.9940 | 1.9702 | 1.9227 | 1.8972 | 1.7334 | 1.8516 | 1.7935 | 1.9329 | 2.2226 |
| 5 | 85 | 8 | 3.5534 | 2.7399 | 3.0598 | 3.7711 | 2.6726 | 3.4020 | 2.8571 | 3.4026 | 3.5979 | 3.6281 | 3.8773 | 2.8905 |
| 6 | 35 | 8 | 6.1199 | 4.5387 | 3.9030 | 4.8967 | 3.5643 | 3.4773 | 3.6570 | 3.6755 | 3.5894 | 3.7922 | 3.1746 | 3.8564 |
| 7 | 60 | 1 | 11.8808 | 10.7725 | 10.0631 | 8.7765 | 7.6055 | 6.8725 | 6.3346 | 5.5270 | 5.0923 | 4.3695 | 4.1682 | 3.7891 |
| 8 | 35 | 2 | 3.6747 | 3.4997 | 3.2657 | 3.1546 | 3.1900 | 2.8456 | 2.6637 | 2.6622 | 2.4748 | 2.8388 | 2.7238 | 2.9981 |
| 9 | 85 | 2 | 10.9353 | 7.7190 | 5.8676 | 4.5177 | 3.2192 | 2.4910 | 2.6469 | 2.3008 | 2.1672 | 2.2409 | 1.8322 | 1.9910 |
| 10 | 25 | 5 | 10.3178 | 4.5150 | 4.3011 | 3.7134 | 3.6370 | 3.1906 | 2.9382 | 3.0687 | 3.0329 | 3.2740 | 3.4316 | 3.1236 |
| 11 | 60 | 5 | 4.2874 | 2.5525 | 1.7845 | 1.9940 | 1.9702 | 1.9227 | 1.8972 | 1.7334 | 1.8516 | 1.7935 | 1.9329 | 2.2226 |
| 12 | 60 | 9 | 3.3264 | 2.6919 | 2.4598 | 2.5630 | 3.0195 | 4.2722 | 4.2099 | 4.2703 | 3.8311 | 4.3350 | 3.7702 | 4.3987 |

(ทุกการทดลองกำหนดปริมาตรน้ำมันเริ่มต้นที่ 5 ลิตร และอุณหภูมิตลอดการทำปฏิกิริยา 75 °C อัตราการไหลปั๊มเอทานอล 37 ลิตรต่อชั่วโมง ปริมาตรน้ำมันดิบและเปิดปั๊มหมุนวนน้ำมันของระบบ 56 ลิตรต่อชั่วโมง และปั๊มกรดซัลฟิวริก 2.5 ลิตรต่อชั่วโมง)

ผลการทดลองทั้ง 12 เงื่อนไข สามารถวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่เหมาะสมและมีความแม่นยำได้ด้วยการทำ Multiple Regression โดยกำหนดค่าความสามารถลดกรดไขมันอิสระได้เป็น Response ซึ่งจากการวิเคราะห์ได้เลือก Response ที่เหมาะสมที่เวลาทำปฏิกิริยา 15, 20, 50 และ 60 นาที เมื่อพิจารณาด้วยค่า R^2 เข้าใกล้ 1 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ให้ค่า R^2 เข้าใกล้ 1 (มากกว่า 0.8), R^2 for Prediction มากกว่า 0.65 และ $R^2_{adjusted}$ มากกว่า R^2 for Prediction ได้สมการความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 4.4, 4.5, 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ แสดง Response Surfaces ดังแสดงในรูปที่ 4.7, 4.8, 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงการเปรียบเทียบปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่สามารถลดค่าความเป็นกรดได้เท่ากับ 2 mgKOH/g ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ของการศึกษาการลดกรดไขมันอิสระด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสถิติแบบหมุนวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณการใช้สารเคมีและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา พบว่าเวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที ให้ Response ที่เหมาะสมที่สุด โดยให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.999, $R^2_{adjusted}$ เท่ากับ 0.998 และ R^2 for Prediction เท่ากับ 0.975 ได้เงื่อนไขการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการลดกรดไขมันอิสระคือที่ เอทานอล 66 %โดยปริมาตร และกรดซัลฟิวริก 7 %โดยปริมาตร เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งให้ Response เป็น 1.241 mg KOH/g เนื่องจากค่าความเชื่อมั่นจากการทำนายของสมการที่ให้ค่าใกล้เคียง 1 ที่สุด

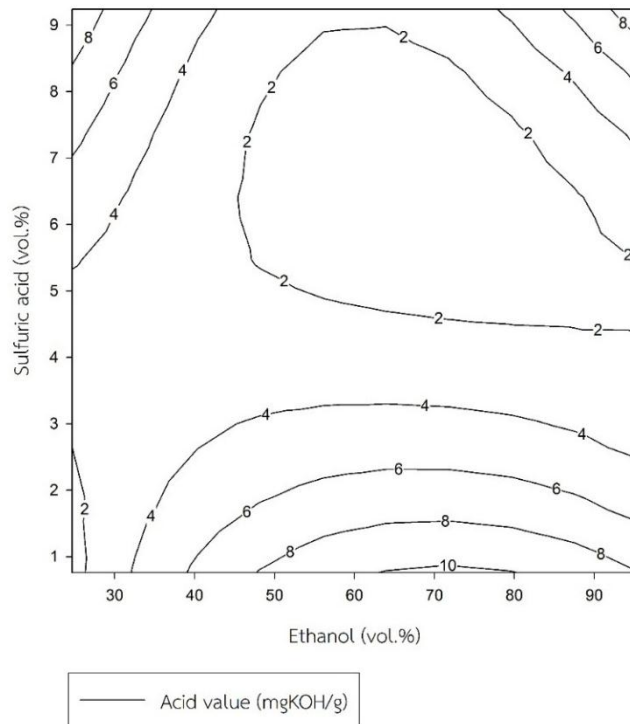
เมื่อทำการทดลองตามเงื่อนไขเอทานอล 66 %โดยปริมาตร และกรดซัลฟิวริก 7 %โดยปริมาตร และเก็บตัวอย่างน้ำมันลดกรดที่เวลาทำปฏิกิริยาที่ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 นาที พบว่าที่เวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที สามารถลดกรดไขมันอิสระเป็น 1.35 mg KOH/g ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการทำนาย response เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการแยกชั้นระหว่างน้ำมันลดกรดและของเสียหลังจากทำปฏิกิริยาในขั้นตอนการลดกรดไขมันอิสระของน้ำมันปาล์มดิบด้วยท่อผสมสถิติแบบหมุนวนตามเงื่อนไขการทดลองเอทานอล 66 %โดยปริมาตร และกรดซัลฟิวริก 7 %โดยปริมาตร เวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาที พบว่าของเสียจะตกตะกอนแยกชั้นจากน้ำมันลดกรดภายในระยะเวลา 15 นาที

$$AV_{15\text{min}} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 S + \beta_3 E^2 + \beta_4 ES + \beta_5 E^2S + \beta_6 ES^2 \quad (4.4)$$

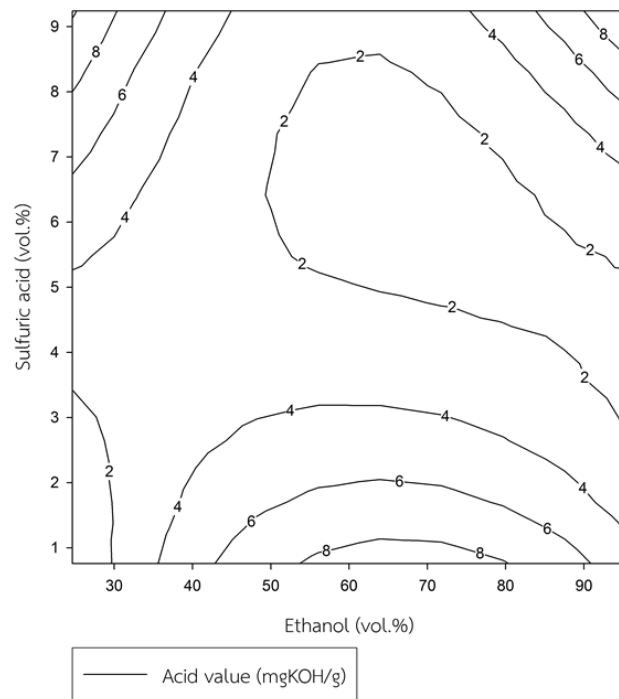
$$AV_{20\text{min}} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 S + \beta_3 E^2 + \beta_4 SE + \beta_5 E^2S + \beta_6 ES^2 \quad (4.5)$$

$$AV_{50\text{min}} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 E^2 + \beta_3 ES + \beta_4 S^2 + \beta_5 E^2S \quad (4.6)$$

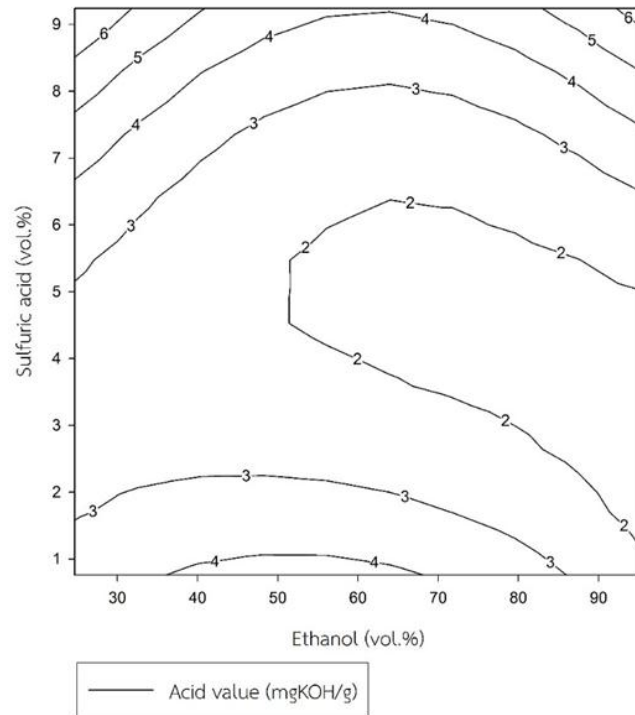
$$AV_{60\text{min}} = \beta_0 + \beta_1 S^2 + \beta_2 S + \beta_3 E \quad (4.7)$$



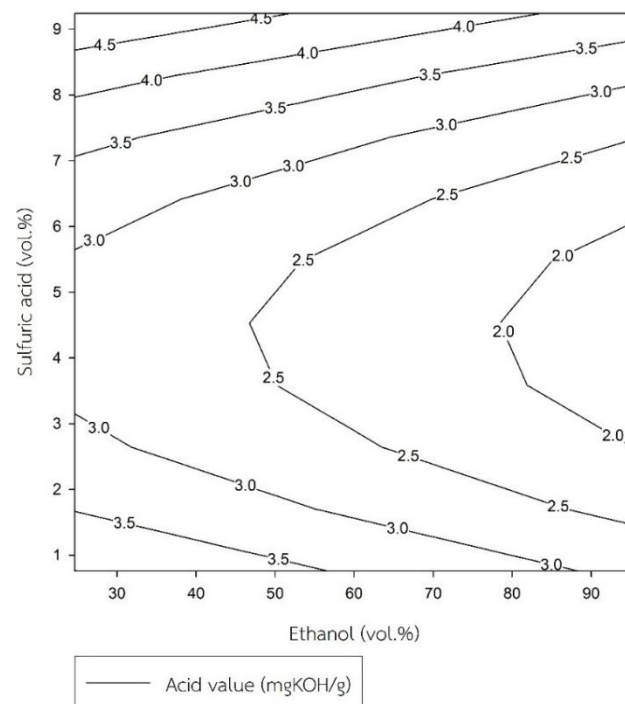
รูปที่ 4.7 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที



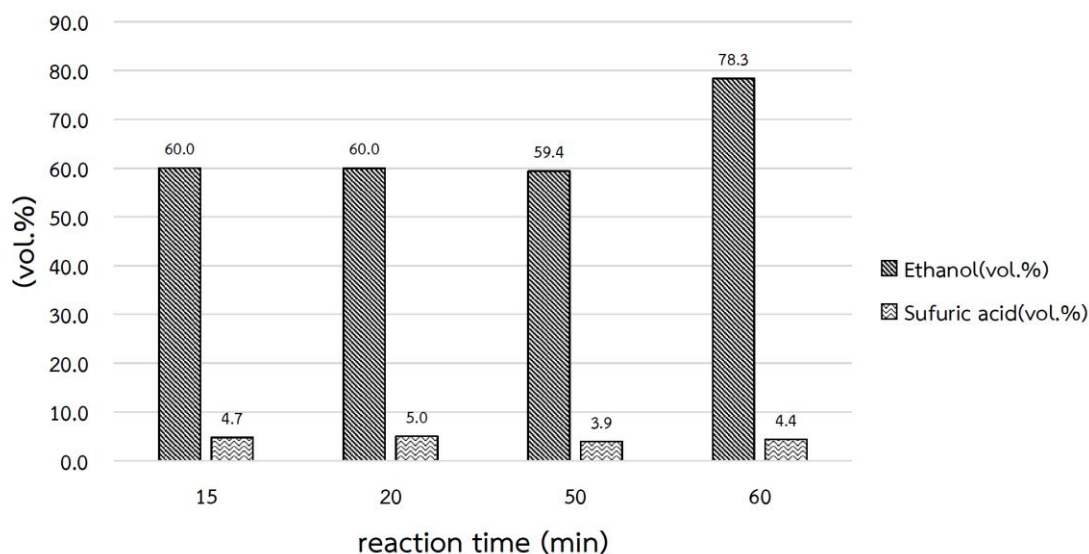
รูปที่ 4.8 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที



รูปที่ 4.9 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที



รูปที่ 4.10 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที



รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่สามารถลดค่าความเป็นกรดได้เท่ากับ 2 mgKOH/g ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ของการศึกษาการลดกรดไขมันอิสระ ด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร

การศึกษาการลดกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงด้วยท่อผสมสติดแบบหมุนวนขนาดนำร่อง 100 ลิตร พบว่าระยะเวลาการทำปฏิกิริยามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอไรด์ในน้ำมันเป็นเอสเทอร์ ซึ่งเป็นการแปลงองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบที่โดยรวมที่ส่วนใหญ่เป็นไตรกลีเซอไรด์ คือเมื่อระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ก็สูงขึ้นตามไปด้วย โดยจะมีการแปลงของเอสเทอร์อย่างรวดเร็วในช่วงเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 30-180 นาที แต่หลังจากผ่านไป 180 นาที หรือ 3 ชั่วโมง จนถึงช่วงเวลา 6 ชั่วโมง การแปลงของเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเริ่มคงที่หลังจากผ่านเวลาในการทำปฏิกิริยาช่วง 6-12 ชั่วโมง และสามารถผลิตเอทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์สูงสุด 93.46 % โดยน้ำหนัก ที่เวลา 12 ชั่วโมง

4.2 ผลการทดลองในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การศึกษาหาขอบเขตเงื่อนไขการทดลองของการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน ได้ 12 การทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.10 ซึ่งทำการทดลองด้วยชุดทดลองแบบใบกวนในปิกเกอร์ ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 0.5 ลิตร เก็บตัวอย่างที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 และ 150 นาที พบว่าในเงื่อนไขการทดลองที่ 1-6 และเงื่อนไขการทดลองที่ 10 ไม่มีการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรอลและเอทิลเอสเทอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และสำหรับเงื่อนไขที่ 7-9 และเงื่อนไขที่ 11, 12 เป็นเงื่อนไขที่ทำให้เกิดการแยกชั้นของกลีเซอรอลและเอทิลเอสเทอร์ในบางช่วงเวลา ตัวอย่างน้ำมันที่มีการแยกชั้นสามารถนำมา

ผ่านกระบวนการล้าง และทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี TLC/FID เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันได้
ดังแสดงในรูปที่ 4.13-4.17

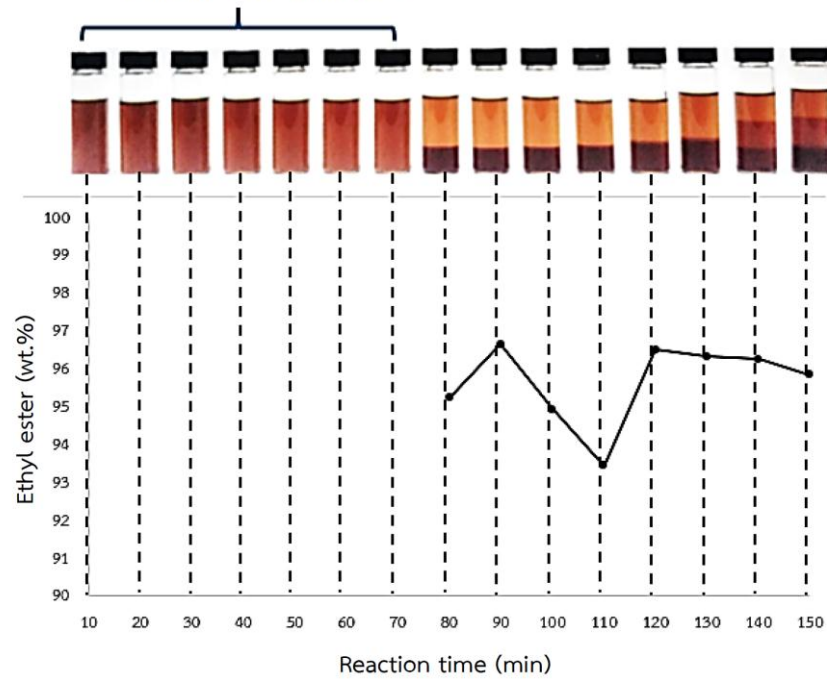
ตารางที่ 4.10 แสดงเงื่อนไขการทดลองในการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุดทดลองแบบใบกวน ขนาด
บรรจุน้ำมันเริ่มต้น 0.5 ลิตร

| Test no. | Ethanol (vol. %) | KOH (g/Liter of oil) |
|----------|------------------|----------------------|
| 1 | 14 | 10 |
| 2 | 14 | 12 |
| 3 | 14 | 14 |
| 4 | 17 | 10 |
| 5 | 17 | 12 |
| 6 | 17 | 14 |
| 7 | 20 | 10 |
| 8 | 20 | 12 |
| 9 | 20 | 14 |
| 10 | 23 | 10 |
| 11 | 23 | 12 |
| 12 | 23 | 14 |



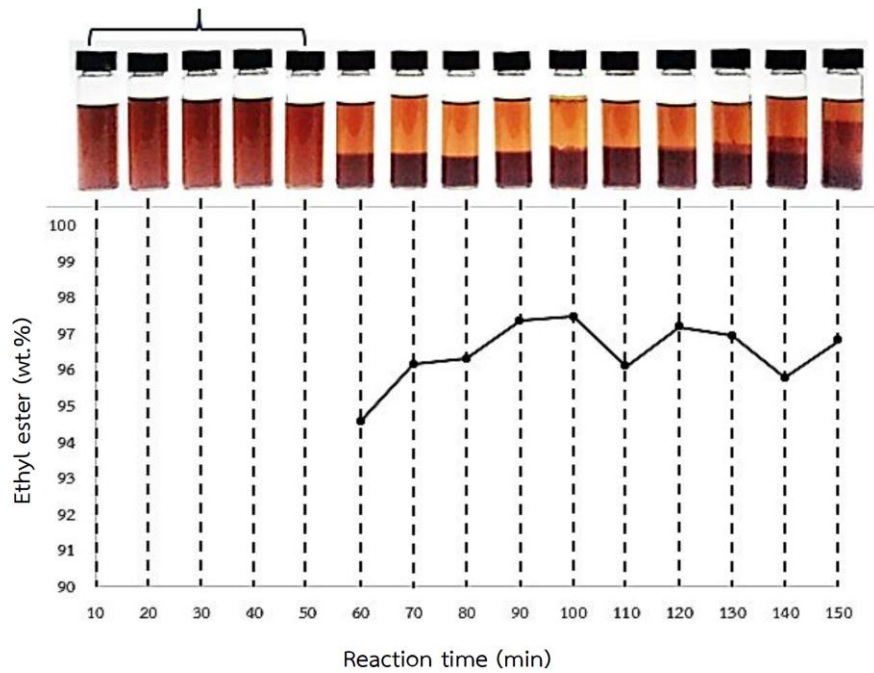
รูปที่ 4.12 แสดงตัวอย่างลักษณะน้ำมันที่ได้จากเงื่อนไขการทดลอง 1-6 และเงื่อนไขการทดลองที่ 10
ที่ไม่มีการแยกชั้นของกลีเซอรอลและเอทิลเอสเทอร์เหมือนกันทั้งหมด

ตัวอย่างน้ำมันที่ไม่มีการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรอลและเอทิลเอสเทอร์
จึงไม่มีผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบ



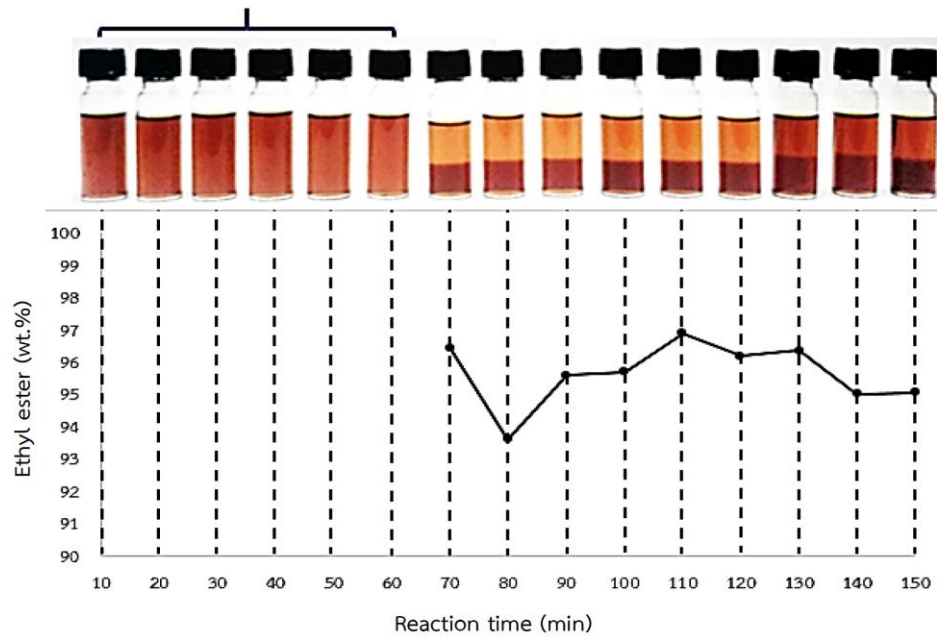
รูปที่ 4.13 แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ในตัวอย่างน้ำมันของเงื่อนไขการทดลอง เอทานอล 20 %โดยปริมาตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ +10 g/liter of oil

ตัวอย่างน้ำมันที่ไม่มีการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรอลและเอทิลเอสเทอร์
จึงไม่มีผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบ

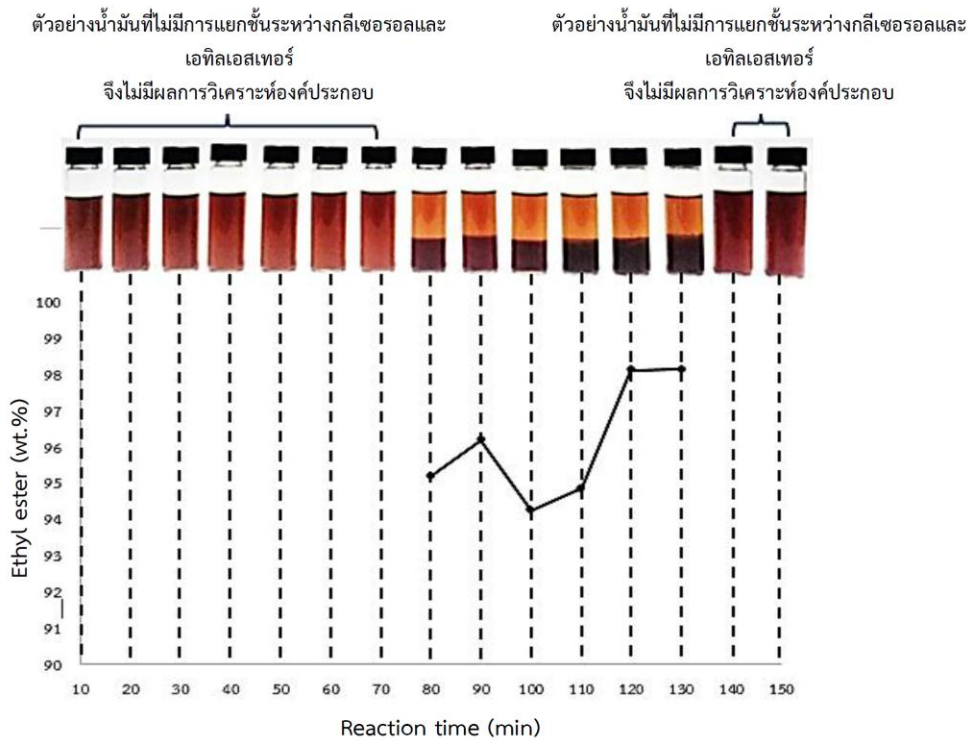


รูปที่ 4.14 แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ในตัวอย่างน้ำมันของเงื่อนไขการทดลอง เอทานอล 20 %โดยปริมาตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ +12 g/liter of oil

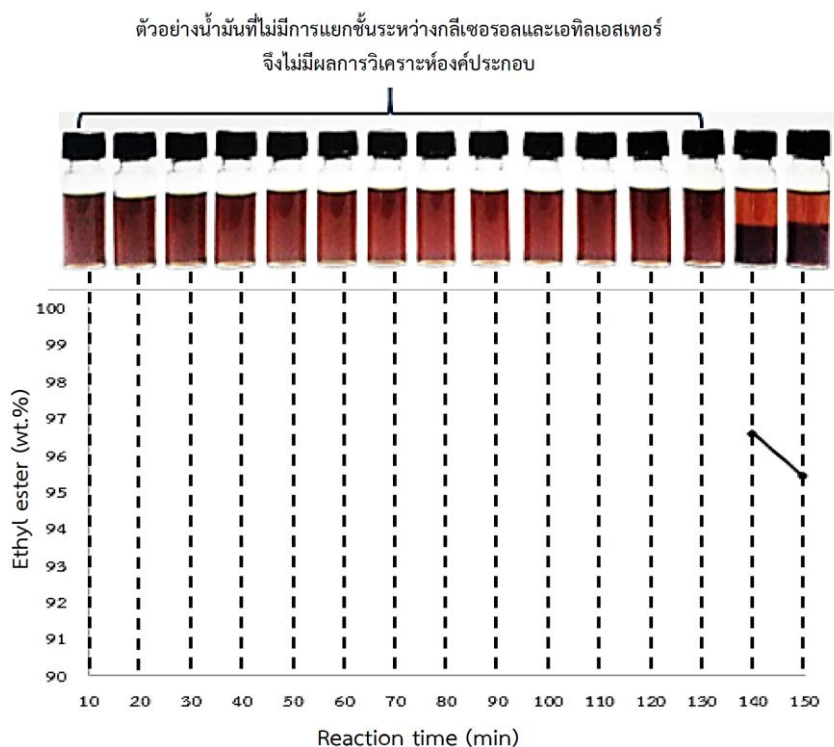
ตัวอย่างน้ำมันที่ไม่มีการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรอลและเอทิลเอสเทอร์
จึงไม่มีผลการวิเคราะห์องค์ประกอบ



รูปที่ 4.15 แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ในตัวอย่างน้ำมันของเงื่อนไขการทดลอง เอทานอล 20 %โดยปริมาตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ +14 g/liter of oil



รูปที่ 4.16 แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ในตัวอย่างน้ำมันของเงื่อนไขการทดลอง เอทานอล 23 %โดยปริมาตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ +12 g/liter of oil



รูปที่ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเตอร์ในตัวอย่างน้ำมันของเงื่อนไขการทดลอง เอทานอล 23 %โดยปริมาตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ +14 g/liter of oil

ผลการทดลองการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุดทดลองแบบใบกวน ขนาดบรรจุน้ำมัน เริ่มต้น 0.5 ลิตร ได้ตัวอย่างน้ำมันทั้งแยกชั้นและไม่แยกชั้นระหว่างเอทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล เนื่องจากการเกิดอิมัลชันที่มีความเสถียรจนเกิดการขัดขวางการแยกชั้น และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันตัวอย่างที่ได้จากการทดลองทั้ง 12 เงื่อนไข สามารถสรุปสถานะที่เหมาะสมของการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบด้วยชุดทดลองแบบใบกวน คือที่เงื่อนไข เอทานอล 23 %โดยปริมาตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ +12 g/liter of oil ที่เวลาทำปฏิกิริยา 130 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิตลอดการทำปฏิกิริยาคงที่ 75 °C ความเร็วการกวนผสม 900 รอบต่อนาที เป็นสถานะที่ให้ค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ 98.114 %โดยน้ำหนัก สูงที่สุดเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี TLC/FID แสดงในรูปที่ 4.16 แต่เมื่อพิจารณาความสามารถในการแยกชั้นระหว่างเอทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล เงื่อนไขที่เหมาะสมและให้ช่วงระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ไม่เกิดอิมัลชันที่มีความเสถียรจนเกิดการขัดขวางการแยกชั้นคือเงื่อนไขเอทานอล 20 %โดยปริมาตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ +12 g/liter of oil โดยเริ่มแยกชั้นตั้งแต่ 60-150 นาที ที่อุณหภูมิควบคุมคงที่ตลอดการทำปฏิกิริยา 75 °C ความเร็วการกวนผสม 900 รอบต่อนาที ให้ค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ 97.456% ที่เวลา 100 นาที เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี TLC/FID แสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งให้ค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์สูงกว่าเงื่อนไขอื่น ๆ ภายในระยะเวลาทำปฏิกิริยาที่เท่ากัน จึงสรุปได้ว่าเงื่อนไขนี้เป็นเงื่อนไขที่

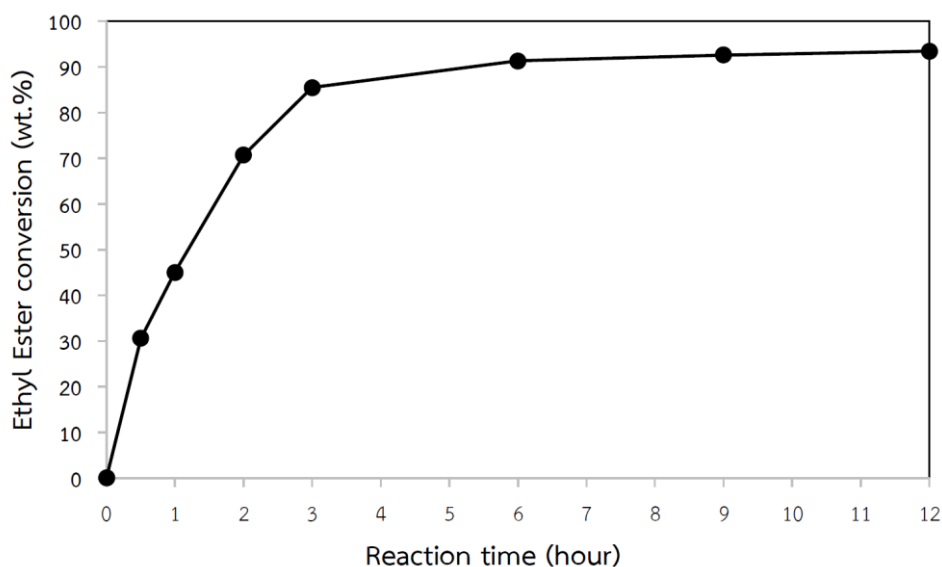
เหมาะสมที่สุดในการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มด้วยชุดทดลองแบบใบกวน ขนาดบรรจุน้ำมัน เริ่มต้น 0.5 ลิตร

จากการศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มด้วยท่อผสมสติดแบบหมุนวน เมื่อการเตรียมน้ำมันปาล์มดิบด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวนขนาดนาร่อง ถึงบรรจุน้ำมัน เริ่มต้น 100 ลิตร โดยกระบวนการลดกรดไขมันอิสระจากที่ศึกษาภายใต้เงื่อนไข เอทานอล 66 %โดย ปริมาตร กรดซัลฟิวริก 7 %โดยปริมาตร เวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที และอุณหภูมิตลอดการทำ ปฏิกิริยา 75 °C เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบคุณลักษณะของน้ำมันลดกรดดังกล่าว ได้ดังแสดงในตาราง ที่ 4.11 และเมื่อทำปฏิกิริยาเลยต่อไปที่ 30 นาที พบว่ามีค่าความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์สูงถึง 30.58 % โดยน้ำหนัก จึงศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในขั้นตอนเดียวด้วยชุด ปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวนขนาดนาร่อง ถึงบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร ซึ่งใช้เงื่อนไขการ ทดลองเดียวคือ เอทานอล 66 %โดยปริมาตร กรดซัลฟิวริก 7 %โดยปริมาตร เก็บตัวอย่างที่เวลาการทำ ปฏิกิริยา 0.5, 1, 2, 3, 6, 9 และ 12 ชั่วโมง และวัดความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องมือ ทดสอบ NMR ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาของการทำปฏิกิริยามีผล ต่อการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอไรด์ในน้ำมันเป็นเอสเทอร์ ซึ่งในการทดลองนี้เป็นการแปลง องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบที่บรวม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นไตรกลีเซอไรด์ พบว่าเมื่อระยะเวลาการทำ ปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ก็สูงขึ้นตามไปด้วย โดยมีการแปลงของเอสเทอร์ อย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 30-180 นาที แต่หลังจากผ่านไป 180 นาที หรือ 3 ชั่วโมง จนถึงเวลา 6 ชั่วโมง การแปลงของเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเริ่มคงที่หลังจาก 6-12 ชั่วโมง โดยสามารถผลิตเอทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์สูงสุด 93.46 %โดยน้ำหนัก ที่เวลา 12 ชั่วโมง แต่ค่าดังกล่าวก็ยังไม่ผ่านค่าความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ 96.5 %โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าตามมาตรฐาน ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2556 จึงศึกษาทดลอง การใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในการเปลี่ยนแปลงเป็นเอสเทอร์ ในขั้นตอนที่สอง ต่อจาก กระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน

ตารางที่ 4.11 แสดงคุณลักษณะและองค์ประกอบของน้ำมันลดกรดตามเงื่อนไข เอทานอล 66 %โดยปริมาตร กรดซัลฟิวริก 7 %โดยปริมาตร เวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที และอุณหภูมิตลอดการทำปฏิกิริยา 75 °C โดยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวนขนาดนาร่อง ถึงบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร

Physical properties and compositions:

| | |
|---------------------------------------|--------------------------|
| Density at 75°C (kg.L ⁻¹) | 0.896 |
| Viscosity at 75°C (cSt) | 6.29 |
| Free fatty acid (wt.%) | 0.823 |
| Triglyceride (wt.%) | 75.264 |
| Diglyceride (wt.%) | 5.935 |
| Monoglyceride (wt.%) | 1.022 |
| Ester (wt.%) | 16.956 |
| Acid value (mgKOH.g ⁻¹) | 2.3047 (crude biodiesel) |



รูปที่ 4.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเอทิลเอสเทอร์ของน้ำมันปาล์มดิบ ต่อเวลาในการทำปฏิกิริยาด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน ขนาดนาร่องบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร

การศึกษาหาเงื่อนไขขอบเขตการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวนขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร พบว่าน้ำมันที่ได้หลังจากทำปฏิกิริยาของทุกเงื่อนไขที่ทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวนไม่มีการแยกชั้นระหว่างเอทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ในขณะที่ใช้เงื่อนไขเดียวกันกับชุดการทดลองอื่น ๆ ทั้งแบบแท่งแม่เหล็กวนผสมในปิกเกอร์ ชุดทดลองไบพัตควมผสมความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที และการผสมโดยใช้คลื่นด้วยอัลตราโซนิกในชุดทดลองขนาด 50 มิลลิลิตร มีการแยกชั้นของเอทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล

โดยคาดว่าจะมีสาเหตุเนื่องจากความรุนแรงของการกวนผสมที่ส่งผลให้กลีเซอรอลรวมอยู่ในชั้นของเอทิลเอสเทอร์ ส่งผลให้ไม่เกิดการแยกชั้น แต่ถึงจะไม่แยกชั้นกลีเซอรอลและเอทิลเอสเทอร์ เอทิลเอสเทอร์ที่ได้ก็มีผลผลิตสูง จึงได้มีการศึกษาขอบเขตเงื่อนไขการทดลองโดยใช้ Response Surface Methodology (RSM) และใช้แผนการทดลองแบบ Central Composite Design โดยในการทดลอง จะทำการศึกษาตัวแปรที่ระดับต่าง ๆ 5 ระดับ ซึ่งศึกษาตัวแปร 2 ตัวแปร แสดงรหัสตัวแปรอิสระที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ดังแสดงในตารางที่ 4.12 ได้ทั้งหมด 9 เงื่อนไข 12 การทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.12 แสดงรหัสตัวแปรอิสระที่ใช้ในการศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุดปฏิกรณ์ที่ผสมสเถียรแบบหมุนวนขนาดนำร่องบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร

| Independent variable | Coded level | | | | |
|--|-------------|----|----|----|--------|
| | -1.414 | -1 | 0 | +1 | +1.414 |
| E: Ethanol concentration (vol. %) | 9 | 12 | 20 | 28 | 31 |
| K: Potassium Hydroxide (mg KOH/Liter of oil) | 4 | 6 | 12 | 18 | 20 |

ตารางที่ 4.13 แสดงเงื่อนไขการทดลองในการศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุดปฏิกรณ์ที่ผสมสเถียรแบบหมุนวน ขนาดนำร่องบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร

| Test no. | Ethanol (vol. %) | Potassium Hydroxide (g/Liter of oil) |
|----------|------------------|--------------------------------------|
| 1 | 9 | 12 |
| 2 | 28 | 6 |
| 3 | 20 | 12 |
| 4 | 20 | 12 |
| 5 | 20 | 20 |
| 6 | 31 | 12 |
| 7 | 28 | 18 |
| 8 | 20 | 12 |
| 9 | 12 | 6 |
| 10 | 20 | 12 |
| 11 | 12 | 18 |
| 12 | 20 | 4 |

เมื่อได้เงื่อนไขการทดลองสามารถนำมาทดลองและวิเคราะห์สรุปผลการทดลองของการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% เมื่อเก็บตัวอย่าง ที่เวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 และ 120 นาที ทั้งหมด 12 การทดลอง แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.14 และสามารถนำมาวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่เหมาะสมและมีความแม่นยำได้ด้วย Multiple Regression โดยกำหนดค่าความสามารถในการแปลงเป็นเอสเทอร์เป็น Response ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลการทดลองทั้ง 12 การทดลอง ได้สมการความสัมพันธ์ที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาด้วยค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 (มากกว่า 0.8), R^2 for Prediction มากกว่า 0.65 และ $R^2_{adjusted}$ มากกว่า R^2 for Prediction ที่เหมาะสมที่สุดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 15, 50, 60, 70 และ 120 นาที ได้สมการความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ แสดง Response Surfaces ดังแสดงในรูปที่ 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงการเปรียบเทียบปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่สามารถแปลงเอสเทอร์ได้ 99 wt.% ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ของการศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสเถิตแบบหมุนวน ขนาดนําร่องที่มีถังบรรจุนํ้ามันเริ่มต้น 100 ลิตร ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณการใช้สารเคมีและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา พบว่าเวลาทำปฏิกิริยา 50 นาที เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งให้ Response เป็น 99.945 % โดยนํ้าหนัก เนื่องจากค่าความเชื่อมั่นจากการทำนายของสมการที่ให้ค่าใกล้เคียง 1 ที่สุด ซึ่งให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.971, $R^2_{adjusted}$ เท่ากับ 0.943 และให้ค่า R^2 for Prediction เท่ากับ 0.667 ได้เงื่อนไขการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการผลิตเอทิลเอสเทอร์ คือเอทานอล 20 %โดยปริมาตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ +16 g/Liter of oil และเมื่อทำการทดลองตามเงื่อนไข เอทานอลเท่ากับ 20 %โดยปริมาตร โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ +16 g/Liter of oil และเก็บตัวอย่างนํ้ามันที่เวลาทำปฏิกิริยาที่ 50 นาที ให้ค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ 99.577 %โดยนํ้าหนัก ซึ่งใกล้เคียงกับค่าการวิเคราะห์ด้วย Multiple Regression และแสดงผลผลิตของการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสเถิต เมื่อกำหนดนํ้ามันปาล์มดิบเท่ากับ 100% ดังในตารางที่ 4.15

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่า R^2 for Prediction ที่ได้เท่ากับ 0.667 ของเงื่อนไขดังกล่าว ถือว่ามีระดับความแม่นยำของสมการที่ต่ำ เมื่อเทียบกับสมการความสัมพันธ์ที่เวลาการทำปฏิกิริยาอื่น ๆ ดังจะเห็นได้ว่าเงื่อนไข ที่ช่วงระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 15, 60 และ 70 นาที ให้ค่า R^2 for Prediction เท่ากับ 0.833, 0.893 และ 0.981 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าสมการมีความแม่นยำสูง แต่ผลของการทดลองซ้ำจากสมการความสัมพันธ์ที่ได้ พบว่าสมการความสัมพันธ์ที่ 4.8 ให้ผลใกล้เคียงกับค่า Response จากการทำนายที่สุด จึงสรุปเลือกเงื่อนไขดังกล่าวเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากนํ้ามันปาล์มดิบด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสเถิตแบบหมุนวน ขนาดนําร่อง

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดลองของการผลิตเอทิลเอสเตอร์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ต่อผสมสติดแบบหมุนขนาดนาร่องบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร

| Test no. | Ethanol (vol.%) | KOH (g/L of oil) | Ester | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|-----------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 5min | 10min | 15min | 20min | 25min | 30min | 40min | 50min | 60min | 70min | 80min | 90min | 100min | 110min | 120min |
| 1 | 9 | 12 | 91.127 | 90.730 | 94.513 | 85.440 | 88.753 | 92.887 | 95.092 | 94.887 | 92.880 | 89.886 | 96.496 | 96.339 | 94.885 | 96.578 | 96.159 |
| 2 | 28 | 6 | 97.912 | 98.303 | 96.908 | 98.751 | 96.386 | 98.877 | 97.590 | 97.276 | 98.138 | 98.997 | 99.192 | 98.786 | 97.359 | 98.714 | 98.445 |
| 3 | 20 | 12 | 99.303 | 99.537 | 99.339 | 99.162 | 99.059 | 98.916 | 99.003 | 99.236 | 99.112 | 98.682 | 99.352 | 98.879 | 99.145 | 99.180 | 98.812 |
| 4 | 20 | 12 | 99.532 | 99.340 | 99.126 | 99.022 | 99.352 | 99.373 | 99.007 | 99.412 | 99.362 | 99.318 | 99.193 | 99.126 | 99.391 | 99.303 | 99.148 |
| 5 | 20 | 20 | 98.898 | 98.898 | 98.838 | 98.945 | 98.959 | 99.171 | 98.768 | 98.775 | 98.774 | 99.080 | 99.169 | 98.701 | 98.852 | 98.763 | 98.845 |
| 6 | 31 | 12 | 98.960 | 98.982 | 99.538 | 99.638 | 99.241 | 99.134 | 98.539 | 98.804 | 99.110 | 98.483 | 97.922 | 98.931 | 98.470 | 98.515 | 97.977 |
| 7 | 28 | 18 | 97.907 | 97.840 | 98.687 | 98.533 | 99.245 | 98.988 | 99.547 | 96.977 | 99.086 | 98.026 | 99.068 | 99.344 | 99.600 | 99.398 | 99.266 |
| 8 | 20 | 12 | 99.568 | 99.452 | 99.623 | 99.009 | 98.994 | 99.051 | 98.934 | 99.269 | 99.270 | 99.068 | 98.911 | 98.991 | 99.136 | 99.247 | 99.250 |
| 9 | 12 | 6 | 98.529 | 98.308 | 95.888 | 96.545 | 95.396 | 95.491 | 97.150 | 92.882 | 91.002 | 89.075 | 95.760 | 92.425 | 91.775 | 91.129 | 90.518 |
| 10 | 20 | 12 | 99.167 | 98.830 | 99.173 | 99.266 | 98.923 | 99.030 | 99.541 | 99.428 | 99.266 | 99.381 | 99.095 | 99.213 | 99.233 | 99.470 | 99.272 |
| 11 | 12 | 18 | 97.509 | 98.978 | 98.561 | 98.590 | 98.331 | 98.418 | 98.313 | 98.966 | 98.525 | 97.246 | 98.252 | 97.971 | 97.989 | 97.183 | 97.384 |
| 12 | 20 | 4 | 96.232 | 97.501 | 98.041 | 96.818 | 95.527 | 96.330 | 96.807 | 97.400 | 94.437 | 94.708 | 95.251 | 97.090 | 98.708 | 98.088 | 95.011 |

(ทุกการทดลองกำหนดปริมาณน้ำมันเริ่มต้นที่ 25 ลิตร และอุณหภูมิตลอดการทำปฏิกิริยา 75 °C)

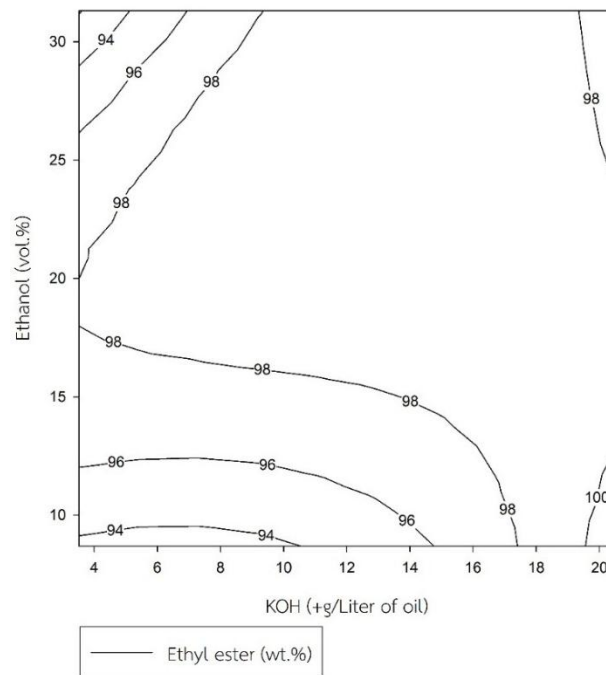
$$\text{Ester}_{15\text{min}} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 K + \beta_3 E^2 + \beta_4 K^2 + \beta_5 E^2 K + \beta_6 EK^2 \quad (4.8)$$

$$\text{Ester}_{50\text{min}} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 E^2 + \beta_3 K^2 + \beta_4 EK^2 + \beta_5 K^3 \quad (4.9)$$

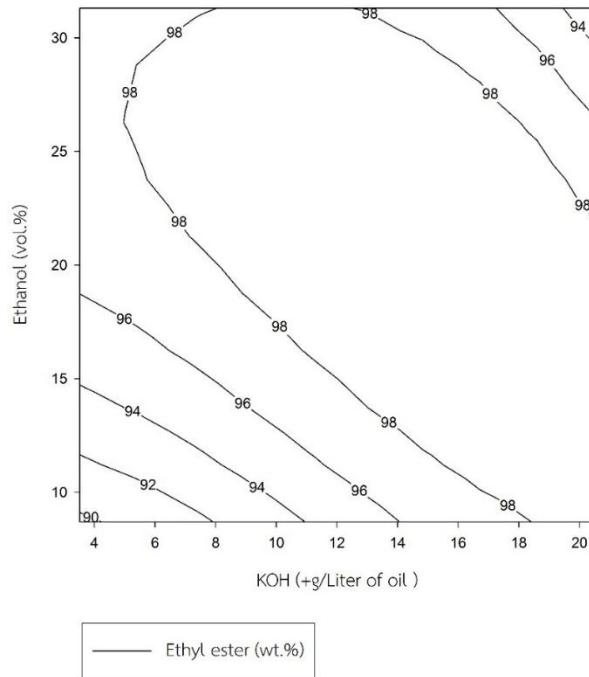
$$\text{Ester}_{60\text{min}} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 K + \beta_3 E^2 + \beta_4 EK + \beta_5 E^2 K + \beta_6 EK^2 \quad (4.10)$$

$$\text{Ester}_{70\text{min}} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 K + \beta_3 E^2 + \beta_4 EK + \beta_5 E^2 K \quad (4.11)$$

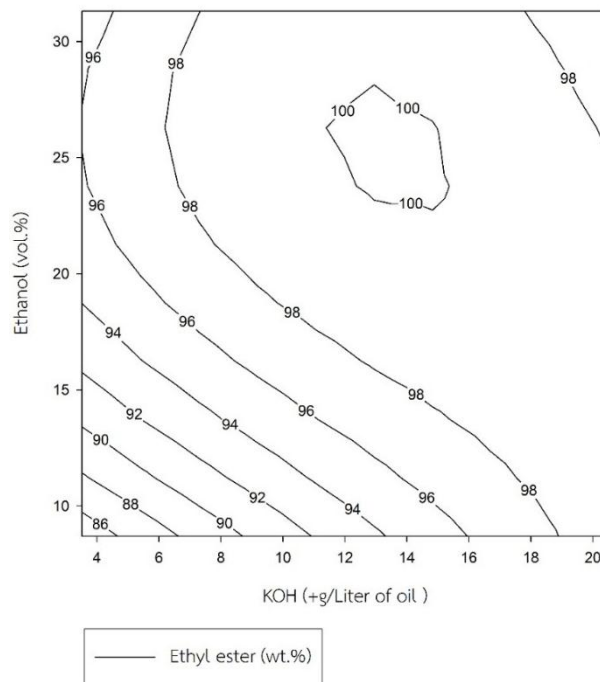
$$\text{Ester}_{120\text{min}} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 K + \beta_3 E^2 + \beta_4 EK + \beta_5 K^2 + \beta_6 EK^2 \quad (4.12)$$



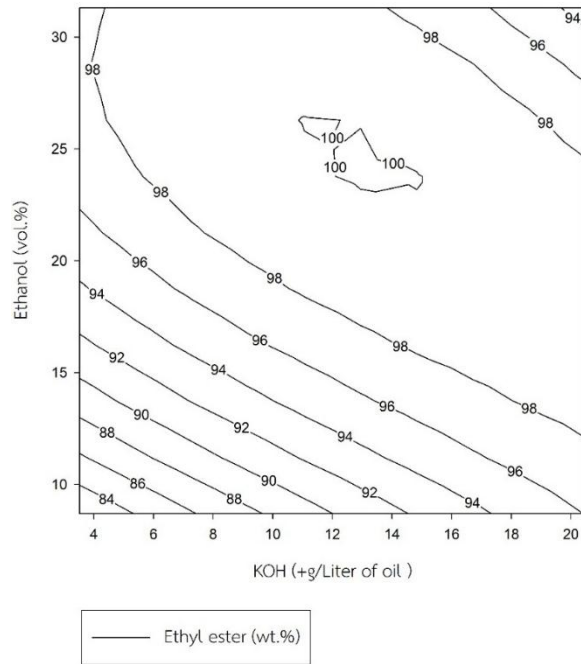
รูปที่ 4.19 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที



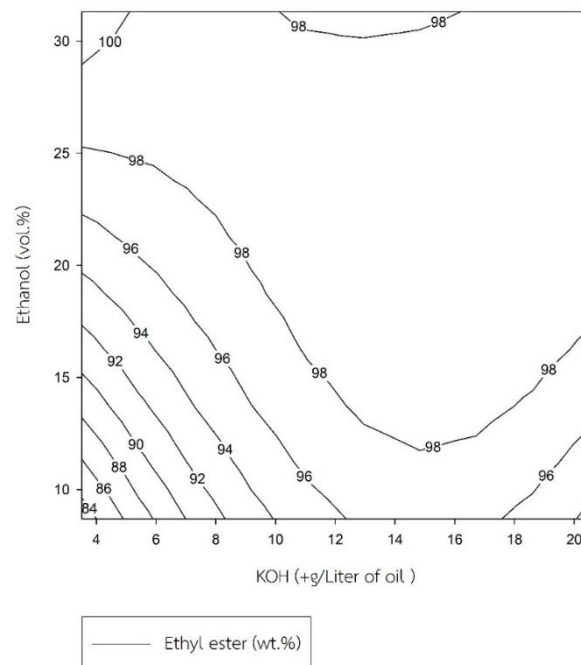
รูปที่ 4.20 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที



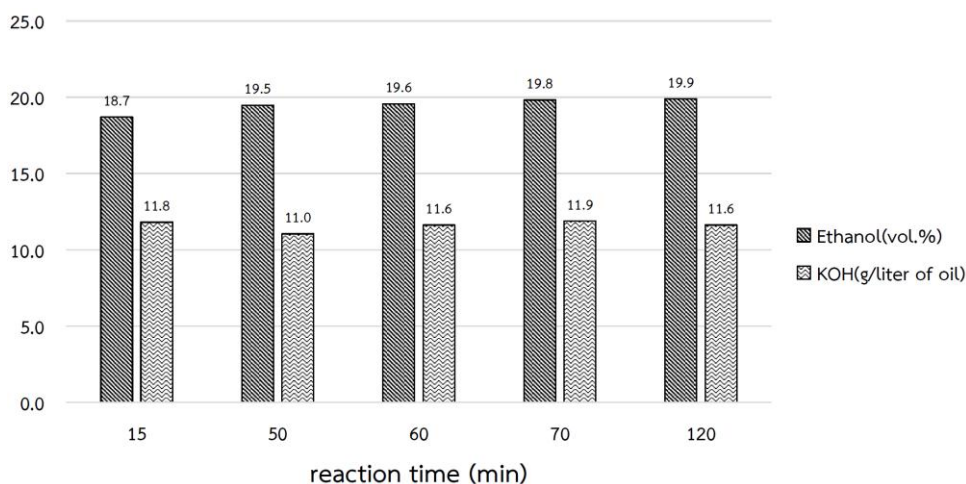
รูปที่ 4.21 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที



รูปที่ 4.22 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 70 นาที



รูปที่ 4.23 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที



รูปที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่สามารถแปลงเอสเทอร์ได้ 99 wt.% ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ของการศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุดปฏิกิริยาต่อผสมสเถิตแบบหมุนวน ขนาดนาร่องที่มีถังบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร

ตารางที่ 4.15 แสดงผลผลิตของการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุดปฏิกิริยาต่อผสมแบบสเถิต

| กระบวนการ | Yield (vol.%) |
|--|---------------|
| ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน สำหรับการลดกรดไขมันอิสระ | |
| Esterified oi | 117 |
| (ไม่ได้ล้าง, 117 vol.% เทียบน้ำมันปาล์มดิบ 100 vol.%) | |
| ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน สำหรับการผลิตเอทิลเอสเทอร์ | |
| Crude biodiesel | 136.33 |
| (ไม่ได้ล้าง, 116.5 vol.% เทียบ esterified oi 100 vol.%) | |
| กระบวนการล้างเอทิลเอสเทอร์ | |
| Biodiesel | 76.05 |
| (ล้างแล้ว, 55.79 vol.% เทียบ crude biodiesel 100 vol.%) | |

หมายเหตุ: ผลผลิตเทียบกับ 100 vol.% ของน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

การศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงแบบสองขั้นตอนด้วยท่อผสมสติดแบบหมุนวนสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดที่บวมด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

พบว่าค่าความเป็นกรดสามารถลดลงได้ต่ำกว่า 2 mg KOH/g เมื่อทำปฏิกิริยากับเอทานอลทั้ง 3 เกรดภายใต้เงื่อนไข 81.3 % โดยปริมาตรของเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% กรดซัลฟิวริก 10 % โดยปริมาตร ที่เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที 77.2 % โดยปริมาตรของเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% กรดซัลฟิวริก 9.8 % โดยปริมาตร ที่เวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที และ 78.4 % โดยปริมาตรของเอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% กรดซัลฟิวริก 11 % โดยปริมาตร ที่เวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิตลอดการทำปฏิกิริยาคงที่ 75 °C และความเร็วรอบคงที่ 900 รอบต่อนาที ด้วยชุดทดลองแบบใบกวน พบว่าเอทานอลทั้ง 3 เกรดมีศักยภาพในการลดกรดไขมันอิสระ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการลดกรดไขมันอิสระของเอทานอลแต่ละเกรด ค่าความบริสุทธิ์ของเอทานอลมีผลต่อปริมาณการใช้เอทานอล คือเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าจะใช้ปริมาณที่น้อยกว่าในปฏิกิริยาการลดกรดไขมันอิสระ รวมถึงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่าด้วย โดยสาเหตุหนึ่งมาจากสัดส่วนของน้ำที่มีอยู่ในเอทานอลแต่ละเกรด ยิ่งมีน้ำอยู่มากความเจือจางก็มากส่งผลให้มีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า ซึ่งจากการทดลองเปรียบเทียบเกรดเอทานอลนี้ จึงเลือกเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% ซึ่งเหมาะกับการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่บวมชนิดกรดไขมันอิสระสูง

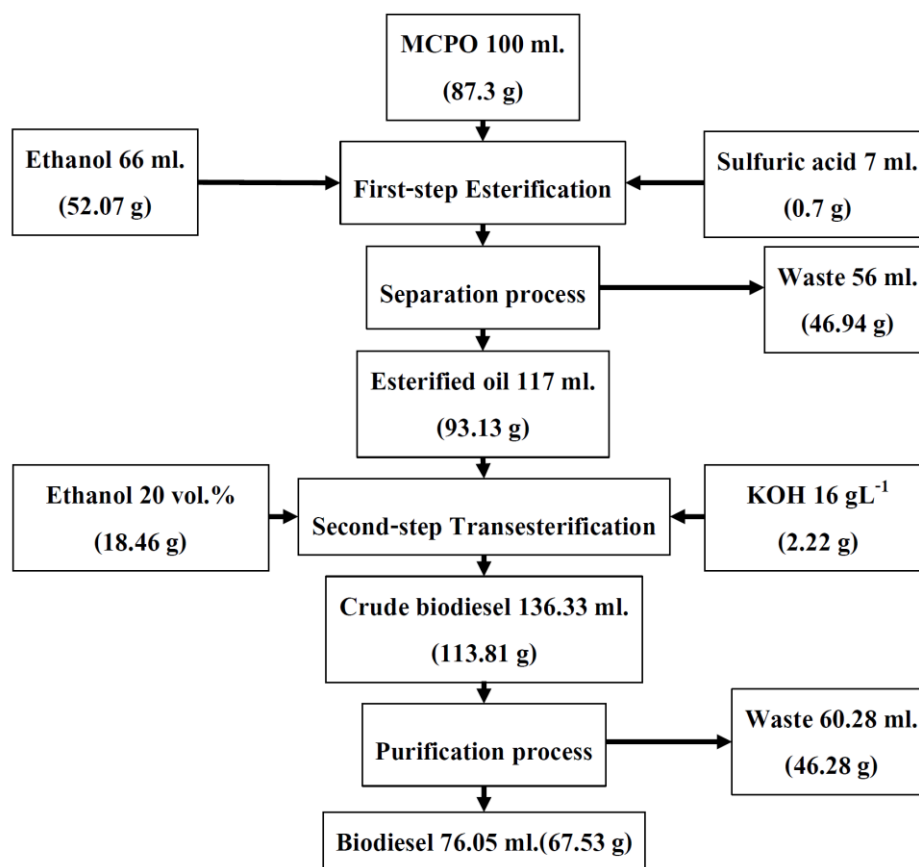
การศึกษาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน เงื่อนไขการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการลดกรดไขมันอิสระคือเอทานอล 66 % โดยปริมาตร และกรดซัลฟิวริก 7 % โดยปริมาตร ทำให้ค่าความเป็นกรดลดลงจาก 34.5 mg KOH/g เป็น 1.35 mg KOH/g ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาที ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการทำปฏิกิริยาด้วยชุดทดลองแบบใบกวนของเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% พบว่าการใช้ชุดปฏิกรณ์แบบท่อผสมสติดหมุนวนใช้ปริมาณของเอทานอล และกรดซัลฟิวริกน้อยกว่า ในเงื่อนไขระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 20 นาทีเท่ากัน โดยปัจจัยหนึ่งเป็นเพราะความรุนแรงของการผสมที่ท่อผสมแบบสติดมีความรุนแรงในการกวนผสมมากกว่าการผสมด้วยใบกวน นำเงื่อนไขดังกล่าวทำปฏิกิริยากับชุดปฏิกรณ์ขนาดนาร่อง ด้วยน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร พบว่า น้ำมันที่ได้หลังการทำปฏิกิริยาให้ความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์สูงสุดถึง 93.46 % โดยน้ำหนัก ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง ซึ่งค่ามาตรฐานลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.

2556 กำหนดค่าความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ร้อยละ 96.5 โดยน้ำหนัก ดังนั้นความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ที่ได้ก็ยังไม่ผ่าน โดยสาเหตุหนึ่งมาจากน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน น้ำระหว่างกระบวนการที่สูงขึ้นจะทำให้กรดซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเจือจางลง และความเข้มข้นของเอทานอลที่เป็นตัวทำละลายในปฏิกิริยาก็เจือจางลงด้วย น้ำจึงเป็นอุปสรรคสำคัญในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในขั้นตอนเดียว (single-step esterification) เพราะน้ำทำให้เกิดการขัดขวางการทำปฏิกิริยา ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของเอสเทอร์นั้นมีอัตราการการเพิ่มขึ้นที่ช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง และจนถึงเวลาที่ 12 ชั่วโมง ก็ยังไม่สามารถทำให้กลีเซอไรด์ที่เหลือแปลงเป็นเอสเทอร์ความบริสุทธิ์ 96.5 %โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐานกำหนดได้ การใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นขั้นตอนที่สองในการแปลงกลีเซอไรด์ที่เหลือเป็นเอสเทอร์ จึงเป็นตัวเลือกที่จะดำเนินการศึกษาต่อจากกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน

5.1.2 การศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบหมุนวนโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

พบว่าสามารถผลิตเอทิลเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์ 99.577 %โดยน้ำหนัก โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันด้วยเทคนิค thin layer chromatography/flame ionization detection (TLC/FID) เมื่อทำปฏิกิริยากับเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% ปริมาณ 20% โดยปริมาตร โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์ +16 g/Liter of oil ที่เวลาทำปฏิกิริยา 50 นาที โดยที่ควบคุมอุณหภูมิตลอดการทำปฏิกิริยาที่ 75 °C และผสมด้วยปั๊มหมุนวนอัตราการไหล 500 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของน้ำมันที่ผ่านกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยผสมสติดแบบหมุนวน น้ำมันที่ได้หลังจากทำปฏิกิริยาไม่มีการแยกชั้นระหว่างเอทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล โดยคาดว่ามิสาเหตุเนื่องจากความรุนแรงของการกวนผสมทำให้กลีเซอรอลรวมอยู่ในชั้นของเอทิลเอสเทอร์ เป็นปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันกับสบู่ซึ่งเป็นสารอิมัลซิฟายเออร์ ส่งผลให้การแยกกลีเซอรอลด้วยแรงโน้มถ่วงโลกทำได้ยาก แต่ถึงแม้จะไม่มีมีการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรอลและเอทิลเอสเทอร์ในการทำปฏิกิริยาด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน ขนาดนาร่องบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร เอทิลเอสเทอร์ที่ได้ก็มีผลผลิตสูงถึง 76.05% ของน้ำมันปาล์มดิบ

สรุปได้ว่าเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% สามารถผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน ขนาดนาร่องบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร ที่มีความบริสุทธิ์ผ่านมาตรฐาน 95.6 %โดยน้ำหนัก ถึงจะไม่มีเกิดการแยกชั้นของกลีเซอรอลและเอทิลเอสเทอร์สามารถแสดงแผนผังสมดุลมวลเงื่อนไขที่ดีที่สุดของทั้งสองขั้นตอนดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงแผนผังสมดุลมวลเชื้อเพลิงที่ดีที่สุดของทั้งสองขั้นตอนในการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน

5.1.3 คุณภาพไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงแบบสองขั้นตอนด้วยท่อผสมสถิตแบบหมุนวน

น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการศึกษานี้ เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบต่าง ๆ ของน้ำมันด้วยเทคนิค TLC/FID พบว่าให้ค่าความบริสุทธิ์เอสเตอร์สูงถึง 99.577 % โดยน้ำหนัก และได้วิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบอื่น ๆ ของไบโอดีเซล ซึ่งมีคุณภาพสูงกว่าคุณสมบัติสำคัญของมาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน และใกล้เคียงหรือเทียบเท่าคุณสมบัติสำคัญของมาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 โดยกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสถิตแบบหมุนวนในการศึกษานี้สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ครั้งละ 65 ลิตร

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติและองค์ประกอบของไบโอดีเซล

| ข้อกำหนดคุณสมบัติและองค์ประกอบ | มาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน | | มาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ | | ผลการศึกษา | |
|--|-----------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|
| | อัตราสูง ต่ำ | มาตรฐาน | อัตราสูง ต่ำ | มาตรฐาน | หมายเหตุ | |
| ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15°C (kg/m ³) | 860-900 | ASTM D 1298 | 860-900 | ASTM D 1298 | 888.66 | - |
| ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C (cSt) | 1.9-8.0 | ASTM D 445 | 3.5-5.0 | ASTM D 445 | 4.89 | - |
| จุดวาบไฟ (°C) | ≥120 | ASTM D 93 | ≥120 | ASTM D 93 | 166 | - |
| กำมะถัน (%wt.) | ≤0.0015 | ASTM D 2622 | ≤0.0010 | ASTM D 2622 | 0.0014 | - |
| จำนวนซีเทน | ≥47 | ASTM D 613 | - | - | - | - |
| เถ้าซัลเฟต (%wt.) | ≤0.02 | ASTM D 874 | ≤0.02 | ASTM D 874 | ≤0.005 | - |
| น้ำและตะกอน (%vol.) | ≤0.2 | ASTM D 2709 | ≤0.050 | EN ISO 12937 | ≤0.050 | - |
| การกัดกร่อนแผ่นทองแดง | ≤No.3 | ASTM D 130 | ≤ No.1 | ASTM D 130 | No.1a | - |
| ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g) | ≤0.80 | ASTM D 664 | ≤0.50 | ASTM D 664 | 0.3680 | - |
| กลีเซอรินอิสระ (%wt.) | ≤0.02 | ASTM D 6584 | ≤0.02 | EN 14105 | 0.0032 | - |
| กลีเซอรินทั้งหมด (%wt.) | ≤1.5 | ASTM D 6584 | ≤0.25 | EN 14105 | 0.16 | - |
| สี | ม่วง ^{2/} | ตรวจพินิจด้วย สายตา | - | - | น้ำตาล ส้ม | - |
| เอสเทอร์ (%wt.) | - | - | ≥96.5 | EN 14103 | 97.21 99.577 | GC 6890 TLC/FID |
| กากถ่าน (%wt.) | - | - | ≤0.30 | ASTM D 4530 | - | - |
| สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (%wt.) | - | - | ≤0.0024 | EN 12662 | - | - |
| Oxidation Stability at 110 °C (hr) | - | - | ≥10 | EN 14112 | - | - |
| ค่าไอโอดีน (g Iodine / 100 g) | - | - | ≤120 | EN 14111 | 47.0 | - |
| กรดลิโนเลนิก | - | - | ≤12.0 | EN 14103 | ไม่พบ | - |
| แอลกอฮอล์ (%wt.) | - | - | ≤0.20 | EN 14110 | ≤0.01 | - |
| โมนอกลิเซอไรด์ (%wt.) | - | - | ≤0.80 | EN 14105 | 0.46 | - |
| ไดกลีเซอไรด์ (%wt.) | - | - | ≤0.20 | EN 14105 | 0.22 | - |
| ไตรกลีเซอไรด์ (%wt.) | - | - | ≤0.20 | EN 14105 | 0.09 | - |
| Group I metals (Na+K) (mg/kg) | - | - | ≤5.0 | EN 14108, EN 14109 | - | - |
| Phosphorus (%wt.) | - | - | ≤0.0010 | ASTM D 4951 | - | - |

หมายเหตุ: มาตรฐานการวิเคราะห์บางรายการอาจใช้มาตรฐานต่างชนิดกันกับมาตรฐานที่กำหนด

จากตารางคุณสมบัติและองค์ประกอบของไบโอดีเซลที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับคุณสมบัติสำคัญของมาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน และมาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ พบว่าไบโอดีเซลที่ได้จากผลการศึกษามีคุณสมบัติและองค์ประกอบสำคัญผ่านและสูงกว่ามาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน และเมื่อเทียบกับมาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ พบว่ามีคุณสมบัติและองค์ประกอบสำคัญผ่านมาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์

5.1.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงแบบสองขั้นตอนด้วยท่อผสมสเถิตแบบหมุนวน

ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลแบ่งพิจารณาเป็นสองส่วน คือ จากค่าวัตถุดิบในการผลิต และค่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการ คำนวณได้ค่าไบโอดีเซลต่อลิตรเท่ากับ 74.71 บาท(ภาคผนวก ข) เป็นค่าไฟฟ้า 0.27% และค่าวัตถุดิบสารเคมี 99.73% โดยแบ่งเป็นค่าน้ำมันปาล์มดิบ 54.08% ค่าเอทานอล 35.32% ค่ากรดซัลฟิวริก 7.22% และค่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อีก 3.38% ซึ่งต้นทุนการผลิตส่วนใหญ่ตกอยู่ที่ค่าวัตถุดิบสารเคมี ซึ่งน้ำมันปาล์มดิบมีต้นทุนสูงสุดในกระบวนการ

อย่างไรก็ตามต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลในการศึกษานี้ยังคงมีมูลค่าสูงกว่าไบโอดีเซลที่ผลิตโดยการใช้เมทานอล และน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงแบบสองขั้นตอนด้วยท่อผสมสเถิตแบบหมุนวน เป็นการศึกษาปริมาณของปริมาณวัตถุดิบสารเคมีในการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบหมุนวน ซึ่งชนิดน้ำมัน กรดไขมันอิสระเริ่มต้น ชนิดตัวเร่ง ชุดปฏิกรณ์ และกระบวนการผลิตเป็นปัจจัยสำคัญ ถ้าใช้น้ำมันต่างชนิดกัน ตัวเร่งต่างกัน หรือชุดปฏิกรณ์ต่างกันจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนเงื่อนไขปริมาณวัตถุดิบสารเคมีและกระบวนการตามความเหมาะสม ซึ่งในการศึกษานี้ได้สรุปเลือกเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสเถิตหมุนวนแบบสองขั้นตอน แต่อย่างไรก็ตามในการผลิตจริงเพื่ออุตสาหกรรม ไม่จำเป็นต้องเลือกเงื่อนไขที่ดีที่สุด แต่ควรเลือกเงื่อนไขที่สามารถทำได้ และต้นทุนมูลค่าการผลิตที่คำนวณได้เป็นต้นทุนการผลิตในระดับการทดลองเพื่อเปรียบเทียบนัยสำคัญของต้นทุนแต่ละส่วนเท่านั้น ไม่สามารถเทียบเป็นต้นทุนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมการผลิตขนาดใหญ่ได้

บรรณานุกรม

- กิตติศักดิ์ ทวีสินโสภณ. 2006. การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มหีบรวม โดยใช้กระบวนการผลิตแบบ Esterification และ Transesterification. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2013. สถานการณ์น้ำมันปาล์มดิบซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลของประเทศไทย.
- กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2014a. ปฏิบัติการทรานส์เอสเทอร์ิเฟอชัน สารานุกรมพลังงานทดแทน Alternative Energy Encyclopedia.
- กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2014b. ปฏิบัติการเอสเทอร์ิเฟอชัน สารานุกรมพลังงานทดแทน Alternative Energy Encyclopedia.
- กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2014c. เอทานอล สารานุกรมพลังงานทดแทน Alternative Energy Encyclopedia.
- กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2014d. เอทิลเอสเทอร์ สารานุกรมพลังงานทดแทน Alternative Energy Encyclopedia.
- จรัล ทรัพย์เสรี. for Quality November 2009. DOE ตอน Central Composite Design. หน้า 072-074.
- ธนาคารแห่งประเทศไทย. 2015. รายงานสถานการณ์ราคาเอทานอลของประเทศไทย ไตรมาส 1/2558 (ออนไลน์). สืบค้นจาก : https://www.bot.or.th/Thai/MonetaryPolicy/NorthEastern/Doclib_CommodityQuater/Q1_58_Ethanol.pdf [26 ตุลาคม 2558]
- ธนาคารแห่งประเทศไทย. 2015. รายงานสถานการณ์ราคาเอทานอลของประเทศไทย ไตรมาส 2/2558 (ออนไลน์). สืบค้นจาก : https://www.bot.or.th/Thai/MonetaryPolicy/NorthEastern/Doclib_CommodityQuater/Q2_58_Ethanol.pdf [26 ตุลาคม 2558]
- ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. จลนศาสตร์วิศวกรรมเคมีและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์.
- ภูธร เรืองยิ่ง. 2002. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวแบบต่อเนื่องโดยการเร่งปฏิกิริยาด้วยรังสีไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2015a. กรดซัลฟิวริก (ออนไลน์) สืบค้นจาก : <https://th.wikipedia.org/wiki/กรดซัลฟิวริก> [26 ตุลาคม 2558]
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2015b. น้ำ (ออนไลน์) สืบค้นจาก : <https://th.wikipedia.org/wiki/น้ำ>

[26 ตุลาคม 2558]

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2015c. น้ำมันปาล์ม (ออนไลน์) สืบค้นจาก :

<https://th.wikipedia.org/wiki/น้ำมันปาล์ม> [26 ตุลาคม 2558]

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2015d. โพลีเอสเตอร์ไฮดรอกไซด์ (ออนไลน์) สืบค้นจาก :

<https://th.wikipedia.org/wiki/โพลีเอสเตอร์ไฮดรอกไซด์> [26 ตุลาคม 2558]

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2015e. เอทานอล (ออนไลน์) สืบค้นจาก :

<https://th.wikipedia.org/wiki/เอทานอล>[26 ตุลาคม 2558]

ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. 2015. สืบค้นจาก :

<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1300/palm-oil> [26 ตุลาคม 2558]

ศูนย์วิจัยเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร. 2012. อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันของไทย Thailand Food Industry Profiles อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและผลิตภัณฑ์เกี่ยวเนื่อง.

สิริวุทธิ์ เสียมภักดี นายกสมาคมการค้าผู้ผลิตเอทานอลไทย. 2009. หนังสือสมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย

สุภาชิต ชุกลิน. 2004. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดยางพารา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

องค์การสุรา กรมสรรพสามิต สังกัดกระทรวงการคลัง. 2015. เอทานอล.

Crabbe, E., Nalasco-Hipolito, C., Kobayashi, G., Sonomoto, K. and Ishizaki, A. 2001. Biodiesel production from crude palm oil and evaluation of butanol extraction and fuel properties. *Process Biochemistry*. 37. 1. pp. 65-71.

Cvengros, J. and Povazanec, F. 1995. Production and Treatment of Rapeseed Oil Methyl Esters as Alternative fuels for diesel Engines. *Biosource Technology*. 55. pp. 145-152.

Ghadge, S.V. and Raheman, H. 2006. Process optimization for biodiesel production from mahua (*Madhuca indica*) oil using response surface methodology. *Bioresource Technology*. 97. pp. 379-384.

Jansri, S., Prateepchaikul, G. and Ratanawilai, S.B. 2007. Acid-catalyzed esterification: a technique for reducing high free fatty acid in mixed crude palm oil. *Kasetsart Journal (Natural Science)*. 413. pp. 555-560.

Jansri, S., Ratanawilai, S., Allen, M. and Prateepchaikul, G. 2011. Kinetics of Methyl Ester Production from Crude Palm Oil by Using Acid-Alkali Catalyst. *Fuel Processing Technology*. 92. pp. 1543-1548.

- Krit Somnuk, Pruittikorn Smithmaitrie and Gumpon Prateepchaikul. 2013. Optimization of continuous acid-catalyzed esterification for free fatty acids reduction in mixed crude palm oil using static mixer coupled with high-intensity ultrasonic irradiation. *Energy Conversion and Management*. 68. pp. 193–199.
- Krit Somnuk, Pruittikorn Smithmaitrie and Gumpon Prateepchaikul. 2013. Two-stage continuous process of methyl ester from high free fatty acid mixed crude palm oil using static mixer coupled with high-intensity of ultrasound. *Energy Conversion and Management*. 75. pp. 302–310.
- Krit Somnuk, Suhdee Niseng and Gumpon Prateepchaikul. Optimization of high free fatty acid reduction in mixed crude palm oils using circulation process through static mixer reactor and pilot-scale of two-step process. *Energy Conversion and Management*. 80. pp. 374–381.
- McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P. 1993. *Unit operation of chemical engineering*. Vol 5. Singapore: McGraw-Hill.
- Montgomery, D.C. 1991. *Design and Analysis of Experiments*. Third Edition. John Wiley & Sons.
- National Biodiesel Board, USA. 2015. BIODIESEL SUSTAINABILITY FACT SHEET. *Bioenergy*. chapter 36. pp. 561-563.
- Noipin, K. and Kumar, S. 2015. Optimization of ethyl ester production assisted by ultrasonic irradiation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 22. 548–558.
- Olivera S. Stamenković, Ana V. Velic'ković and Vlada B. Veljković. 2011. The production of biodiesel from vegetable oils by ethanolysis: Current state and perspectives. *Fuel*. 90. pp. 3141–3155.
- Paweetida Sungwornpatansakul, Junko Hiroi, Yuuki Nigahara, Thumesha Kaushalya Jayasinghe and Kunio Yoshikawa. 2013. Enhancement of biodiesel production reaction employing the static mixing. *Fuel Processing Technology*. 116. pp. 1–8.
- Prateepchaikul, G., Allen, M.L., Leevijit, T. and Thaveesinsopha, K. 2007. Methyl ester production from high free fatty acid mixed crude palm oil. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 29. 6. pp. 1551-1561.
- Prateepchaikul, G., Somnuk, K and Allen, M. 2009. Design and testing of continuous acid-catalyzed esterification reactor for high free fatty acid mixed crude palm oil. *Fuel Processing Technology*. 90.6. pp. 784-789.

- Qiang Li, Jingyang Xu, Wei Du n , Yang Li and Dehua Liu. 2013. Ethanol as the acyl acceptor for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 25. pp. 742–748.
- Ramadhas, A.S., Jayaraj, S. and Muraleedharan, C. 2004. Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. *Fuel*. 84. 4. pp. 335-340.
- Ramadhas AS, Wuraleedharan C and JayaraJ S. 2005. Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil. *Renew Energy*. 30. pp. 1789-800.
- Rizal Alamsyah, Armansyah H. Tambunan, Y. Aris Purwanto and Dadan Kusdiana. 2010. Comparison of static-mixer and blade agitator reactor in biodiesel production. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 12. pp. 1.
- Ruamporn Nikhom and Chakrit Tongurai. 2014. Production development of ethyl ester biodiesel from palm oil using a continuous deglycerolisation process. *Fuel*. 117. pp. 926–931.
- Saka, S. and Kusdiana, D. 2001. Biodiesel Fuel from Rapeseed Oil as Prepared in Supercritical Methanol. *Fuel*. 80. pp. 225-231.
- Sanli, H., Canakci, M., Alptekin, E., Turkcan, A. and Ozsezen, A.N. 2015. Effects of waste frying oil based methyl and ethyl ester biodiesel fuels on the performance, combustion and emission characteristics of a DI diesel engine. *Fuel*. 159. pp. 179–187.
- Srivastava, A. and Prasad, R. 2000. Triglyceride-based diesel fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 4. pp. 111-133.
- Suppalakpanya, K., Ratanawilai, S.B. and Tongurai, C. 2010. Production of ethyl ester from esterified crude palm oil by microwave with dry washing by bleaching earth. *Applied Energy*. 87. pp. 2356–2359.
- Supriyono Suwito, Giuliano Dragone , Hary Sulisty, Bardi Murachman, Suryo Purwono and José Teixeira. 2012. Optimization of pretreatment of Jatropha oil with high free fatty acids for biodiesel production. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 6. 2. pp. 210-215.
- Thompson, J.C. and He, B.B. 2007. BIODIESEL PRODUCTION USING STATIC MIXERS. *Transactions of the ASABE*. 50. 1. pp. 161–165.

- Tiwari, A.K, Kumar, Akhilesh. and Raheman, H. 2007. Biodiesel production from jatropha oil (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: An optimized process. *Biomass and Bioenergy*. 31. pp. 569-575.
- Union Intraco PLC. 2014. certificate of analysis ethanol.
- Wright, H.J., Segur, J.B., Clark, H.V., Coburn, S.K., Langdon, E.E. and DuPuis, R.N. 1944. A report on reter interchange. *Oil and Soap*. 21. pp. 145-148.
- Zheyang Qiu, Lina Zhao and Laurence Weatherley. 2010. Process intensification technologies in continuous biodiesel production. *Chemical Engineering and Processing*. 49. pp. 323–330.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
(องค์ประกอบและคุณสมบัติของน้ำมันปาล์มดิบและสารเคมี)

ตาราง ก.1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ในงานวิจัย

| คุณสมบัติและองค์ประกอบ | | หน่วย |
|-----------------------------|---------|-------------------|
| ความหนาแน่น | 0.873 | g/cm ³ |
| ความหนืด (ที่อุณหภูมิ 75°C) | 11.98 | cP |
| kinematic viscosity | 13.72 | cSt |
| dynamic viscosity | 0.01198 | Pa.s |
| กรดไขมันอิสระ | 15.233 | %wt |
| ไตรกลีเซอไรด์ | 82.166 | %wt |
| ไดกลีเซอไรด์ | 2.348 | %wt |
| โมนอกลิเซอไรด์ | 0.244 | %wt |
| เอสเทอร์ | 0.059 | %wt |
| ค่าความเป็นกรด | 34.500 | mg KOH/g |

กรดไขมันหลักในน้ำมันปาล์มดิบ (Crabbe, et al., 2001)

กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated)

| | |
|----------------------------------|--------------------|
| กรดไขมันประเภท Oleic (18:1) | = 42.6% โดยน้ำหนัก |
| กรดไขมันประเภท Linoleic (18:2) | = 9.50% โดยน้ำหนัก |
| กรดไขมันประเภท a-Linoleic (18:3) | = 0.20% โดยน้ำหนัก |

กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated)

| | |
|---------------------------------|--------------------|
| กรดไขมันประเภท Lauric (12:0) | = 0.00% โดยน้ำหนัก |
| กรดไขมันประเภท Myristic (14:0) | = 0.30% โดยน้ำหนัก |
| กรดไขมันประเภท Palmitic (16:0) | = 46.7% โดยน้ำหนัก |
| กรดไขมันประเภท Stearic (18:0) | = 3.10% โดยน้ำหนัก |
| กรดไขมันประเภท Arachidic (20:0) | = 0.40% โดยน้ำหนัก |

ตาราง ก.2 คุณสมบัติของกรดไขมันหลักในน้ำมันปาล์มดิบ (Wikipedia, the free encyclopedia, 2015)

| Name | Molecular formula | Molar mass (g/mole) | Density (g/ml) | Melting point (°C) | Boiling point (°C) |
|-------------------------------------|--|---------------------|----------------|--------------------|--------------------|
| Unsaturated | | | | | |
| Oleic acid | C ₁₈ H ₃₄ O ₂ | 282.46 | 0.895 | 13 | 360 |
| Linoleic acid | C ₁₈ H ₃₂ O ₂ | 280.45 | 0.900 | -5 | 230 |
| a-Linoleic acid | C ₁₈ H ₃₀ O ₂ | 278.43 | - | -11 | 230 |
| (Pollution Control Department,2015) | | | | | |
| Saturated | | | | | |
| Lauric acid | C ₁₂ H ₂₄ O ₂ | 200.32 | 0.868 | 43.8 | 297.9 |
| Myristic acid | C ₁₄ H ₂₈ O ₂ | 228.37 | 0.862 | 54.4 | 250 |
| Palmitic acid | C ₁₆ H ₃₂ O ₂ | 256.42 | 0.853 | 62.9 | 351-352 |
| Stearic acid | C ₁₈ H ₃₆ O ₂ | 284.48 | 0.847 | 69.3 | 361 |
| Arachidic acid | C ₂₀ H ₄₀ O ₂ | 312.53 | 0.824 | 75.5 | 328 |

ตาราง ก.3 คุณสมบัติที่แตกต่างกันของเอทานอล 3 เกรด (Union Intraco PLC.)

| Property | 95% com. grade of EtOH | 99.9% com. grade of EtOH | 99% anhyd. grade of EtOH |
|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Ethanol content (vol.%) | 95 Min. | 99.9 Min. | 99.9 Min. |
| Density @20 °C (kg.L ⁻¹) | 0.8 | 0.7892-0.7896 | 0.79 |
| Water Content (%mass) | N/A | 0.1 Max. | 0.2 Max. |
| Alkalinity | N/A | Nil | 0.0002 Max. |
| Colour (Pt-Co) | 15 Max. | 10 Max. | 10 Max. |
| Methanol (%) | 0.01 Max. | Nil | 0.05 |
| Residue on Evaporation (%mass) | N/A | 0.002 Max. | 0.001 Max. |

ตาราง ก.4 คุณสมบัติของสารเคมี (Wikipedia, the free encyclopedia, 2015)

| Name | Molecular formula | Molar mass (g/mole) | Density (g/ml) | Melting point (°C) | Boiling point (°C) |
|---------------------|---------------------------------|---------------------|----------------|--------------------|--------------------|
| Ethanol | C ₂ H ₆ O | 46.07 | 0.789 | -114 | 78.37 |
| Sulfuric acid | H ₂ SO ₄ | 98.08 | 1.840 | 10 | 337 |
| Potassium hydroxide | KOH | 56.11 | 2.12 | 406 | 1327 |
| Water | H ₂ O | 18.02 | 0.998 | 0 | 100 |

ภาคผนวก ข
(ตัวอย่างการคำนวณ)

การคำนวณความรุนแรงในการกวนผสม, N_{Re} (McCabe และคณะ, 1993)

$$N_{Re} = \frac{ND_a^2 \rho}{\mu}$$

| | | |
|--------|----------|---|
| โดยที่ | N_{Re} | คือ ความรุนแรงในการกวนผสม |
| | N | คือ ความเร็วรอบของใบกวน (รอบ/วินาที) |
| | D_a | คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของใบกวน (เมตร) |
| | ρ | คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3) |
| | μ | คือ ความหนืดของของเหลว (Pa.s) |

ตัวอย่างการคำนวณความรุนแรงในการกวนผสม, N_{Re}

| | | |
|-------|--------|-------------------------|
| เมื่อ | N | = 15 รอบ/วินาที |
| | D_a | = 0.07 เมตร |
| | ρ | = 0.873 kg/m^3 |
| | μ | = 0.01198 Pa.s |

ดังนั้น

$$N_{Re} = \frac{15 \times (0.07)^2 \times 873}{0.01198} = 5,356.052$$

การคำนวณต้นทุนการผลิต

กระบวนการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมกรดไขมันอิสระสูงด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

ตาราง ข.1 แสดงผลการคำนวณต้นทุนค่าไฟในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมกรดไขมันอิสระสูงด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

| รายการ | กำลังไฟฟ้า (kW) | เวลาที่ใช้ในการ ทำปฏิกิริยา(h) | ค่าไฟต่อหน่วย (บาท/หน่วย) | คิดเป็นค่าไฟ (บาท) |
|----------------------|--------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| ฮีทเตอร์ในถังปฏิกรณ์ | 2.50 | 0.33 | 3.94 | 3.25 |
| ปั๊มหมุนวนสารเคมี | 0.17 | 1.33 | 3.94 | 0.89 |

รวมค่าไฟฟ้าในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระเท่ากับ 4.14 บาทต่อน้ำมันปาล์มดิบเริ่มต้น 100 ลิตร

ซึ่งในกระบวนการลดกรดไขมันในน้ำมันปาล์มดิบสามารถให้ผลผลิต 117% โดยปริมาตร นั้นหมายความว่า ในการผลิตน้ำมันลดกรด 117 ลิตร มีอัตราค่าไฟฟ้า 4.14 บาท หรือประมาณ 0.04 บาทต่อ 1 ลิตร

กระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

ตาราง ข.2 แสดงผลการคำนวณต้นทุนค่าไฟในกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

| รายการ | กำลังไฟฟ้า (kW) | เวลาที่ใช้ในการ ทำปฏิกิริยา(h) | ค่าไฟต่อหน่วย (บาท/หน่วย) | คิดเป็นค่าไฟ (บาท) |
|----------------------|--------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| ฮีทเตอร์ในถังปฏิกรณ์ | 2.50 | 0.83 | 3.94 | 8.18 |
| ปั๊มหมุนวนสารเคมี | 0.17 | 1.83 | 3.94 | 1.23 |

รวมค่าไฟฟ้าในกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์เท่ากับ 9.41 บาทต่อน้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร

ซึ่งในกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์นี้ให้ผลผลิต 65% ของน้ำมันลดกรดเริ่มต้น นั้นหมายความว่า ในการผลิตเอทิลเอสเทอร์ 65 ลิตร มีอัตราค่าไฟฟ้า 9.41 บาท หรือ ประมาณ 0.14 บาทต่อ 1 ลิตร

แสดงว่า การผลิตเอทิลเอสเทอร์ 1 ลิตร ต้องใช้น้ำมันลดกรดประมาณ 1.54 ลิตร คิดเป็นค่าไฟฟ้า 0.06 บาท

ดังนั้นการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนชนิดกรดไขมันอิสระสูงด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสถิตแบบหมุนวนขนาดนาร่อง โดยปฏิกิริยาสองขั้นตอนมีอัตราค่าใช้จ่ายในส่วน ของค่าไฟฟ้าเท่ากับ $0.06 + 0.14 = 0.20$ บาท

ต้นทุนวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนการผลิต

เมื่อคำนวณปริมาณการใช้วัตถุดิบสารเคมีให้อยู่ในหน่วยกิโลกรัมได้จาก

$$\text{ปริมาณที่ใช้ (L)} \times \text{ความหนาแน่น (kg/L)}$$

และ คำนวณจำนวนเงินค่าวัตถุดิบสารเคมีได้จาก

$$\text{ปริมาณการใช้วัตถุดิบสารเคมี (kg)} \times \text{ราคา (บาท)}$$

เมื่อคำนวณจากเงื่อนไขที่สามารถลดกรดไขมันได้เท่ากับ 2 mgKOH/g จากระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาที และเงื่อนไขที่สามารถแปลงเอสเทอร์ได้เท่ากับ 99 wt.% จากระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 50 นาที

ซึ่งน้ำมันลดกรดที่ได้จากกระบวนการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนชนิดกรดไขมันอิสระด้วยชุดปฏิกรณ์ท่อผสมสถิตแบบหมุนวนขนาดนาร่องโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ให้ผลผลิต 117 %โดยปริมาตร และได้ไบโอดีเซล 76.05 %โดยปริมาตร เมื่อเทียบเท่าน้ำมันปาล์ม

ดิบเริ่มต้นเท่ากับ 100%โดยปริมาตร ดังนั้นสามารถแสดงค่าวัตถุดิบสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ได้ดังแสดงในตาราง ข.3

ตาราง ข.3 แสดงผลการคำนวณต้นทุนวัตถุดิบและสารเคมีในกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม

| วัตถุดิบและสารเคมี | ราคา (บาท/kg) | ปริมาณที่ใช้ (L) | ความหนาแน่น (kg/L) | คิดเป็นเงิน (บาท) |
|----------------------|------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|
| น้ำมันปาล์มดิบ | 30.00 | 100 | 0.873 | 2,619 |
| เอทานอล | | | | |
| stage 1 | 26.00 | 60 | 0.789 | 1,230.84 |
| stage 2 | 26.00 | 23.4 | 0.789 | 480.03 |
| กรดซัลฟิวริก | 38.00 | 5 | 1.840 | 349.60 |
| โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ | 100.00 | 0.7(1.638 kg) | 2.120 | 163.80 |

หมายเหตุ: ราคาน้ำมันปาล์มดิบ กรดซัลฟิวริก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อ้างอิงตามราคาซื้อจากโรงงาน ส่วนราคาเอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% อ้างอิงราคาการค้าการณณ์เฉลี่ยของธนาคารแห่งประเทศไทย

รวมค่าวัตถุดิบสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมได้เท่ากับ 4,843.27 บาท หรือเท่ากับ 74.51 บาทต่อไบโอดีเซล 1 ลิตร ซึ่งคิดเป็น

 น้ำมันปาล์มดิบ 54.08%

 เอทานอล 35.32%

 กรดซัลฟิวริก 7.22%

 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3.38%

 คิดเป็นต้นทุนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ทั้งหมดเท่ากับ

 ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/ลิตร) + ค่าวัตถุดิบสารเคมี (บาท/ลิตร)

 สรุปได้ว่าต้นทุนผลิตเอทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 74.71 บาทต่อลิตร

 ซึ่งแบ่งเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 0.27% และค่าวัตถุดิบสารเคมี 99.73%

หมายเหตุ: ต้นทุนการผลิตที่คำนวณข้างต้นไม่ได้คิดค่าใช้จ่ายของสารเคมีวิเคราะห์ น้ำที่ใช้ในกระบวนการ และค่าแรงงานในการดำเนินการ

ภาคผนวก ค
(แบบของชุดทดลอง)

ตาราง ค.1 ชุดทดลองและรายการชิ้นส่วนอุปกรณ์ในการทดลอง

| ลำดับ ที่ | ชื่อ | จำนวน | หน่วย | ขนาด | หมายเหตุ |
|--------------|--|-------|---------|------------------------|----------------|
| 1 | ชุดทดลองกระบวนการลดกรดไขมันอิสระ | | | | |
| | 1.1 ชุดทดลองแบบใบกวนขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 0.5 ลิตร | | | | |
| | ปีกเกอร์ | 1 | ใบ | 1000 มล | |
| | ครีบริดภายในปีกเกอร์ | 4 | ครีบริด | (10X140) มม. | |
| | ใบกวนแบบ 6-blade disk turbine | 1 | อัน | 70 มม. | |
| | hotplate | 1 | เครื่อง | | |
| | เทอร์โมมิเตอร์ | 1 | เครื่อง | | |
| | 1.2 ชุดทดลองแบบใบกวนขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 2 ลิตร | | | | |
| | ถังกวนทำปฏิกิริยา | 1 | ถัง | 4 ลิตร | |
| | ใบกวนแบบ 6-blade disk turbine | 1 | อัน | 70 มม. | |
| | ถัง paraffin oil | 1 | ถัง | | หุ้มถัง กวน |
| | ฮีทเตอร์ | 1 | ตัว | 500 w | |
| | เทอร์โมสแตต | 1 | ตัว | | |
| | 1.3 ชุดทดลองท่อผสมสเถิตแบบหมุนวนขนาดบรรจุ น้ำมันเริ่มต้น 5 ลิตร | | | | |
| | ถังน้ำมันปาล์มดิบ | 1 | ถัง | 15 ลิตร | |
| | ถังเอทานอล | 1 | ถัง | 60 ลิตร | |
| | ถังกรดซัลฟิวริก | 1 | ถัง | 20 ลิตร | |
| | ท่อผสมแบบสเถิต | 6 | ท่อ | 1 เมตร × 6 ท่อ | มีฉนวน หุ้ม |
| | ปั๊มหมุนวนน้ำมันปาล์มดิบ | 1 | ตัว | 500 ลิตรต่อ ชั่วโมง | |
| | ปั๊มเอทานอล | 1 | ตัว | 37 ลิตรต่อ ชั่วโมง | |
| | ปั๊มกรดซัลฟิวริก | 1 | ตัว | 2.5 ลิตรต่อ ชั่วโมง | |
| | ปั๊มหมุนวนสารเคมีในระบบ | 1 | ตัว | 56 ลิตรต่อ ชั่วโมง | |
| | ฮีทเตอร์ | 1 | ตัว | 500 w | |
| | เทอร์โมสแตต | 1 | ตัว | | |
| | 1.4 ชุดทดลองท่อผสมสเถิตแบบหมุนวนขนาดบรรจุ น้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร | | | | |
| | ถังน้ำมันปาล์มดิบ | 1 | ถัง | 180 ลิตร | |
| | ถังเอทานอล | 1 | ถัง | 70 ลิตร | |

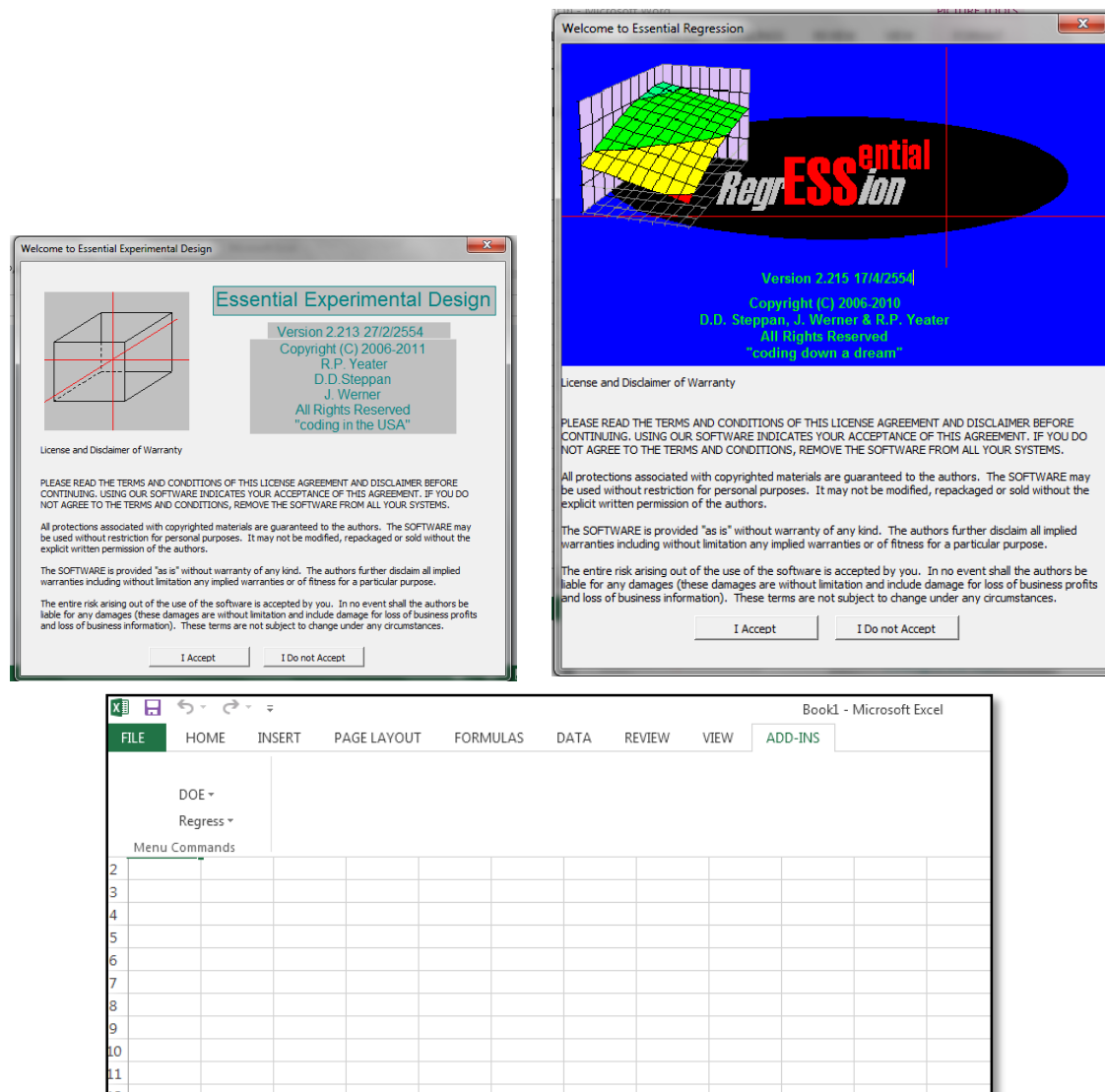
ตาราง ค.1(ต่อ) ชุดทดลองและรายการชิ้นส่วนอุปกรณ์ในการทดลอง

| ลำดับ ที่ | ชื่อ | จำนวน | หน่วย | ขนาด | หมายเหตุ |
|--------------|---|-------|---------|------------------------|----------------|
| | ถังกรดซัลฟิวริก | 1 | ถัง | 20 ลิตร | |
| | ถังเก็บไปโอดีเซล | 2 | ถัง | 180 ลิตร | |
| | ท่อผสมแบบสถิต | 14 | ท่อ | 1 เมตร × 14 ท่อ | 2 กลุ่ม ท่อ |
| | ปั๊มสารเคมีแบบหมุนวน | 2 | ตัว | 500 ลิตรต่อ ชั่วโมง | |
| | ฮีทเตอร์ | 1 | ตัว | 2000 w | |
| | เทอร์โมสตัท | 1 | ตัว | | |
| 2 | ชุดทดลองกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ | | | | |
| | 2.1 ชุดทดลองแบบใบกวนขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 0.5 ลิตร | | | | |
| | ปีกเกอร์ | 1 | ใบ | 1000 มล | |
| | ครีบริดภายในปีกเกอร์ | 4 | ครีบริด | (10×140) มม. | |
| | ใบกวนแบบ 6-blade disk turbine | 1 | อัน | 70 มม. | |
| | hotplate | 1 | เครื่อง | | |
| | เทอร์มิมิเตอร์ | 1 | เครื่อง | | |
| | 2.2 ชุดทดลองท่อผสมสถิตแบบหมุนวนขนาดบรรจุ น้ำมันเริ่มต้น 100 ลิตร | | | | |
| | ถังน้ำมันปาล์มดิบ | 1 | ถัง | 180 ลิตร | |
| | ถังสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ | 1 | ถัง | 70 ลิตร | |
| | ถังเก็บไปโอดีเซล | 2 | ถัง | 180 ลิตร | |
| | ท่อผสมแบบสถิต | 14 | ท่อ | 1 เมตร × 14 ท่อ | |
| | ปั๊มสารเคมีแบบหมุนวน | 2 | ตัว | 500 ลิตรต่อ ชั่วโมง | |
| | ฮีทเตอร์ | 1 | ตัว | 2000 w | |
| | เทอร์โมสตัท | 1 | ตัว | | |

ภาคผนวก ง
(การออกแบบการทดลอง)

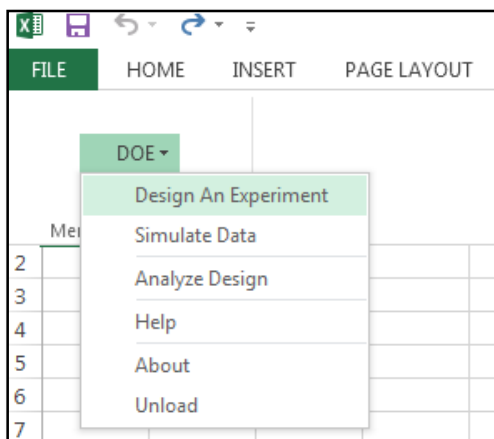
การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Response Surface Methodology, (RSM)

ในการศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงแบบสองขั้นตอนด้วยท่อผสมสปีดแบบหมุนวน ได้ใช้ Response Surface Methodology ในการออกแบบการทดลอง โดยการ Add in โปรแกรมดังกล่าวเข้ามาใน Microsoft Excel เรียกใช้เมื่อต้องการออกแบบการทดลองดังแสดงในรูปที่ ง.1

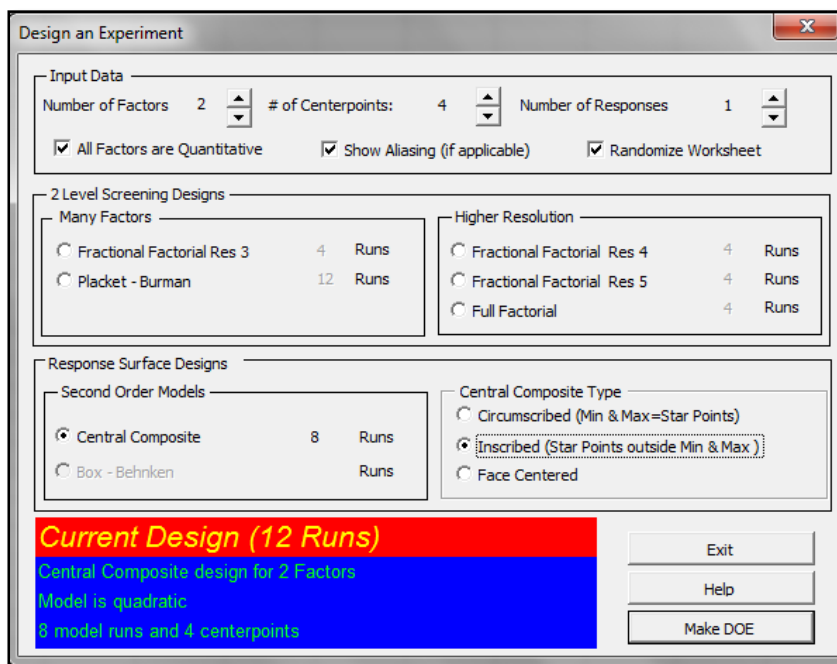


รูปที่ ง.1 แสดงโปรแกรม RSM ที่ถูก Add in เข้ามาใน Excel และถูกเรียกใช้เมื่อต้องการออกแบบการทดลอง

โดยเรียกใช้ Design An Experiment และใส่ข้อมูลในส่วนจำนวนตัวแปรและผลกำหนดพื้นผิวตอบสนอง และกำหนดชนิด Central Composite ดังแสดงในรูปที่ ง.2 และรูปที่ ง.3 โดยตัวแปรที่กำหนดและเลือกใช้ในการออกแบบได้มาจากการทดลอง



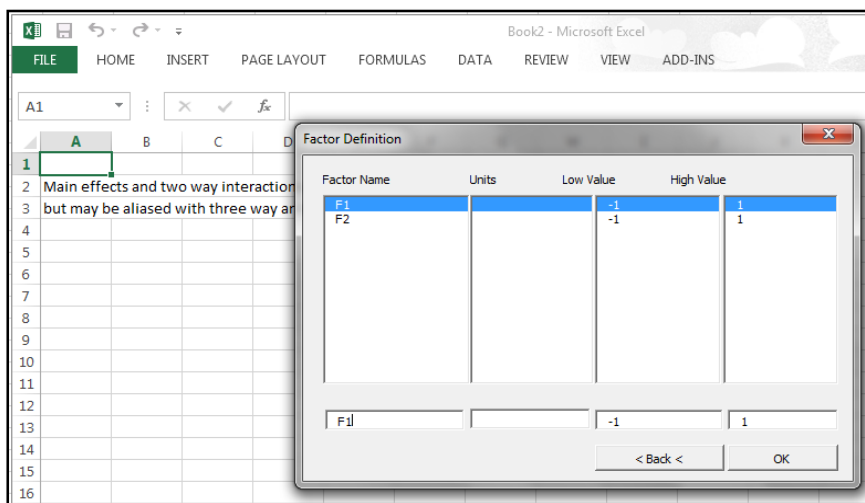
รูปที่ ง.2 แสดงการใช้ Design An Experiment ในการออกแบบการทดลอง



รูปที่ ง.3 แสดงการกำหนดจำนวนตัวแปร จำนวนผล ออกแบบพื้นผิวการตอบสนอง และเลือกชนิด

Central Composite

หาขอบเขตเงื่อนไขที่เป็นไปได้ในการศึกษาและเลือกพิจารณาหาค่าสูงสุดต่ำสุดของแต่ละตัวแปรเพื่อใส่ในการออกแบบดังแสดงในรูปที่ ง.4 เมื่อกำหนดค่าขอบบนขอบล่างของตัวแปรแล้วก็จะได้เงื่อนไขการทดลองมาดังแสดงในรูปที่ ง.5



รูปที่ ง.4 แสดงหน้าต่างการกำหนดค่าตัวแปรเพื่อออกแบบการทดลอง

| Exp # | F1 | F2 | Resp_1 |
|-------|--------|--------|--------|
| 1 | 0.000 | -1.414 | |
| 2 | -1.414 | 0.000 | |
| 3 | 1.000 | 1.000 | |
| 4 | -1.000 | -1.000 | |
| 5 | -1.000 | 1.000 | |
| 6 | 0.000 | 1.414 | |
| 7 | 1.000 | -1.000 | |
| 8 | 0.000 | 0.000 | |
| 9 | 0.000 | 0.000 | |
| 10 | 0.000 | 0.000 | |
| 11 | 0.000 | 0.000 | |
| 12 | 1.414 | 0.000 | |

รูปที่ ง.5 แสดงเงื่อนไขการทดลองที่ได้จากการออกแบบด้วย RSM

เมื่อได้เงื่อนไขจึงทำการทดลอง แล้วนำผลจากการทดลองมากรอกในช่องข้อมูลของผล และทำการเลือกคลุมข้อมูลเงื่อนไขและผลการทดลองทั้งหมดเพื่อวิเคราะห์หาสมการการทำนาย ดังแสดงในรูปที่ ง.6 โดยมีการเลือกตัวแปรที่มีนัยสำคัญ ซึ่งพิจารณาจาก P -value คือถ้า P -value มากกว่า 0.05 จะไม่พิจารณา เพราะถือว่าไม่มีนัยสำคัญ แสดงการเลือกสมการและตัดตัวแปรดังแสดงในรูปที่ ง.7 จะได้หน้าต่างที่แสดงค่า R^2 , $R^2_{adjusted}$, R^2 for Prediction, P -value และค่าคงที่ต่าง ๆ ดังแสดงในรูป ง. 8 และรูปที่ ง. 9 สามารถแสดงเป็น surfaces ได้ด้วยการเลือกตัวแปรเพื่อแสดงความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ ง. 10 และได้ surfaces ดังแสดงในรูปที่ ง. 11 นำข้อมูลความสัมพันธ์จากหน้าต่างแสดง surfaces ไปสร้างกราฟ contour ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดังแสดงในรูปที่ ง. 12-15

| V | AV_5min | AV_10min | AV_15min | AV_20min | AV_25min | AV_30min | AV_35min | AV_40min | AV_45min | AV_50min | AV_55min | AV_60min |
|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 4.2874 | 2.5525 | 1.7845 | 1.9940 | 1.9702 | 1.9227 | 1.8972 | 1.7334 | 1.8516 | 1.7935 | 1.9329 | 2.2226 | |
| 3.3095 | 2.2087 | 1.9673 | 1.8532 | 1.828 | 2.5748 | 2.1617 | 3.0728 | 1.8390 | 1.9269 | 2.5490 | 2.2900 | |
| 4.2874 | 2.5525 | 1.7845 | 1.9940 | 1.9702 | 1.9227 | 1.8972 | 1.7334 | 1.8516 | 1.7935 | 1.9329 | 2.2226 | |
| 4.2874 | 2.5525 | 1.7845 | 1.9940 | 1.9702 | 1.9227 | 1.8972 | 1.7334 | 1.8516 | 1.7935 | 1.9329 | 2.2226 | |
| 3.5534 | 2.7399 | 3.0598 | 3.7711 | 2.6726 | 3.4020 | 2.8571 | 3.4026 | 3.5979 | 3.6281 | 3.8773 | 2.8905 | |
| 6.1199 | 4.5387 | 3.9030 | 4.8967 | 3.5643 | 3.4773 | 3.6570 | 3.6755 | 3.5894 | 3.7922 | 3.1746 | 3.8564 | |
| 11.8808 | 10.7725 | 10.0631 | 8.7765 | 7.6055 | 6.8725 | 6.3346 | 5.5270 | 5.0923 | 4.3695 | 4.1682 | 3.7891 | |
| 3.6747 | 3.4997 | 3.2657 | 3.1546 | 3.1900 | 2.8456 | 2.6637 | 2.6622 | 2.4748 | 2.8388 | 2.7238 | 2.9981 | |
| 10.9353 | 7.7190 | 5.8676 | 4.5177 | 3.2192 | 2.4910 | 2.6469 | 2.9008 | 2.1672 | 2.2409 | 1.8322 | 1.9910 | |
| 10.3178 | 4.5150 | 4.3011 | 3.7134 | 3.6370 | 3.1906 | 2.9382 | 3.0687 | 3.0329 | 3.2740 | 3.4316 | 3.1236 | |
| 4.2874 | 2.5525 | 1.7845 | 1.9940 | 1.9702 | 1.9227 | 1.8972 | 1.7334 | 1.8516 | 1.7935 | 1.9329 | 2.2226 | |
| 3.3264 | 2.6919 | 2.4598 | 2.5630 | 3.0195 | 4.2722 | 4.2099 | 4.2703 | 3.8311 | 4.3350 | 3.7702 | 4.3987 | |

รูปที่ ๖.๖ แสดงการนำข้อมูลเงื่อนไขการทดลองและผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบด้วย RSM มาวิเคราะห์หาสมการทำนายความสัมพันธ์

| Source | SS | SS% | MS | F | F Signif | df |
|------------|----------|-----|----------|----------|-----------|----|
| Regression | 43.63476 | 100 | 7.272460 | 853.4660 | 2.337e-07 | 6 |
| Residual | 0.008205 | 0 | 0.008205 | | | 5 |
| Total | 43.67737 | 100 | | | | 11 |

| Term | Coefficient | Std Error | t Statistic | Significance | VIF |
|----------|-------------|-----------|-------------|--------------|----------|
| Constant | -16.63 | 0.637 | -26.12 | 1.538e-06 | |
| F1 | 0.812 | 0.02224 | 36.50 | 2.908e-07 | 290.2120 |
| F2 | 4.463 | 0.121 | 36.95 | 2.794e-07 | 123.1855 |
| F1*F1 | -0.00595 | 0.000184 | -32.41 | 5.257e-07 | 295.0443 |
| F1*F2 | -0.198 | 0.00427 | -46.36 | 8.816e-08 | 871.6761 |
| F1*F1*F2 | 0.00130 | 3.481e-05 | 37.47 | 2.500e-07 | 466.0273 |
| F1*F2*F2 | 0.00333 | 6.982e-05 | 50.60 | 5.697e-08 | 17.57331 |

รูปที่ ๖.๗ แสดงการเลือกพิจารณาตัวแปรเพื่อสร้างสมการทำนายความสัมพันธ์

| Statistic | Value |
|-------------------------------|---------|
| R | 1.000 |
| R ² | 0.999 |
| R ² adjusted | 0.998 |
| Standard Error | 0.09231 |
| # Points | 12 |
| PRESS | 1.09 |
| R ² for Prediction | 0.975 |
| Durbin-Watson d | 2.038 |
| First Order Autocorrelation | -0.087 |
| Collinearity | 0.000 |
| Coefficient of Variation | 2.687 |

| Source | SS | SS% | MS | F | F Signif | df |
|------------|---------|-----|---------|--------|-------------|----|
| Regression | 43.63 | 100 | 7.272 | 853.47 | 2.33704E-07 | 6 |
| Residual | 0.04261 | 0 | 0.00852 | | | 5 |
| Total | 43.68 | 100 | | | | 11 |

รูป ๖.๘ แสดงหน้าต่างที่แสดงค่า R², R² adjusted และ R² for Prediction สำหรับสมการทำนายความสัมพันธ์

| | | | | | | | |
|--|--------------------------|----------|-------------|-------------|----------|-------------|--------|
| Near Neighbor | Collinearity | 0.000 | | | | | |
| | Coefficient of Variation | 2.687 | | | | | |
| ANOVA | | | | | | | |
| | Source | SS | SS% | MS | F | F Signif | df |
| | Regression | 43.63 | 100 | 7.272 | 853.47 | 2.33704E-07 | 6 |
| | Residual | 0.04261 | 0 | 0.00852 | | | 5 |
| | Total | 43.68 | 100 | | | | 11 |
| AV_20min = b0 + b1*F1 + b2*F2 + b3*F1*F1 + b4*F1*F2 + b5*F1*F1*F2 + b6*F1*F2*F2 | | | | | | | |
| | | P value | Std Error | -95% | 95% | t Stat | VIF |
| | b0 | -16.63 | 1.53801E-06 | 0.637 | -18.27 | -14.99 | -26.12 |
| | b1 | 0.812 | 2.90775E-07 | 0.02224 | 0.755 | 0.869 | 36.50 |
| | b2 | 4.462 | 2.7344E-07 | 0.121 | 4.151 | 4.772 | 36.95 |
| | b3 | -0.00595 | 5.2571E-07 | 0.000184 | -0.00642 | -0.00548 | -32.41 |
| | b4 | -0.198 | 8.81614E-08 | 0.00427 | -0.209 | -0.187 | -46.36 |
| | b5 | 0.00130 | 2.54987E-07 | 3.48148E-05 | 0.00122 | 0.00139 | 37.47 |
| | b6 | 0.00333 | 5.69696E-08 | 6.58234E-05 | 0.00316 | 0.00350 | 50.60 |

รูปที่ ง. 9 แสดงหน้าต่างที่แสดงค่า P-value และค่าคงที่ต่าง ๆ สำหรับสมการทำนายความสัมพันธ์

| | |
|----|---------------|
| 1 | Rerregress |
| 2 | Delete |
| 3 | Predic Table |
| 4 | Graph |
| 5 | Data |
| 6 | Regression |
| 7 | Optimize |
| 8 | Confidence |
| 9 | Outlier |
| 10 | Print |
| 11 | R Matrix |
| 12 | Surfaces |
| 13 | Near Neighbor |
| 14 | Back |

AV_20min = b0 + b1*F1 + b2*F2 + b3*F1*F1 + b4*F1*F2 + b5*F1*F1*F2 + b6*F1*F2*F2

| Summary | |
|-------------------------------|---------|
| R | 1.000 |
| R ² | 0.999 |
| R ² adjusted | 0.998 |
| Standard Error | 0.09231 |
| # Points | 12 |
| PRESS | 1.09 |
| R ² for Prediction | 0.975 |
| Durbin-Watson d | 2.038 |
| First Order Autocorrelation | -0.087 |
| Collinearity | 0.000 |
| Coefficient of Variation | 2.687 |

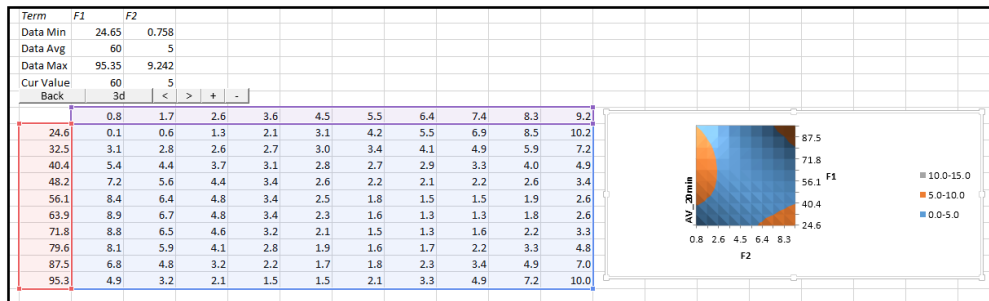
| ANOVA | | | | | | | |
|-------|------------|---------|-----|---------|--------|-------------|----|
| | Source | SS | SS% | MS | F | F Signif | df |
| | Regression | 43.63 | 100 | 7.272 | 853.47 | 2.33704E-07 | 6 |
| | Residual | 0.04261 | 0 | 0.00852 | | | 5 |
| | Total | 43.68 | 100 | | | | 11 |

Pick Contour Plot Terms

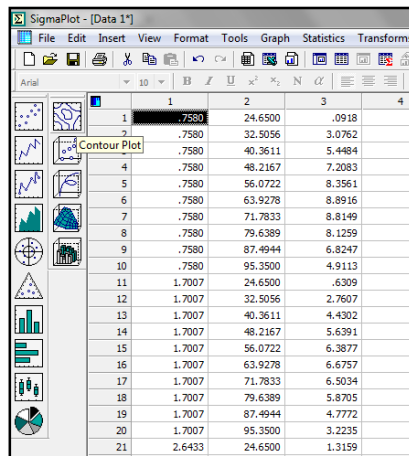
F1

F2

รูปที่ ง. 10 แสดงหน้าต่างการเลือกตัวแปรเพื่อสร้าง surface จากสมการทำนายความสัมพันธ์

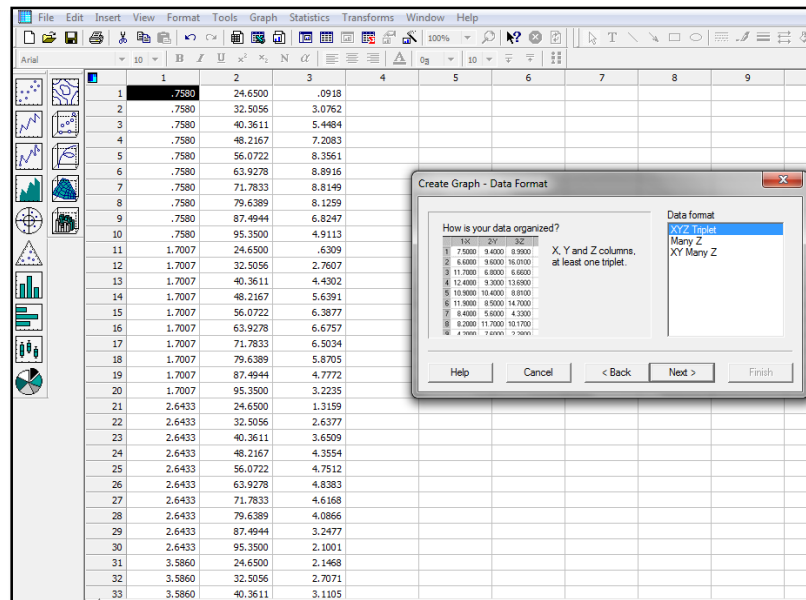


รูปที่ ง. 11 หน้าต่างแสดง surface และข้อมูลจากสมการทำนายความสัมพันธ์



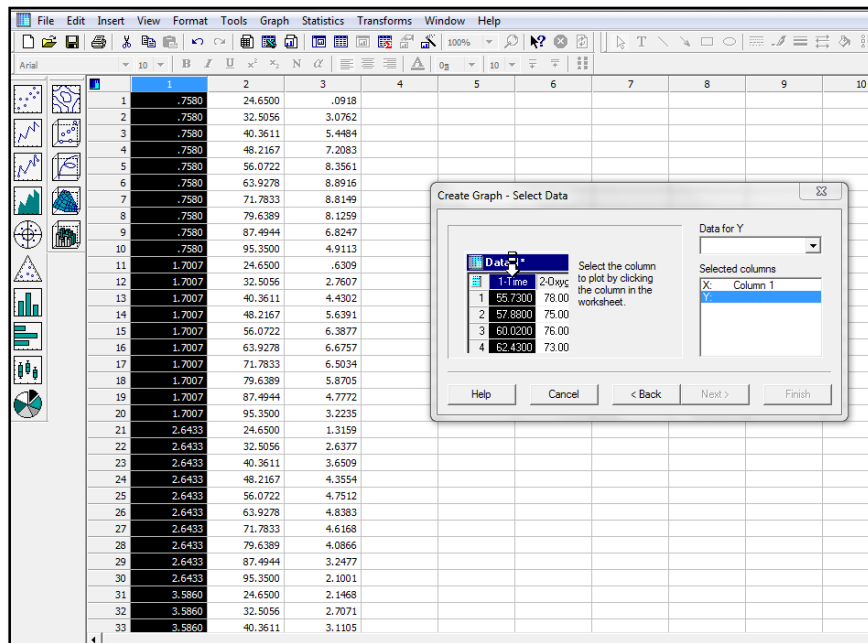
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|--------|---------|--------|---|
| 1 | .7580 | 24.6500 | .0918 | |
| 2 | .7580 | 32.5056 | 3.0762 | |
| 3 | .7580 | 40.3611 | 5.4484 | |
| 4 | .7580 | 48.2167 | 7.2083 | |
| 5 | .7580 | 56.0722 | 8.3561 | |
| 6 | .7580 | 63.9278 | 8.8916 | |
| 7 | .7580 | 71.7833 | 8.8149 | |
| 8 | .7580 | 79.6389 | 8.1259 | |
| 9 | .7580 | 87.4944 | 6.8247 | |
| 10 | .7580 | 95.3500 | 4.9113 | |
| 11 | 1.7007 | 24.6500 | .6309 | |
| 12 | 1.7007 | 32.5056 | 2.7607 | |
| 13 | 1.7007 | 40.3611 | 4.4302 | |
| 14 | 1.7007 | 48.2167 | 5.6391 | |
| 15 | 1.7007 | 56.0722 | 6.3877 | |
| 16 | 1.7007 | 63.9278 | 6.6757 | |
| 17 | 1.7007 | 71.7833 | 6.5034 | |
| 18 | 1.7007 | 79.6389 | 5.8705 | |
| 19 | 1.7007 | 87.4944 | 4.7772 | |
| 20 | 1.7007 | 95.3500 | 3.2235 | |
| 21 | 2.6433 | 24.6500 | 1.3159 | |

รูปที่ ง. 12 แสดงการใส่ข้อมูลจากสมการทำนายความสัมพันธ์ในโปรแกรม SigmaPlot เพื่อสร้างกราฟ contour

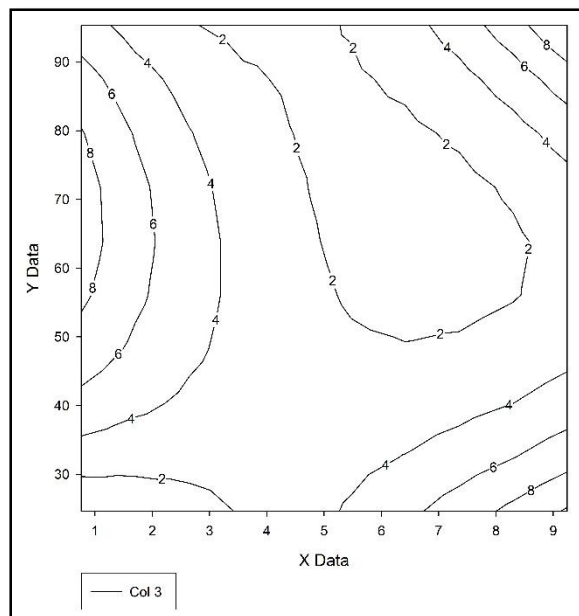


| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----|--------|---------|--------|---|---|---|---|---|---|
| 1 | .7580 | 24.6500 | .0918 | | | | | | |
| 2 | .7580 | 32.5056 | 3.0762 | | | | | | |
| 3 | .7580 | 40.3611 | 5.4484 | | | | | | |
| 4 | .7580 | 48.2167 | 7.2083 | | | | | | |
| 5 | .7580 | 56.0722 | 8.3561 | | | | | | |
| 6 | .7580 | 63.9278 | 8.8916 | | | | | | |
| 7 | .7580 | 71.7833 | 8.8149 | | | | | | |
| 8 | .7580 | 79.6389 | 8.1259 | | | | | | |
| 9 | .7580 | 87.4944 | 6.8247 | | | | | | |
| 10 | .7580 | 95.3500 | 4.9113 | | | | | | |
| 11 | 1.7007 | 24.6500 | .6309 | | | | | | |
| 12 | 1.7007 | 32.5056 | 2.7607 | | | | | | |
| 13 | 1.7007 | 40.3611 | 4.4302 | | | | | | |
| 14 | 1.7007 | 48.2167 | 5.6391 | | | | | | |
| 15 | 1.7007 | 56.0722 | 6.3877 | | | | | | |
| 16 | 1.7007 | 63.9278 | 6.6757 | | | | | | |
| 17 | 1.7007 | 71.7833 | 6.5034 | | | | | | |
| 18 | 1.7007 | 79.6389 | 5.8705 | | | | | | |
| 19 | 1.7007 | 87.4944 | 4.7772 | | | | | | |
| 20 | 1.7007 | 95.3500 | 3.2235 | | | | | | |
| 21 | 2.6433 | 24.6500 | 1.3159 | | | | | | |
| 22 | 2.6433 | 32.5056 | 2.6377 | | | | | | |
| 23 | 2.6433 | 40.3611 | 3.6509 | | | | | | |
| 24 | 2.6433 | 48.2167 | 4.3554 | | | | | | |
| 25 | 2.6433 | 56.0722 | 4.7512 | | | | | | |
| 26 | 2.6433 | 63.9278 | 4.8383 | | | | | | |
| 27 | 2.6433 | 71.7833 | 4.6168 | | | | | | |
| 28 | 2.6433 | 79.6389 | 4.0866 | | | | | | |
| 29 | 2.6433 | 87.4944 | 3.2477 | | | | | | |
| 30 | 2.6433 | 95.3500 | 2.1001 | | | | | | |
| 31 | 3.5860 | 24.6500 | 2.1468 | | | | | | |
| 32 | 3.5860 | 32.5056 | 2.7071 | | | | | | |
| 33 | 3.5860 | 40.3611 | 3.1105 | | | | | | |

รูปที่ ง. 13 แสดงการเลือกรูปแบบข้อมูลจากสมการทำนายความสัมพันธ์ เพื่อสร้างกราฟ contour



รูปที่ ง. 14 แสดงการกำหนดข้อมูลจากสมการทำนายความสัมพันธ์ในโปรแกรม Sigmaplot เพื่อสร้างกราฟ contour



รูปที่ ง. 15 กราฟ contour ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระในโปรแกรม Sigmaplot

ภาคผนวก จ
(ค่าสถิติและกราฟ contour จากผลการทดลอง)

ค่าสถิติและกราฟ contour จากผลการทดลองการลดกรดไขมันอิสระ

จากผลการทดลอง ผลจากการวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระตามแผนการทดลองการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนชนิดกรดไขมันอิสระสูงด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบใบกวน ขนาดบรรจุน้ำมันเริ่มต้น 2 ลิตร สามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระกับตัวแปรอิสระ ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ และแสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่เหมาะสมของเอทานอลแต่ละเกรด สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองและกราฟ contour ของแต่ละสมการ ดังนี้

$$AV_1 = \beta_0 + \beta_1 E_1 + \beta_2 S + \beta_3 E_1 S + \beta_4 S^2 + \beta_5 S E_1^2 + \beta_6 E_1 S^2 \quad (จ.1)$$

$$AV_2 = \beta_0 + \beta_1 E_2^2 + \beta_2 E_2 S + \beta_3 E_2 S^2 \quad (จ.2)$$

$$AV_3 = \beta_0 + \beta_1 E_3 + \beta_2 S + \beta_3 E_3 S + \beta_4 S^2 + \beta_5 S E_3^2 + \beta_6 E_3 S^2 \quad (จ.3)$$

เมื่อ AV1 คือ ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95% ทำปฏิกิริยาที่ระยะเวลา 30 นาที

AV2 คือ ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% ทำปฏิกิริยาที่ระยะเวลา 20 นาที

AV3 คือ ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้เอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99% ทำปฏิกิริยาที่ระยะเวลา 20 นาที

E1 คือ เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 95%

E2 คือ เอทานอลเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9%

E3 คือ เอทานอลเกรดวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ 99%

S คือ กรดซัลฟิวริก

β คือ ค่าสัมประสิทธิ์

ตาราง จ.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการ จ.1-3

| Coefficient | Value | | | p-Value | | |
|-------------------------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|
| | (จ.1) | (จ.2) | (จ.3) | (จ.1) | (จ.2) | (จ.3) |
| β_0 | -43.06 | 6.527 | -84.14 | 0.01823 | 0.000314 | 0.00799 |
| β_1 | 0.825 | 0.000911 | 1.407 | 0.00154 | 0.02039 | 0.00707 |
| β_2 | 10.40 | -0.02884 | 17.82 | 0.00340 | 0.00653 | 0.00662 |
| β_3 | -0.198 | 0.00148 | -0.303 | 0.00112 | 0.00709 | 0.00547 |
| β_4 | -0.463 | - | -0.808 | 0.00902 | - | 0.00978 |
| β_5 | 0.000195 | - | 0.000211 | 0.02709 | - | 0.000725 |
| β_6 | 0.00841 | - | 0.0131 | 0.00388 | - | 0.0098 |
| R^2 | 0.990 | 0.752 | 0.959 | - | - | - |
| R^2_{adjusted} | 0.978 | 0.659 | 0.910 | - | - | - |

จากผลการทดลอง ผลจากการวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระตามแผนการทดลองการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนชนิดกรดไขมันอิสระสูงด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสถิติแบบหมุนวน สามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระกับตัวแปรอิสระได้สมการแสดงความสัมพันธ์ และแสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการ สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองและกราฟ contour ของแต่ละสมการ ดังนี้

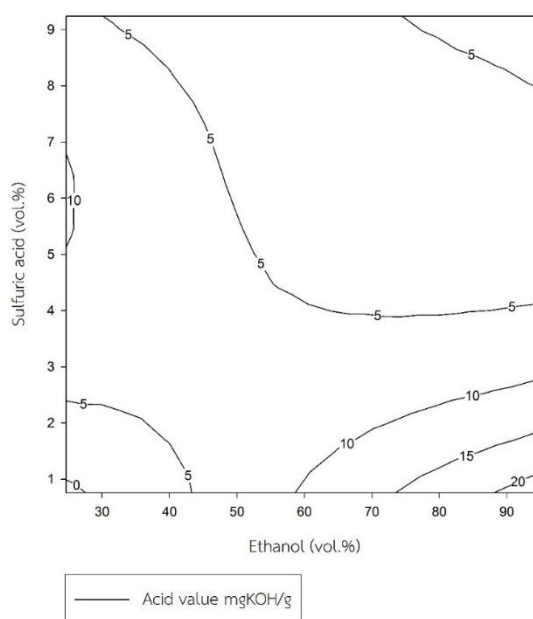
$$AV_{5min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 S + \beta_3 ES + \beta_4 S^2 + \beta_5 SE^2 + \beta_6 ES^2 \quad (\text{จ.4})$$

ตาราง จ.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.4

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|---------|
| β_0 | -16.03 | 0.01823 |
| β_1 | 0.470 | 0.00154 |
| β_2 | 10.67 | 0.00340 |
| β_3 | -0.240 | 0.00112 |
| β_4 | -0.817 | 0.00902 |
| β_5 | 0.000378 | 0.02709 |
| β_6 | 0.01623 | 0.00388 |
| R^2 | 0.955 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.900 | - |
| R^2 for Prediction | 0.468 | - |

ตาราง จ.3 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.4

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|--------|-------|-------|--------------|-----|
| Regression | 109.66 | 18.28 | 17.59 | 0.00321 | 6 |
| Residual | 5.196 | 1.039 | - | - | 5 |
| LOF Error | - | - | - | - | - |
| Pure Error | - | - | - | - | - |
| Total | 114.86 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.1 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที

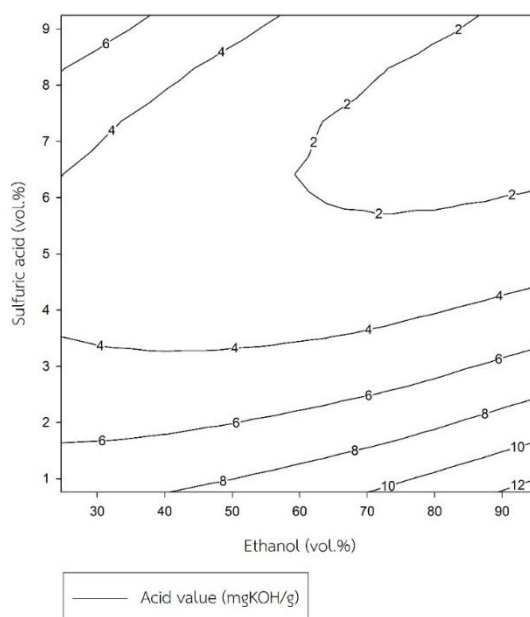
$$AV_{10min} = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 E^2 + \beta_3 ES + \beta_4 S^2 \quad (จ.5)$$

ตาราง จ.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.5

| Coefficient | Value | p -Value |
|----------------------|----------|------------|
| β_0 | 8.559 | 0.00268 |
| β_1 | -1.751 | 0.04474 |
| β_2 | 0.000741 | 0.07257 |
| β_3 | -0.01884 | 0.04818 |
| β_4 | 0.224 | 0.00502 |
| R^2 | 0.846 | - |
| $R^2_{adjusted}$ | 0.758 | - |
| R^2 for Prediction | 0.291 | - |

ตาราง จ.5 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.5

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|-------|-------|-------|--------------|-----|
| Regression | 63.71 | 15.93 | 9.598 | 0.00570 | 4 |
| Residual | 11.62 | 1.660 | - | - | 7 |
| LOF Error | - | - | - | - | - |
| Pure Error | - | - | - | - | - |
| Total | 75.33 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.2 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

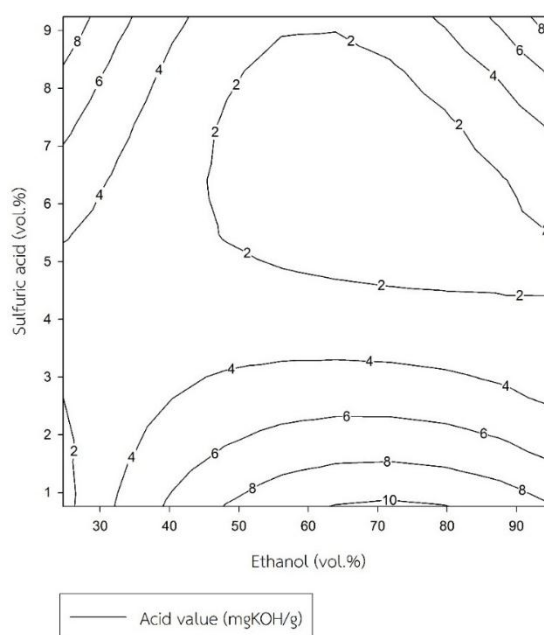
$$AV_{15\min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 S + \beta_3 E^2 + \beta_4 ES + \beta_5 E^2 S + \beta_6 ES^2 \quad (จ.6)$$

ตาราง จ.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.6

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|----------|
| β_0 | -13.32 | 0.01124 |
| β_1 | 0.718 | 0.00179 |
| β_2 | 3.913 | 0.00176 |
| β_3 | -0.00490 | 0.00414 |
| β_4 | -0.188 | 0.000430 |
| β_5 | 0.00114 | 0.00165 |
| β_6 | 0.00393 | 0.000101 |
| R^2 | 0.981 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.959 | - |
| R^2 for Prediction | 0.688 | - |

ตาราง จ.7 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.6

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|-------|-------|-------|--------------|-----|
| Regression | 63.72 | 10.62 | 43.63 | 0.000369 | 6 |
| Residual | 1.217 | 0.243 | - | - | 5 |
| LOF Error | - | - | - | - | - |
| Pure Error | - | - | - | - | - |
| Total | 64.94 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.3 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที

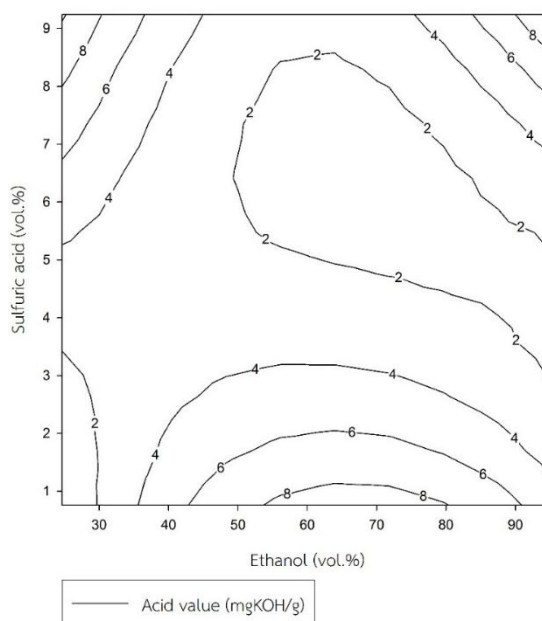
$$AV_{20\min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 S + \beta_3 E^2 + \beta_4 ES + \beta_5 E^2 S + \beta_6 ES^2 \quad (จ.7)$$

ตาราง จ.8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.7

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|----------|
| β_0 | -13.32 | 0.01124 |
| β_1 | 0.718 | 0.00179 |
| β_2 | 3.913 | 0.00176 |
| β_3 | -0.00490 | 0.00414 |
| β_4 | -0.188 | 0.000430 |
| β_5 | 0.00114 | 0.00165 |
| β_6 | 0.00393 | 0.000101 |
| R^2 | 0.981 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.959 | - |
| R^2 for Prediction | 0.975 | - |

ตาราง จ.9 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.7

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|-------|-------|-------|--------------|-----|
| Regression | 63.72 | 10.62 | 43.63 | 0.000369 | 6 |
| Residual | 1.217 | 0.243 | - | - | 5 |
| LOF Error | - | - | - | - | - |
| Pure Error | - | - | - | - | - |
| Total | 64.94 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.4 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที

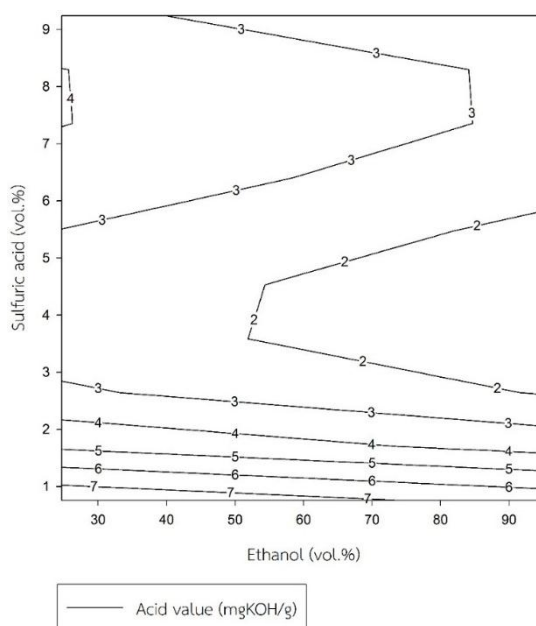
$$AV_{25\min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 S + \beta_3 S^2 + \beta_4 S^3 \quad (\text{จ.8})$$

ตาราง จ.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.8

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|----------|
| β_0 | 11.83 | 0.000017 |
| β_1 | -0.01711 | 0.06940 |
| β_2 | -5.457 | 0.000678 |
| β_3 | 1.036 | 0.00237 |
| β_4 | -0.05850 | 0.00551 |
| R^2 | 0.919 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.873 | - |
| R^2 for Prediction | 0.353 | - |

ตาราง จ.11 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.8

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|-------|-------|-------|--------------|-----|
| Regression | 25.48 | 6.370 | 19.98 | 0.000625 | 4 |
| Residual | 2.231 | 0.319 | - | - | 7 |
| LOF Error | - | - | - | - | - |
| Pure Error | - | - | - | - | - |
| Total | 27.71 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.5 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที

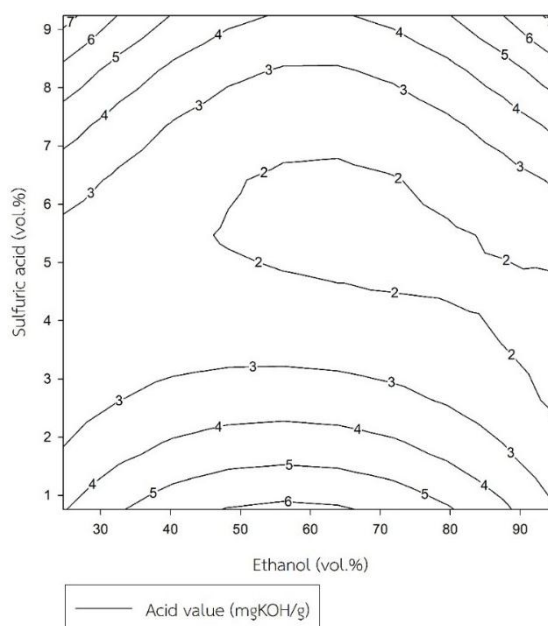
$$AV_{30min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 E^2 + \beta_3 ES + \beta_4 S^2 + \beta_5 E^2 S \quad (จ.9)$$

ตาราง จ.12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.9

| Coefficient | Value | p -Value |
|----------------------|----------|------------|
| β_0 | -0.965 | 0.575 |
| β_1 | 0.301 | 0.00587 |
| β_2 | -0.00263 | 0.00805 |
| β_3 | -0.06896 | 0.000995 |
| β_4 | 0.175 | 0.000923 |
| β_5 | 0.000588 | 0.00218 |
| R^2 | 0.869 | - |
| $R^2_{adjusted}$ | 0.761 | - |
| R^2 for Prediction | -0.306 | - |

ตาราง จ.13 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.9

| Source | SS | MS | F0 | Fsignif | DOF |
|------------|-------|-------|-------|---------|-----|
| Regression | 19.21 | 3.842 | 7.993 | 0.01251 | 5 |
| Residual | 2.884 | 0.481 | - | - | 6 |
| LOF Error | - | - | - | - | - |
| Pure Error | - | - | - | - | - |
| Total | 22.09 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.6 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

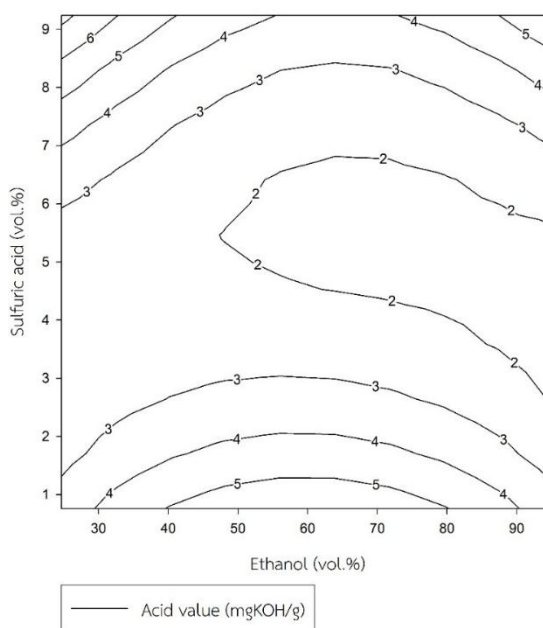
$$AV_{35min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 E^2 + \beta_3 ES + \beta_4 S^2 + \beta_5 E^2 S \quad (จ.10)$$

ตาราง จ.14 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.10

| Coefficient | Value | p-Value |
|----------------------|----------|----------|
| β_0 | -1.119 | 0.428 |
| β_1 | 0.273 | 0.00339 |
| β_2 | -0.00227 | 0.00598 |
| β_3 | -0.06018 | 0.000667 |
| β_4 | 0.164 | 0.000414 |
| β_5 | 0.000483 | 0.00200 |
| R^2 | 0.899 | - |
| $R^2_{adjusted}$ | 0.816 | - |
| R^2 for Prediction | -0.010 | - |

ตาราง จ.15 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.10

| Source | SS | MS | F0 | Fsignif | DOF |
|------------|-------|-------|-------|---------|-----|
| Regression | 16.88 | 3.377 | 10.73 | 0.00594 | 5 |
| Residual | 1.888 | 0.315 | - | - | 6 |
| LOF Error | - | - | - | - | - |
| Pure Error | - | - | - | - | - |
| Total | 18.77 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.7 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 35 นาที

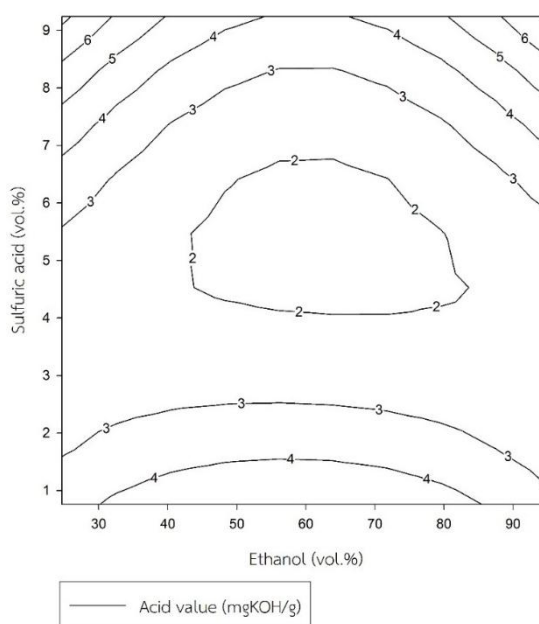
$$AV_{40\min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 E^2 + \beta_3 ES + \beta_4 S^2 + \beta_5 ES^2 \quad (จ.11)$$

ตาราง จ.15 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.11

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|----------|
| β_0 | 0.603 | 0.671 |
| β_1 | 0.191 | 0.01855 |
| β_2 | -0.00165 | 0.02577 |
| β_3 | -0.05536 | 0.00117 |
| β_4 | 0.151 | 0.000735 |
| β_5 | 0.000466 | 0.00269 |
| R^2 | 0.873 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.767 | - |
| R^2 for Prediction | -0.365 | - |

ตาราง จ.17 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.11

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|-------|-------|-------|--------------|-----|
| Regression | 13.57 | 2.714 | 8.240 | 0.01160- | 5 |
| Residual | 1.977 | 0.329 | - | - | 6 |
| LOF Error | - | - | - | - | - |
| Pure Error | - | - | - | - | - |
| Total | 15.55 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.8 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที

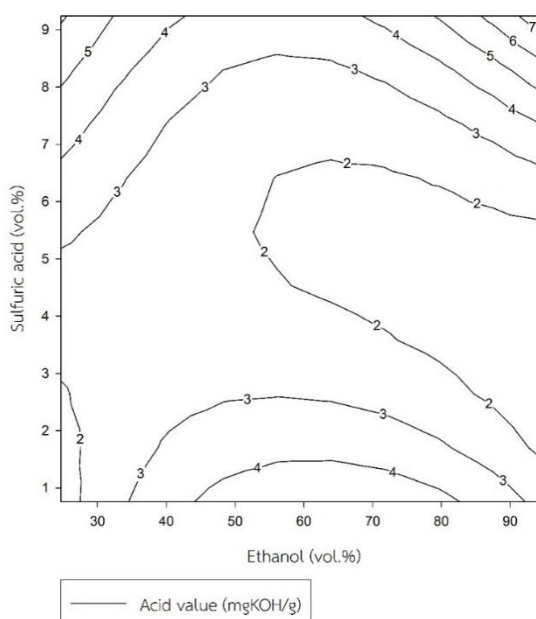
$$AV_{45 \min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 S + \beta_3 E^2 + \beta_4 ES + \beta_5 E^2 S + \beta_6 ES^2 \quad (\text{จ.12})$$

ตาราง จ.18 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.12

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------------|----------|----------|
| β_0 | -5.332 | 0.06256 |
| β_1 | 0.344 | 0.00699 |
| β_2 | 1.866 | 0.00698 |
| β_3 | -0.00262 | 0.00962 |
| β_4 | -0.08978 | 0.00186 |
| β_5 | 0.000577 | 0.00521 |
| β_6 | 0.00216 | 0.000237 |
| R^2 | 0.959 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.909 | - |
| $R^2_{\text{for Prediction}}$ | -0.072 | - |

ตาราง จ.19 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.12

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|-------|-------|-------|--------------|-----|
| Regression | 12.11 | 2.018 | 19.26 | 0.00260 | 6 |
| Residual | 0.524 | 0.105 | - | - | 5 |
| LOF Error | - | - | - | - | - |
| Pure Error | - | - | - | - | - |
| Total | 12.63 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.9 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที

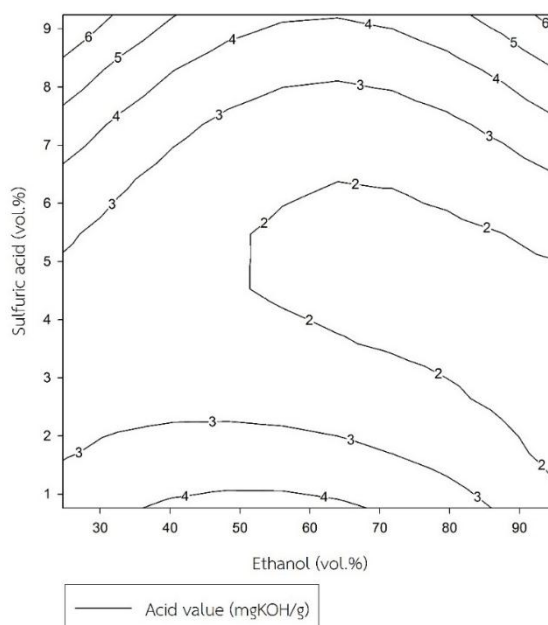
$$AV_{50min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 E^2 + \beta_3 ES + \beta_4 S^2 + \beta_5 E^2 S \quad (จ.13)$$

ตาราง จ.20 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.13

| Coefficient | Value | p-Value |
|----------------------|----------|----------|
| β_0 | 1.160 | 0.121 |
| β_1 | 0.152 | 0.00174 |
| β_2 | -0.00142 | 0.00174 |
| β_3 | -0.04506 | 0.000062 |
| β_4 | 0.130 | 0.000027 |
| β_5 | 0.000384 | 0.000146 |
| R^2 | 0.962 | - |
| $R^2_{adjusted}$ | 0.931 | - |
| R^2 for Prediction | 0.758 | - |

ตาราง จ.21 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.13

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|-------|---------|-------|--------------|-----|
| Regression | 11.39 | 2.279 | 30.47 | 0.000342 | 5 |
| Residual | 0.449 | 0.07478 | - | - | 6 |
| LOF Error | - | - | - | - | - |
| Pure Error | - | - | - | - | - |
| Total | 11.84 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.10 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที

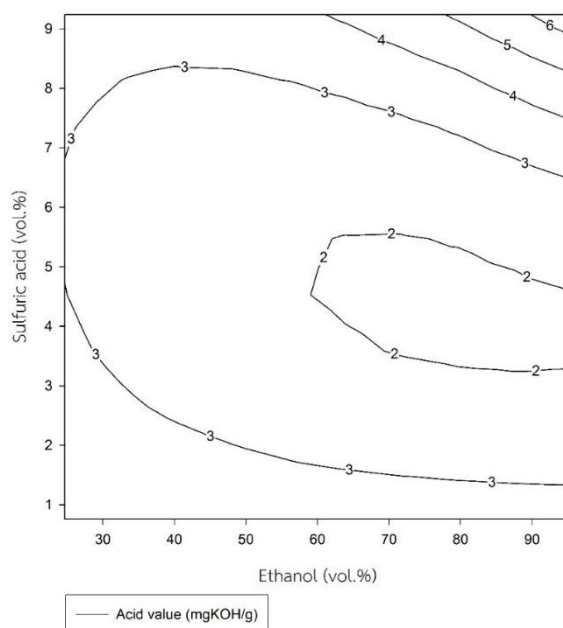
$$AV_{55min} = \beta_0 + \beta_1 ES + \beta_2 E^2 S + \beta_3 ES^2 \quad (จ.14)$$

ตาราง จ.22 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.14

| Coefficient | Value | p-Value |
|----------------------|----------|-----------|
| β_0 | 4.345 | 0.0000058 |
| β_1 | -0.02184 | 0.00116 |
| β_2 | 0.000091 | 0.01280 |
| β_3 | 0.00169 | 0.000368 |
| R^2 | 0.817 | - |
| $R^2_{adjusted}$ | 0.748 | - |
| R^2 for Prediction | 0.540 | - |

ตาราง จ.23 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.14

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|-------|-------|-------|--------------|-----|
| Regression | 6.958 | 2.319 | 11.91 | 0.00255 | 3 |
| Residual | 1.558 | 0.195 | - | - | 8 |
| LOF Error | - | - | - | - | - |
| Pure Error | - | - | - | - | - |
| Total | 8.516 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.11 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 55 นาที

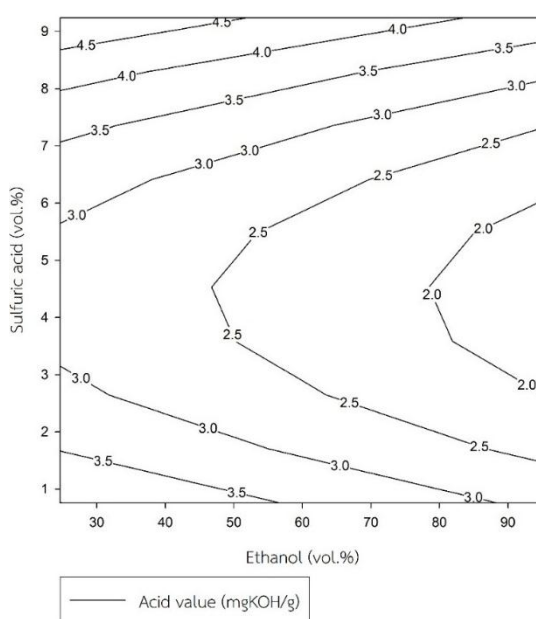
$$AV_{60min} = \beta_0 + \beta_1 S^2 + \beta_2 S + \beta_3 E \quad (\text{จ.15})$$

ตาราง จ.24 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.15

| Coefficient | Value | p-Value |
|----------------------|----------|-----------|
| β_0 | 4.929 | 0.0000018 |
| β_1 | 0.08824 | 0.000130 |
| β_2 | -0.773 | 0.000408 |
| β_3 | -0.01576 | 0.00582 |
| R^2 | 0.898 | - |
| $R^2_{adjusted}$ | 0.860 | - |
| R^2 for Prediction | 0.680 | - |

ตาราง จ.25 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.15

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|-------|---------|-------|--------------|-----|
| Regression | 6.302 | 2.101 | 23.49 | 0.000255 | 3 |
| Residual | 0.716 | 0.08944 | - | - | 8 |
| LOF Error | - | - | - | - | - |
| Pure Error | - | - | - | - | - |
| Total | 7.018 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.12 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและกรดซัลฟิวริกปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

ค่าสถิติและกราฟ contour จากผลการทดลองการผลิตเอทิลเอสเทอร์

จากผลการทดลอง ผลจากการวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ตามแผนการทดลองการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน สามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระ ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการ สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองและกราฟ contour ของแต่ละสมการ ดังนี้

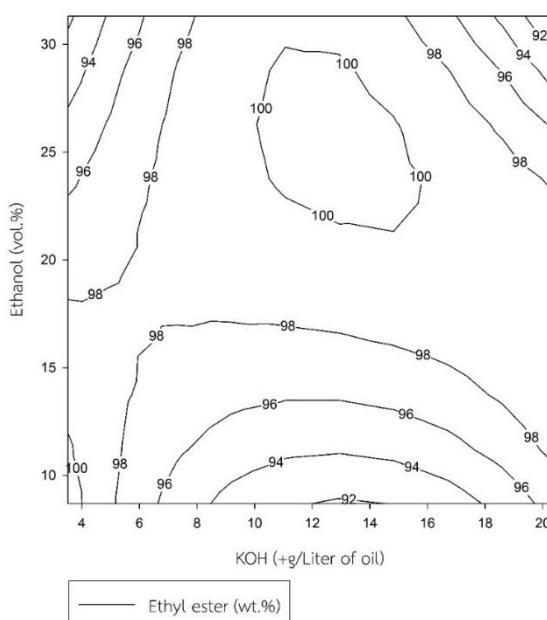
$$AV_{5min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 K + \beta_3 EK + \beta_4 K^2 + \beta_5 E^2 K + \beta_6 EK^2 \quad (จ.16)$$

ตาราง จ.26 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.16

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|----------|
| β_0 | 118.40 | 0.000017 |
| β_1 | -1.130 | 0.02648 |
| β_2 | -5.283 | 0.01059 |
| β_3 | 0.335 | 0.00438 |
| β_4 | 0.182 | 0.02021 |
| β_5 | -0.00235 | 0.00703 |
| β_6 | -0.00981 | 0.01394 |
| R^2 | 0.904 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.788 | - |
| R^2 for Prediction | -0.985 | - |

ตาราง จ.27 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.16

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|-------|---------|---------|---------------------|-----|
| Regression | 54.53 | 9.088 | 7.816 | 0.01968 | 6 |
| Residual | 5.814 | 1.163 | - | - | 5 |
| LOF Error | 5.704 | 2.852 | 78.1009 | 0.00259 | 2 |
| Pure Error | 0.110 | 0.03652 | - | - | 3 |
| Total | 60.34 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.13 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที

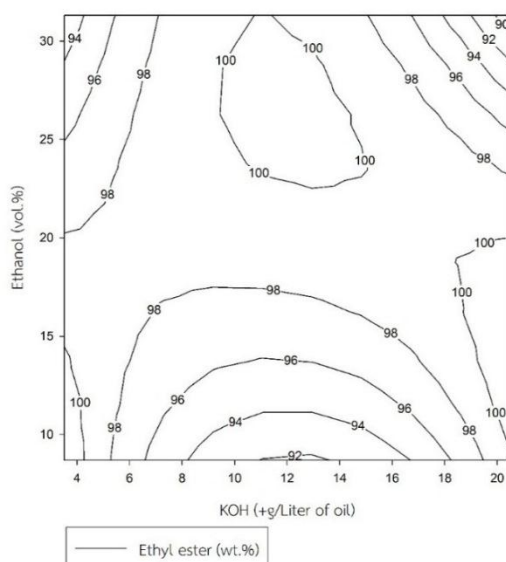
$$AV_{10min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 K + \beta_3 EK + \beta_4 K^2 + \beta_5 E^2 K + \beta_6 EK^2 \quad (\text{จ.17})$$

ตาราง จ.28 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.17

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|----------|
| β_0 | 120.87 | 0.000028 |
| β_1 | -1.166 | 0.03554 |
| β_2 | -5.938 | 0.01062 |
| β_3 | 0.349 | 0.00601 |
| β_4 | 0.220 | 0.01536 |
| β_5 | -0.00221 | 0.01440 |
| β_6 | -0.01112 | 0.01350 |
| R^2 | 0.883 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.743 | - |
| R^2 for Prediction | -1.859 | - |

ตาราง จ.29 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.17

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|-------|-------|---------|---------------------|-----|
| Regression | 55.59 | 9.265 | 6.299 | 0.03090 | 6 |
| Residual | 7.355 | 1.471 | - | - | 5 |
| LOF Error | 7.054 | 3.527 | 35.1400 | 0.00828 | 2 |
| Pure Error | 0.301 | 0.100 | - | - | 3 |
| Total | 62.95 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.14 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเตอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเตอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

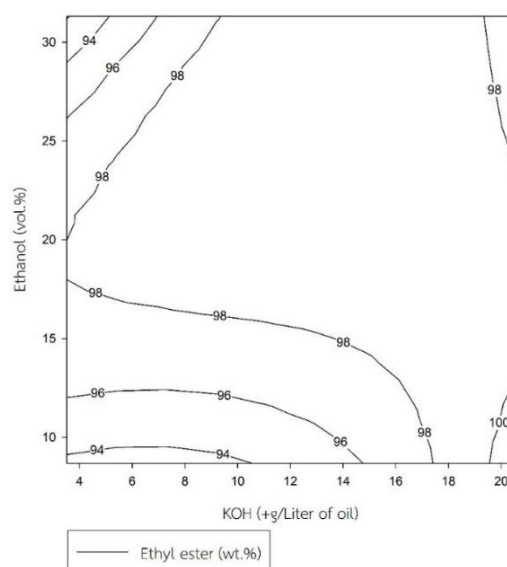
$$AV_{15min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 K + \beta_3 E^2 + \beta_4 K^2 + \beta_5 E^2 K + \beta_6 EK^2 \quad (\text{จ.18})$$

ตาราง จ.30 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.18

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|-------------|
| β_0 | 84.61 | 0.000000002 |
| β_1 | 1.632 | 0.0000239 |
| β_2 | -0.704 | 0.00614 |
| β_3 | -0.05069 | 0.0000647 |
| β_4 | 0.07921 | 0.000768 |
| β_5 | 0.00266 | 0.000387 |
| β_6 | -0.00465 | 0.000303 |
| R^2 | 0.987 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.971 | - |
| R^2 for Prediction | 0.833 | - |

ตาราง จ.31 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.18

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|-------|---------|--------|---------------------|-----|
| Regression | 27.96 | 4.660 | 62.97 | 0.000151 | 6 |
| Residual | 0.370 | 0.07401 | - | - | 5 |
| LOF Error | 0.219 | 0.109 | 2.1672 | 0.262 | 2 |
| Pure Error | 0.151 | 0.05045 | - | - | 3 |
| Total | 28.33 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.15 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที

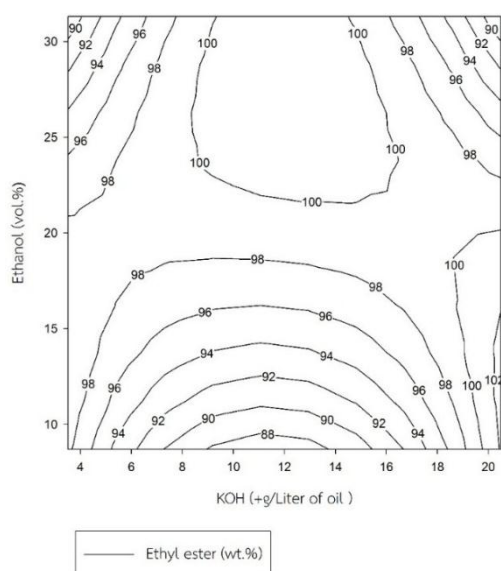
$$AV_{20min} = \beta_0 + \beta_1 K + \beta_2 E^2 + \beta_3 EK + \beta_4 K^2 + \beta_5 EK^2 \quad (\text{จ.19})$$

ตาราง จ.32 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.19

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|------------|
| β_0 | 113.91 | 0.00000016 |
| β_1 | -7.509 | 0.00106 |
| β_2 | -0.03893 | 0.00356 |
| β_3 | 0.376 | 0.000984 |
| β_4 | 0.326 | 0.00116 |
| β_5 | -0.01613 | 0.00115 |
| R^2 | 0.898 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.813 | - |
| R^2 for Prediction | -0.423 | - |

ตาราง จ.33 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.19

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|---------|---------|----------|---------------------|-----|
| Regression | 150.68 | 30.14 | 10.59 | 0.00615 | 5 |
| Residual | 17.08 | 2.847 | - | - | 6 |
| LOF Error | 17.04 | 5.678 | 378.6409 | 0.000229 | 3 |
| Pure Error | 0.04499 | 0.01500 | - | - | 3 |
| Total | 167.76 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.16 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที

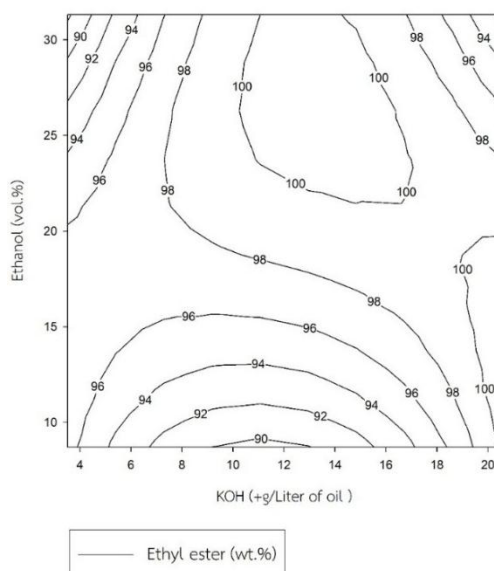
$$AV_{25\min} = \beta_0 + \beta_1 K + \beta_2 E^2 + \beta_3 EK + \beta_4 K^2 + \beta_5 EK^2 \quad (\text{จ.20})$$

ตาราง จ.34 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.20

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|-------------|
| β_0 | 107.06 | 0.000000012 |
| β_1 | -5.231 | 0.000514 |
| β_2 | -0.03150 | 0.000833 |
| β_3 | 0.288 | 0.000283 |
| β_4 | 0.226 | 0.000571 |
| β_5 | -0.01198 | 0.000397 |
| R^2 | 0.940 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.890 | - |
| R^2 for Prediction | 0.142 | - |

ตาราง จ.35 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.20

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|--------|---------|---------|---------------------|-----|
| Regression | 98.49 | 19.70 | 18.74 | 0.00133 | 5 |
| Residual | 6.307 | 1.051 | - | - | 6 |
| LOF Error | 6.200 | 2.067 | 58.1660 | 0.00371 | 3 |
| Pure Error | 0.107 | 0.03553 | - | - | 3 |
| Total | 104.80 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.17 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที

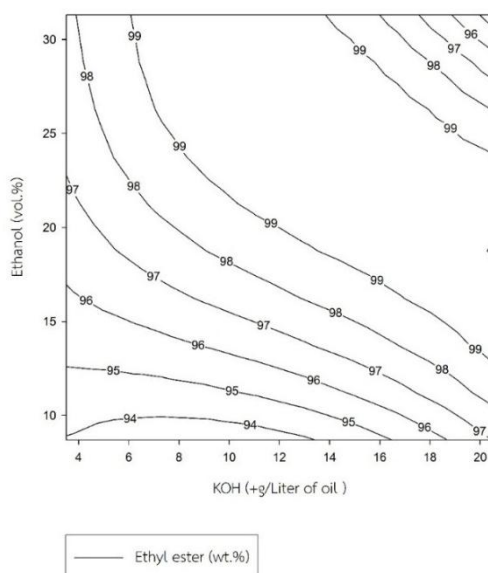
$$AV_{30\min} = \beta_0 + \beta_1 K + \beta_2 EK + \beta_3 K^2 + \beta_4 E^2 K + \beta_5 EK^2 \quad (\text{จ.21})$$

ตาราง จ.36 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.21

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|---------------|
| β_0 | 95.10 | 0.00000000012 |
| β_1 | -1.370 | 0.00314 |
| β_2 | 0.123 | 0.000358 |
| β_3 | 0.05262 | 0.01425 |
| β_4 | -0.00159 | 0.00363 |
| β_5 | -0.00318 | 0.00319 |
| R^2 | 0.935 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.882 | - |
| R^2 for Prediction | 0.280 | - |

ตาราง จ.37 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.21

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|-------|---------|---------|---------------------|-----|
| Regression | 41.80 | 8.361 | 17.40 | 0.00164 | 5 |
| Residual | 2.883 | 0.481 | - | - | 6 |
| LOF Error | 2.768 | 0.923 | 23.9563 | 0.01345 | 3 |
| Pure Error | 0.116 | 0.03851 | - | - | 3 |
| Total | 44.69 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.18 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

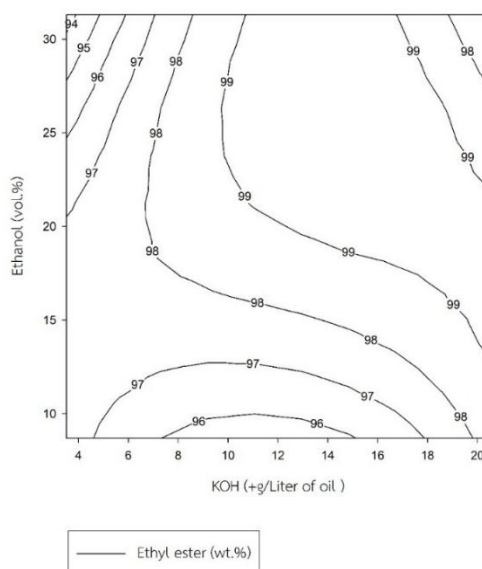
$$AV_{40min} = \beta_0 + \beta_1 K + \beta_2 E^2 + \beta_3 EK + \beta_4 K^2 + \beta_5 EK^2 \quad (\text{จ.22})$$

ตาราง จ.38 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.22

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|---------------|
| β_0 | 100.69 | 0.00000000074 |
| β_1 | -1.664 | 0.01065 |
| β_2 | -0.01216 | 0.00671 |
| β_3 | 0.103 | 0.00370 |
| β_4 | 0.06919 | 0.01375 |
| β_5 | -0.00405 | 0.00657 |
| R^2 | 0.885 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.789 | - |
| R^2 for Prediction | -0.213 | - |

ตาราง จ.39 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.22

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|-------|---------|--------|---------------------|-----|
| Regression | 16.80 | 3.359 | 9.250 | 0.00868 | 5 |
| Residual | 2.179 | 0.363 | - | - | 6 |
| LOF Error | 1.940 | 0.647 | 8.1388 | 0.05939 | 3 |
| Pure Error | 0.238 | 0.07947 | - | - | 3 |
| Total | 18.97 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.19 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที

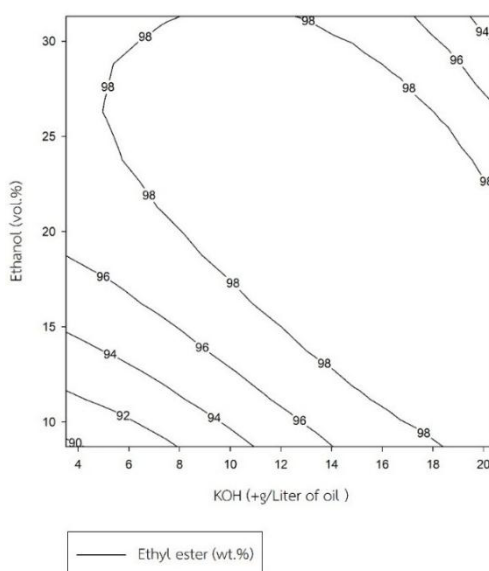
$$AV_{50min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 E^2 + \beta_3 K^2 + \beta_4 EK^2 + \beta_5 K^3 \quad (\text{จ.23})$$

ตาราง จ.40 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.23

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|-------------|
| β_0 | 79.53 | 0.000000014 |
| β_1 | 1.288 | 0.000299 |
| β_2 | -0.02333 | 0.00127 |
| β_3 | 0.07694 | 0.000510 |
| β_4 | -0.00143 | 0.00239 |
| β_5 | -0.00206 | 0.00439 |
| R^2 | 0.943 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.896 | - |
| R^2 for Prediction | 0.667 | - |

ตาราง จ.41 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.23

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|---------|---------|---------|---------------------|-----|
| Regression | 43.92 | 8.783 | 19.94 | 0.00113 | 5 |
| Residual | 2.643 | 0.441 | - | - | 6 |
| LOF Error | 2.615 | 0.872 | 90.7444 | 0.00193 | 3 |
| Pure Error | 0.02881 | 0.00960 | - | - | 3 |
| Total | 46.56 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.20 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที

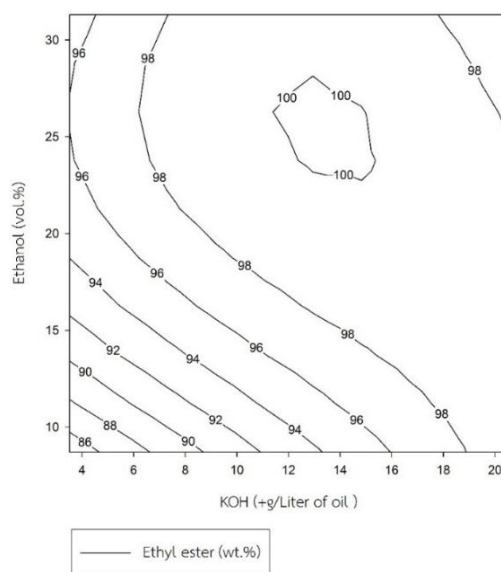
$$AV_{60min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 K + \beta_3 E^2 + \beta_4 EK + \beta_5 E^2 K + \beta_6 EK^2 \quad (\text{จ.24})$$

ตาราง จ.42 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.24

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|-----------|
| β_0 | 65.34 | 0.0000017 |
| β_1 | 2.143 | 0.000495 |
| β_2 | 1.549 | 0.000658 |
| β_3 | -0.04211 | 0.00144 |
| β_4 | -0.05504 | 0.05330 |
| β_5 | 0.00152 | 0.03570 |
| β_6 | -0.00167 | 0.000120 |
| R^2 | 0.996 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.990 | - |
| R^2 for Prediction | 0.893 | - |

ตาราง จ.43 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.24

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|---------|---------|---------|---------------------|-----|
| Regression | 92.94 | 15.49 | 184.81 | 0.00001 | 6 |
| Residual | 0.419 | 0.08382 | - | - | 5 |
| LOF Error | 0.387 | 0.193 | 17.9215 | 0.02146 | 2 |
| Pure Error | 0.03237 | 0.01079 | - | - | 3 |
| Total | 93.36 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.21 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเตอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเตอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

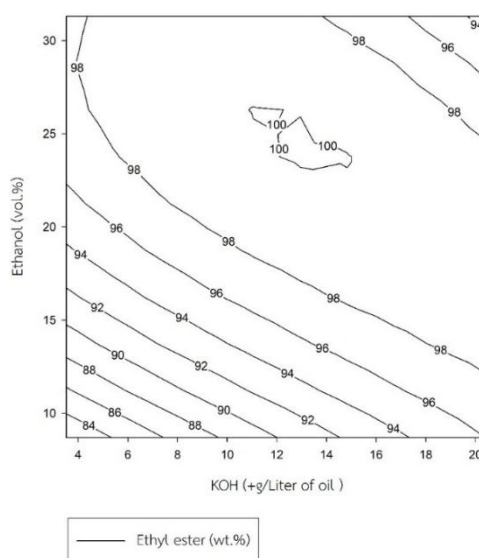
$$AV_{70min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 K + \beta_3 E^2 + \beta_4 EK + \beta_5 E^2 K \quad (\text{จ.25})$$

ตาราง จ.44 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.25

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|-------------|
| β_0 | 61.74 | 0.000000002 |
| β_1 | 2.242 | 0.0000002 |
| β_2 | 1.231 | 0.000002 |
| β_3 | -0.03733 | 0.000001 |
| β_4 | -0.01331 | 0.04544 |
| β_5 | -0.00143 | 0.000161 |
| R^2 | 0.996 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.992 | - |
| R^2 for Prediction | 0.981 | - |

ตาราง จ.45 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.25

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|--------|-------|--------|---------------------|-----|
| Regression | 147.47 | 29.49 | 288.98 | 0.0000004 | 5 |
| Residual | 0.612 | 0.102 | - | - | 6 |
| LOF Error | 0.311 | 0.104 | 1.0302 | 0.491 | 3 |
| Pure Error | 0.302 | 0.101 | - | - | 3 |
| Total | 148.08 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.22 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 70 นาที

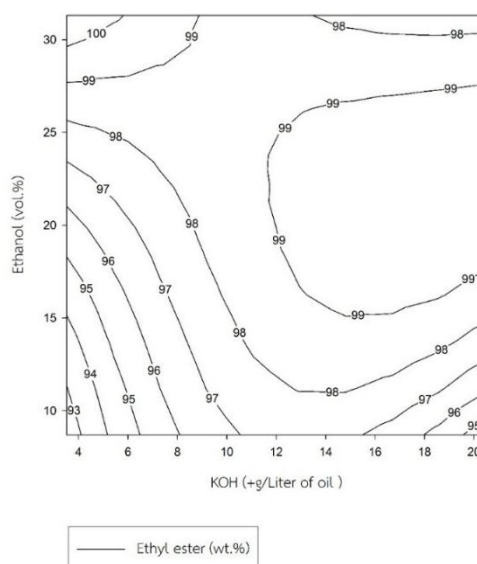
$$AV_{80min} = \beta_0 + \beta_1 K + \beta_2 E^2 + \beta_3 K^2 + \beta_4 E^2 K + \beta_5 EK^2 \quad (\text{จ.26})$$

ตาราง จ.46 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.26

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|-------------|
| β_0 | 86.94 | 0.000000001 |
| β_1 | 1.579 | 0.000759 |
| β_2 | 0.01599 | 0.00123 |
| β_3 | -0.08067 | 0.00208 |
| β_4 | -0.00215 | 0.00220 |
| β_5 | 0.00303 | 0.00413 |
| R^2 | 0.922 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.857 | - |
| R^2 for Prediction | 0.360 | - |

ตาราง จ.47 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.26

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|-------|---------|---------|---------------------|-----|
| Regression | 22.02 | 4.403 | 14.14 | 0.00287 | 5 |
| Residual | 1.868 | 0.311 | - | - | 6 |
| LOF Error | 1.766 | 0.589 | 17.3150 | 0.02130 | 3 |
| Pure Error | 0.102 | 0.03400 | - | - | 3 |
| Total | 23.88 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.23 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 80 นาที

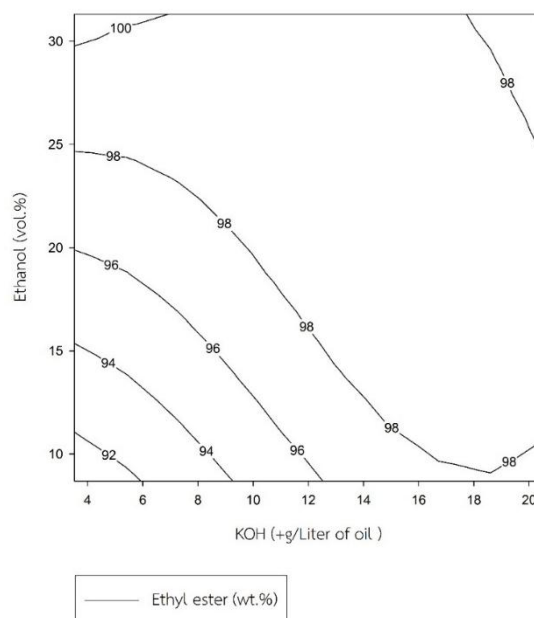
$$AV_{90min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 K^2 + \beta_3 E^2 K + \beta_4 K^3 \quad (\text{จ.27})$$

ตาราง จ.48 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.27

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|-----------|--------------|
| β_0 | 85.61 | 0.0000000006 |
| β_1 | 0.534 | 0.000894 |
| β_2 | 0.07432 | 0.00148 |
| β_3 | -0.000741 | 0.00552 |
| β_4 | -0.00265 | 0.00355 |
| R^2 | 0.894 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.833 | - |
| R^2 for Prediction | 0.491 | - |

ตาราง จ.49 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.27

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|---------|---------|---------|---------------------|-----|
| Regression | 38.37 | 9.594 | 14.71 | 0.00162 | 4 |
| Residual | 4.565 | 0.652 | - | - | 7 |
| LOF Error | 4.501 | 1.125 | 51.9925 | 0.00420 | 4 |
| Pure Error | 0.06492 | 0.02164 | - | - | 3 |
| Total | 42.94 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.24 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที

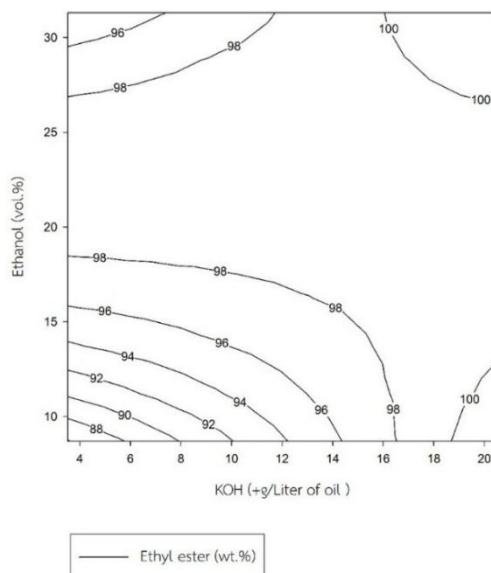
$$AV_{100min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 K + \beta_3 E^2 + \beta_4 EK + \beta_5 E^2 K \quad (\text{จ.28})$$

ตาราง จ.50 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.28

| Coefficient | Value | p-Value |
|-------------------------|----------|----------|
| β_0 | 55.15 | 0.000324 |
| β_1 | 3.918 | 0.00247 |
| β_2 | 2.571 | 0.00528 |
| β_3 | -0.08696 | 0.00419 |
| β_4 | -0.236 | 0.00965 |
| β_5 | 0.00537 | 0.01374 |
| R^2 | 0.927 | - |
| R^2_{adjusted} | 0.866 | - |
| R^2 for Prediction | 0.317 | - |

ตาราง จ.51 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.28

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|---------|---------|----------|---------------------|-----|
| Regression | 54.45 | 10.89 | 15.17 | 0.00237 | 5 |
| Residual | 4.306 | 0.718 | - | - | 6 |
| LOF Error | 4.264 | 1.421 | 101.2188 | 0.00164 | 3 |
| Pure Error | 0.04212 | 0.01404 | - | - | 3 |
| Total | 58.75 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.25 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการ
ทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน
ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 100 นาที

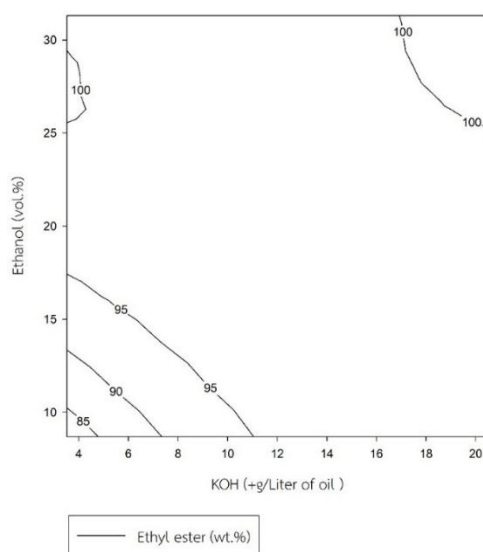
$$AV_{110min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 K + \beta_3 E^2 + \beta_4 EK + \beta_5 K^2 + \beta_6 E^2 K + \beta_7 EK^2 \quad (จ.29)$$

ตาราง จ.52 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.29

| Coefficient | Value | p-Value |
|----------------------|----------|---------|
| β_0 | 43.90 | 0.01501 |
| β_1 | 3.875 | 0.01561 |
| β_2 | 5.569 | 0.01549 |
| β_3 | -0.06428 | 0.04617 |
| β_4 | -0.326 | 0.02496 |
| β_5 | -0.144 | 0.04313 |
| β_6 | 0.00377 | 0.106 |
| β_7 | 0.00613 | 0.06372 |
| R^2 | 0.936 | - |
| $R^2_{adjusted}$ | 0.823 | - |
| R^2 for Prediction | -3.060 | - |

ตาราง จ.53 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.29

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|---------|---------|----------|--------------|-----|
| Regression | 56.16 | 8.023 | 8.332 | 0.02909 | 7 |
| Residual | 3.852 | 0.963 | - | - | 4 |
| LOF Error | 3.806 | 3.806 | 246.9111 | 0.000560 | 1 |
| Pure Error | 0.04624 | 0.01541 | - | - | 3 |
| Total | 60.01 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.26 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาดังเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 110 นาที

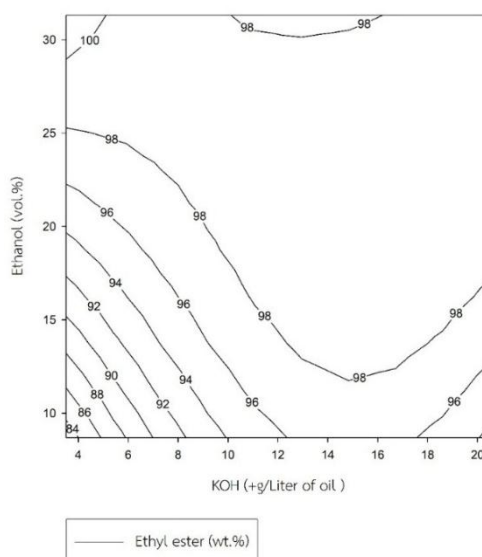
$$AV_{120min} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 K + \beta_3 E^2 + \beta_4 EK + \beta_5 K^2 + \beta_6 EK^2 \quad (จ.30)$$

ตาราง จ.54 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการที่ จ.30

| Coefficient | Value | p-Value |
|----------------------|----------|-----------|
| β_0 | 56.26 | 0.0000322 |
| β_1 | 2.097 | 0.000252 |
| β_2 | 4.748 | 0.000855 |
| β_3 | -0.01836 | 0.00281 |
| β_4 | -0.182 | 0.00252 |
| β_5 | -0.160 | 0.00207 |
| β_6 | 0.00628 | 0.00534 |
| R^2 | 0.980 | - |
| $R^2_{adjusted}$ | 0.956 | - |
| R^2 for Prediction | 0.648 | - |

ตาราง จ.55 แสดงค่า ANOVA สำหรับรูปแบบพื้นผิวการตอบสนองจากสมการที่ จ.30

| Source | SS | MS | F_0 | F_{signif} | DOF |
|------------|-------|---------|---------|--------------|-----|
| Regression | 71.96 | 11.99 | 40.44 | 0.000443 | 6 |
| Residual | 1.483 | 0.297 | - | - | 5 |
| LOF Error | 1.347 | 0.674 | 14.9327 | 0.02758 | 2 |
| Pure Error | 0.135 | 0.04511 | - | - | 3 |
| Total | 73.44 | - | - | - | 11 |



รูปที่ จ.27 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาด้วยเอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างกัน
ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที

ภาคผนวก ฉ
(รายงานผลการทดสอบตัวอย่างจากผลการทดลอง)



ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 ผู้ ปณ. 2 คอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112 เว็บไซต์ chem.eng.psu.ac.th
 โทรศัพท์ 074-287055-6 โทรสาร 074-558833 อีเมลล์ kunyanunt.c@psu.ac.th



รายงานผลการทดสอบ

ใบขอรับบริการเลขที่ 25/2557

บันทึกงานเลขที่ Pe15/2557

วันที่รับตัวอย่าง 26 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2557
 ชื่อผู้ขอรับบริการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 ที่อยู่ -
 ชื่อ/ชนิดของตัวอย่าง น้ำมันไบโอดีเซล

รายงานผลการทดลอง

| ชื่อตัวอย่าง | รายการทดสอบ | วิธีการทดสอบ | ค่ามาตรฐาน | ผลการทดสอบ |
|---|---------------------------|--------------|------------|------------|
| 1. ของเสีย (น้ำมันปาล์มดิบเกรด E95 % 84.3, S40) | ความหนืด (Viscosity) 75°C | ASTM-D445 | - | 6.66 cSt |
| 2. น้ำมันปาล์มดิบ | ความหนืด (Viscosity) 75°C | ASTM-D445 | - | 13.72 cSt |

.....
 (นายธนากร เกียรติขวัญบุตร)
 นักวิทยาศาสตร์ผู้ทดสอบ
 06 / 03 / 2557

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินินาฏ จงคง)
 รองหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมีฝ่ายบริการวิชาการและประกันคุณภาพ
 10 / 03 / 2557

ลงวันที่ทำการทดสอบเสร็จ 06/03/57

หมายเหตุ - รายงานนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์/ทดสอบเท่านั้น
 - ห้ามคัดถ่ายรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

โทรศัพท์ 07428 6904-7 โทรสาร 07421 2813

F-RES-003 ฉบับที่ 7 บังคับใช้ 10/09/55

เลขที่ 2577/57 หน้า 1/1

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: นางสาวนฤมล อินทร์คนี่
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เลขที่ใบขอใช้บริการฯ: 3414/57

วันที่รับตัวอย่าง: 21 สิงหาคม 2557

วันที่ขอใช้บริการฯ: 21 สิงหาคม 2557

ผู้ทดสอบ: นางพิมพ์พิมล พุทธิภัทรานนท์

วันที่ทำการทดสอบ: 22 สิงหาคม 2557

วิธีการทดสอบ: อ้างอิง WI-RES-GC-001

เครื่องมือทดสอบ: Gas Chromatograph, 6850, Agilent Technologies, USA

เทคนิคการทดสอบ: Gas Chromatography with Flame Ionization Detector

สภาวะการทดสอบ: Gas Chromatograph

Inlet temperature : 150 °C, Split ratio 50:1

Oven temperature : Initial temperature 50°C hold 9.0 min

Column : HP-INNOWAX, 30 m × 0.32 mm ID. × film thickness 0.25 μm

Detector temperature : 150°C

Air flow : 300.0 ml/min

Make up flow : 25.0 ml/min

Hydrogen flow : 30.0 ml/min

รายละเอียดตัวอย่าง: น้ำมัน จำนวน: 1 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

| ลำดับที่ | ตัวอย่าง | ความเข้มข้น Ethanol, % (wt.) ± SD |
|----------|---------------|-----------------------------------|
| 1 | น้ำมันลดครด 1 | 1.59 ± 0.03 |

อ้างอิงข้อมูลดิบที่ไฟล์เตอร์ 3414-57, SD : standard deviation

(นางรุสณี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

๒ กันยายน 2557

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

โทรศัพท์ 07428 6904-7 โทรสาร 07421 2813

F-RES-003 ฉบับที่ 7 บังคับใช้ 10/09/55

เลขที่ 2631/57 หน้า 1/1

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: นางสาวนฤมล อินทร์ตัน
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เลขที่ใบขอใช้บริการฯ: 3470/57

วันที่รับตัวอย่าง: 26 สิงหาคม 2557

วันที่ขอใช้บริการฯ: 26 สิงหาคม 2557

ผู้ทดสอบ: นางพิมพ์พิมล พฤกษ์ภัทรานันต์

วันที่ทำการทดสอบ: 5-6 กันยายน 2557

วิธีการทดสอบ: อังอิง WI-RES-GC-001

เครื่องมือทดสอบ: Gas Chromatograph, 6850, Agilent Technologies, USA

เทคนิคการทดสอบ: Gas Chromatography with Flame Ionization Detector

สภาวะการทดสอบ: Gas Chromatograph

Inlet temperature : 150 °C, Split ratio 50:1

Oven temperature : Initial temperature 50°C hold 9.0 min

Column : HP-INNOWAX, 30 m × 0.32 mm ID. × film thickness 0.25 µm

Detector temperature : 150°C

Air flow : 300.0 ml/min

Make up flow : 25.0 ml/min

Hydrogen flow : 30.0 ml/min

รายละเอียดตัวอย่าง: น้ำมัน จำนวน: 1 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

| ลำดับที่ | ตัวอย่าง | ความเข้มข้น Ethanol, % (wt.) ± SD |
|----------|---------------|-----------------------------------|
| 1 | น้ำมันลดกรด 2 | 2.24 ± 0.01 |

อ้างอิงข้อมูลดิบที่โฟลเดอร์ 3470-57, SD : standard deviation

(นางรุสนี กุลจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

๑ กันยายน 2557

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพื่อขงบางส่วน
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ อ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 9 บังคับใช้ 05/06/58

รายงานผลการทดสอบ

| | | | |
|-----------------------|--|---------------------------------|-----------------|
| เลขที่รายงาน: | 1367/58 | หน้า: | 1/1 |
| เลขที่ใบขอใช้บริการ: | 2100/58 | วันที่รับตัวอย่าง: | 22 พฤษภาคม 2558 |
| ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: | น.ส.นฤมล อินทร์คน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | | |
| ผู้ทดสอบ: | นางสาวสุจรยา จิตรหลัง | | |
| วันที่ทำการทดสอบ: | 5 - 8 พฤษภาคม 2558 | | |
| วิธีการทดสอบ: | อ้างอิง WI-RES-GC-001 | | |
| เครื่องมือทดสอบ: | Gas Chromatograph, HP 6850, Hewlett Packard (GC6850) | | |
| เทคนิคการทดสอบ: | Gas Chromatograph – Flam Ionization Detector (GC-FID) | | |
| สภาวะการทดสอบ: | Gas Chromatograph | Flam Ionization Detector | |
| Inlet temperature: | 150°C, at split ratio 50:1 | Detector temperature: | 150°C |
| Carrier gas flow: | Helium at 1.0 mL/min | H ₂ Flow rate: | 30 mL/min |
| Oven temperature: | Initial temperature 50°C, hold 9 min, | Air Flow rate: | 300 mL/min |
| Post temperature | 150°C, hold 0.50 min | Make up gas flow rate: | 25 mL/min |
| Column type: | Innowax (length 30 m., 0.32 mm I.D, film thickness 0.2 µm) | | |
| รายละเอียดตัวอย่าง: | น้ำมัน | จำนวน: | 2 ตัวอย่าง |

ผลการทดสอบ:

| ลำดับที่ | ชื่อตัวอย่าง | หน่วย | ปริมาณเอทานอล (Ethanol) ±SD | LOQ |
|----------|------------------------|-------|-----------------------------|------|
| 1 | Waste (batch) | % w/w | 9.52±0.13 | 0.01 |
| 2 | Esterified oil (batch) | % w/w | 2.63±0.02 | 0.01 |

LOQ: Limit of quantitative, SD: Standard deviation, อ้างอิงข้อมูลลิบรารีโฟลด์เดอร์ 2100-58

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

๗ มิถุนายน 2558

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 ตู้ ปณ. 2 คอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112 เว็บไซต์ chem.eng.psu.ac.th
 โทรศัพท์ 074-287055-6 โทรสาร 074-558833 อีเมล kumyanunt.c@psu.ac.th



รายงานผลการทดสอบ


ใบขอรับบริการเลขที่ 27/2558
 บันทึกงานเลขที่ Pe9/2558


วันที่รับตัวอย่าง 22 พฤษภาคม พ.ศ.2558
 ชื่อผู้ขอรับบริการ นางสาวนฤมล อินทร์ตัน
 ที่อยู่ 71/1 ม.5 ต.ครน อ.สวี จ.ชุมพร
 ชื่อ/ชนิดของตัวอย่าง Esterified Oil

รายงานผลการทดลอง

| ชื่อตัวอย่าง | รายการทดสอบ | วิธีการทดสอบ | ค่ามาตรฐาน | ผลการทดสอบ |
|-------------------|---------------------------|--------------|------------|------------|
| 1. Esterified Oil | ความหนืด (Viscosity) 75°C | ASTM-D445 | - | 6.29 cSt |

หมายเหตุ: ค่ามาตรฐานความหนืดตามกรมธุรกิจพลังงานของน้ำมันไบโอดีเซลที่ 40°C คือ 3.5 - 5 cSt


 (นายธนากร เกียรติขวัญบุตร)
 นักวิทยาศาสตร์ผู้ทดสอบ
 03 / 06 / 58


 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินินาญ จงคง)
 รองหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมีฝ่ายบริการวิชาการและประกันคุณภาพ
 04 / 06 / 58

ลงวันที่ทำการทดสอบเสร็จ 03/06/58

หมายเหตุ - รายงานนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์ทดสอบเท่านั้น
 - ห้ามคัดถ่ายรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยังยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 8 บังคับใช้ 01/12/57

รายงานผลการทดสอบ

| | | | |
|-----------------------|---|--------------------|-----------------|
| เลขที่รายงาน: | 1239/58 | หน้า: | 1/1 |
| เลขที่ใบขอใช้บริการ: | 2026/58 | วันที่รับตัวอย่าง: | 19 พฤษภาคม 2558 |
| ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: | นางสาวณมล อินทร์ดี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | | |
| ผู้ทดสอบ: | นางสาวสุพรรณิ มณีโชติ | | |
| วันที่ทำการทดสอบ: | 20 พฤษภาคม 2558 | | |
| วิธีการทดสอบ: | In house method refer to WI-RES-NMR-001 | | |
| เครื่องมือทดสอบ: | Fourier Transform NMR Spectrometer 500 MHz, Unity Inova, Varian, Germany | | |
| เทคนิคการทดสอบ: | ¹ H observed experiment | | |
| สภาวะการทดสอบ: | ชนิดของ probe: ID | | |
| รายละเอียดตัวอย่าง: | น้ำมัน, ตัวละลาย CDCl ₃ | จำนวน: | 1 ตัวอย่าง |

ผลการทดสอบ:

| ลำดับที่ | ชื่อตัวอย่าง | %EE |
|----------|----------------------|-------|
| 1. | Esterified Oil 20 mg | 66.45 |

แสดงดังสเปกตรัมที่แนบและอ้างอิงโคเรกทอรี: 2026_58narumon

เนื่องจาก ¹H NMR สเปกตรัมที่ค่า chemical shift ประมาณ 4.2 ppm ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่ -OCH₃ และที่ค่า chemical shift ประมาณ 2.3 ppm ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่ alpha-CH₂ มีสัญญาณโปรตอนอื่นรบกวน ทำให้การ integrate หาค่า %EE คลาดเคลื่อนกว่าความเป็นจริง

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

25 พฤษภาคม 2558

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาหรือบางส่วน
ออกนอกรั้วฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ อ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 8 บังคับใช้ 01/12/57

รายงานผลการทดสอบ

| | | | |
|-----------------------|--|--------------------|-----------------|
| เลขที่รายงาน: | 1293/58 | หน้า: | 1/1 |
| เลขที่ใบขอใช้บริการ: | 2179/58 | วันที่รับตัวอย่าง: | 28 พฤษภาคม 2558 |
| ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: | น.ส.นฤมล อินทร์ณี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | | |
| ผู้ทดสอบ: | นางสาวศิริวรรณ พงศ์พุกษาพัฒนา | | |
| วันที่ทำการทดสอบ: | 28 พฤษภาคม 2558 | | |
| วิธีการทดสอบ: | In house method refer to WI-RES-NMR-001 and REF-RES-NMR-024 | | |
| เครื่องมือทดสอบ: | Fourier Transform NMR Spectrometer 500 MHz, Unity Inova, Varian, Germany | | |
| เทคนิคการทดสอบ: | ¹ H observed experiment | | |
| สภาวะการทดสอบ: | ชนิดของ probe: 1D | | |
| รายละเอียดตัวอย่าง: | น้ำมัน | จำนวน: | 1 ตัวอย่าง |

ผลการทดสอบ:

| ลำดับที่ | ชื่อตัวอย่าง | %Ethyl ester |
|----------|-----------------------|--------------|
| 1 | Esterified oil @60min | 45.05 |

แสดงดังสเปกตรัมที่แนบและอ้างอิงโคเรกทอรี: 2179_58narumon

จากสเปกตรัม ที่ค่า chemical shift ประมาณ 4.2 ppm เป็นตำแหน่งของหมู่ -OCH₂ มีสัญญาณโปรตอนอื่นรบกวน ทำให้การ integrate หาค่า % Ethyl ester คลาดเคลื่อนกว่าความเป็นจริง

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

29 พฤษภาคม 2558

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 8 บังคับใช้ 01/12/57

รายงานผลการทดสอบ

| | | | |
|-----------------------|---|--------------------|-----------------|
| เลขที่รายงาน: | 1306/58 | หน้า: | 1/1 |
| เลขที่ใบขอใช้บริการ: | 2194/58 | วันที่รับตัวอย่าง: | 29 พฤษภาคม 2558 |
| ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: | นางสาวณมล อินทร์น้ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | | |
| ผู้ทดสอบ: | นางสาวสุพรรณิ มณีโชติ | | |
| วันที่ทำการทดสอบ: | 29 พฤษภาคม 2558 | | |
| วิธีการทดสอบ: | In house method refer to WI-RES-NMR-001 | | |
| เครื่องมือทดสอบ: | Fourier Transform NMR Spectrometer 500 MHz, Unity Inova, Varian, Germany | | |
| เทคนิคการทดสอบ: | ¹ H observed experiment | | |
| สภาวะการทดสอบ: | ชนิดของ probe: ID | | |
| รายละเอียดตัวอย่าง: | น้ำมัน, ตัวละลาย CDCl ₃ | จำนวน: | 1 ตัวอย่าง |

ผลการทดสอบ:

| ลำดับที่ | ชื่อตัวอย่าง | %EE |
|----------|------------------------|-------|
| 1. | Esterified oil @120min | 70.67 |

แสดงคังสเปกตรัมที่แนบและอ้างอิงโคเรกทอรี: 2194_58narumon

เนื่องจาก ¹H NMR สเปกตรัมที่ค่า chemical shift ประมาณ 4.2 ppm ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่ -OCH₂ และที่ค่า chemical shift ประมาณ 2.3 ppm ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่ alpha-CH₂ มีสัญญาณโปรตอนอินทรีย์รวมกัน ทำให้การ integrate หาค่า %EE คลาดเคลื่อนกว่าความเป็นจริง

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

3 มิถุนายน 2558

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาหรือบางส่วน
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ อ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ที่ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 9 บังคับใช้ 05/06/58

รายงานผลการทดสอบ

| | | | |
|-----------------------|--|---------------------------------|------------------|
| เลขที่รายงาน: | 1604/58 | หน้า: | 1/1 |
| เลขที่ใบขอใช้บริการ: | 2586/58 | วันที่รับตัวอย่าง: | 30 มิถุนายน 2558 |
| ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: | น.ส.นฤมล อินทร์ดี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | | |
| ผู้ทดสอบ: | นางสาวสุจรยา จิตรหลัง และ นายวรุฒย์ คงกำเนิด | | |
| วันที่ทำการทดสอบ: | 6 มิถุนายน 2558 | | |
| วิธีการทดสอบ: | อ้างอิง WI-RES-GC7890-001 และ REF-RES-BSEN EN 14103:2003-001 | | |
| เครื่องมือทดสอบ: | Gas Chromatograph, Agilent, รุ่น 7890A (GC-Agro) | | |
| เทคนิคการทดสอบ: | Gas Chromatograph – Flam Ionization Detector (GC-FID) | | |
| สภาวะการทดสอบ: | Gas Chromatograph | Flam Ionization Detector | |
| Inlet temperature: | 290°C, at split ratio 50:1 | Detector temperature: | 300°C |
| Carrier gas flow: | Helium at 1.0 mL/min | H ₂ Flow rate: | 30 mL/min |
| Oven temperature: | Initial temperature 210°C, hold 12 min, Ramp to 250°C, at 20°C/min, hold 8 min | Air Flow rate: | 300 mL/min |
| Column type: | Select for FAME (length 30 m., 0.32 mm I.D.) | Make up gas flow rate: | 25 mL/min |
| รายละเอียดตัวอย่าง: | น้ำมัน | จำนวน: | 1 ตัวอย่าง |

ผลการทดสอบ:

| ลำดับที่ | ชื่อตัวอย่าง | %Content ± SD | | | |
|----------|---------------------|---------------|------------|------------|-------------------|
| | | %Ester | %FAME | %FAEE | Linolenic acid EE |
| 1 | Esterified oil 3 hr | 85.06±0.09 | 1.345±0.02 | 83.72±0.07 | 0.30±0.00 |

SD: Standard deviation, อ้างอิงข้อมูลดิบชื่อไฟล์เตอร์ 2586-58

(นางรุสนี ฤทธิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

13 กรกฎาคม 2558

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำซ้ำนอกห้องปฏิบัติการ
ยกเว้นทำซ้ำฉบับ โดไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 9 นังคับใช้ 05/06/58

รายงานผลการทดสอบ

| | | | |
|-----------------------|---|--------------------|------------------|
| เลขที่รายงาน: | 1495/58 | หน้า: | 1/1 |
| เลขที่ใบขอใช้บริการ: | 2482/58 | วันที่รับตัวอย่าง: | 22 มิถุนายน 2558 |
| ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: | นางสาวณมล อินทร์น้ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | | |
| ผู้ทดสอบ: | นางสาวสุพรรณิณี มณีโชติ | | |
| วันที่ทำการทดสอบ: | 24 มิถุนายน 2558 | | |
| วิธีการทดสอบ: | In house method refer to WI-RES-NMR-001 | | |
| เครื่องมือทดสอบ: | Fourier Transform NMR Spectrometer 500 MHz, Unity Inova, Varian, Germany | | |
| เทคนิคการทดสอบ: | ¹ H observed experiment | | |
| สภาวะการทดสอบ: | ชนิดของ probe: ID | | |
| รายละเอียดตัวอย่าง: | น้ำมัน, ตัวละลาย CDCl ₃ | จำนวน: | 4 ตัวอย่าง |

ผลการทดสอบ:

| No. | Sample name | integration value of -OCH2 | integration value of alpha-CH2 | เปอร์เซ็นต์เอทิลเอสเตอร์ |
|-----|-------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 1 | Esterified oil 3 | 2 | 2.34 | 85.47 |
| 2 | Esterified oil 6 | 2 | 2.19 | 91.32 |
| 3 | Esterified oil 9 | 2 | 2.16 | 92.59 |
| 4 | Esterified oil 12 | 2 | 2.14 | 93.46 |

แสดงดังสเปกตรัมที่แนบและอ้างถึงโคเรกทอรี: 2482_58narumon

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

25 มิถุนายน 2558

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่มีมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำซ้ำบนชื่อของบางส่วน
สำหรับทำหังฉบับ โดสไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 ตู้ ปณ. 2 คอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112 เว็บไซต์ chem.eng.psu.ac.th
 โทรศัพท์ 074-287055-6 โทรสาร 074-558833 อีเมลส์ kunyanunt.c@psu.ac.th



รายงานผลการทดสอบ


ใบขอรับบริการเลขที่ 3/2559
 บันทึกงานเลขที่ Pe2/2559


วันที่รับตัวอย่าง 26 ตุลาคม พ.ศ.2558
 ชื่อผู้ขอรับบริการ นางสาวณมล อินทร์ณี
 ที่อยู่ 77/1 ม.5 ต.ครน อ.สวี จ.ชุมพร
 ชื่อ/ชนิดของตัวอย่าง น้ำมันผ่านกระบวนการทรานเอสเตอริฟิเคชัน

รายงานผลการทดลอง

| ชื่อตัวอย่าง | รายการทดสอบ | วิธีการทดสอบ | ค่ามาตรฐาน | ผลการทดสอบ |
|-----------------|---|--------------|------------|------------|
| 1. Ester 50 min | ความหนืดที่ 40°C (Viscosity at 40°C) | ASTM-D445 | - | 4.89 cSt |

หมายเหตุ: กรมธุรกิจพลังงานกำหนดมาตรฐานความหนืดไบโอดีเซลที่ 40°C คือ 3.5-5 cSt


 (นายธนกร เกียรติขวัญบุตร)
 นักวิทยาศาสตร์ผู้ทดสอบ
 9 / 11 / 2558


 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินินาฏ จงคง)
 รองหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมีฝ่ายบริการวิชาการและประกันคุณภาพ
 4 / 11 / 58

ลงวันที่ทำการทดสอบเสร็จ 2/11/58

หมายเหตุ - รายงานนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์/ทดสอบเท่านั้น
 - ห้ามคัดถ่ายรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ อ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 9 มังคัมไซ้ 05/06/58

รายงานผลการทดสอบ

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|--------------------|----------------|--------------|-------------------------------|----------------|-------|-------------|-------|----------------|-----------|-------------------|--|----------------|------------|---------|---|--------------|-----------|
| เลขที่รายงาน: | 2516/58 | หน้า: | 1/1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เลขที่ใบขอใช้บริการ: | 4100/58 | วันที่รับตัวอย่าง: | 26 ตุลาคม 2558 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: | นางสาวณฤมล อินทรรัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ผู้ทดสอบ: | นางพิมพ์พิมพ์ พุกภัยภัทรานันต์ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| วันที่ทำการทดสอบ: | 3 พฤศจิกายน 2558 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| วิธีการทดสอบ: | อ้างอิง WI-RES-GC-001 และ REF-RES-BSEN 14103:2003 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องมือทดสอบ: | Gas Chromatograph, 6890, Agilent, USA | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เทคนิคการทดสอบ: | Gas Chromatography – Flame Ionization Detector (FID) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| สภาวะการทดสอบ: | <table border="0"> <tr> <td>Helium flow:</td> <td>1.0 mL/min @ split ratio 50:1</td> <td>Detector temp:</td> <td>300°C</td> </tr> <tr> <td>Inlet temp:</td> <td>290°C</td> <td>Hydrogen flow:</td> <td>30 mL/min</td> </tr> <tr> <td>Oven temperature:</td> <td>Initial temperature 210°C, hold 12 min, Ramp to 250°C at 20°C/min, hold 8 min</td> <td>Air flow flow:</td> <td>300 mL/min</td> </tr> <tr> <td>Column:</td> <td>Select Biodiesel for FAME length 30 m., 0.25 mm I.D, film thickness 0.25 µm</td> <td>Makeup flow:</td> <td>25 mL/min</td> </tr> </table> | | | Helium flow: | 1.0 mL/min @ split ratio 50:1 | Detector temp: | 300°C | Inlet temp: | 290°C | Hydrogen flow: | 30 mL/min | Oven temperature: | Initial temperature 210°C, hold 12 min, Ramp to 250°C at 20°C/min, hold 8 min | Air flow flow: | 300 mL/min | Column: | Select Biodiesel for FAME length 30 m., 0.25 mm I.D, film thickness 0.25 µm | Makeup flow: | 25 mL/min |
| Helium flow: | 1.0 mL/min @ split ratio 50:1 | Detector temp: | 300°C | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Inlet temp: | 290°C | Hydrogen flow: | 30 mL/min | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Oven temperature: | Initial temperature 210°C, hold 12 min, Ramp to 250°C at 20°C/min, hold 8 min | Air flow flow: | 300 mL/min | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Column: | Select Biodiesel for FAME length 30 m., 0.25 mm I.D, film thickness 0.25 µm | Makeup flow: | 25 mL/min | | | | | | | | | | | | | | | | |
| รายละเอียดตัวอย่าง: | น้ำมัน | จำนวน: | 1 ตัวอย่าง | | | | | | | | | | | | | | | | |

ผลการทดสอบ :

| ชื่อตัวอย่าง | % Ester content, (± SD) | % Linolenic acid methyl ester content, (± SD) |
|--------------|-------------------------|---|
| Ester 50 min | 97.21 ± 0.11 | ไม่พบ |
| เกณฑ์มาตรฐาน | ไม่ต่ำกว่า 96.5 % | ไม่สูงกว่า 12 % |

SD = Standard deviation, อ้างอิงข้อมูลฉบับที่ไฟล์เตอร์ 4100-58

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์

๑ พฤศจิกายน 2558

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาหรือบางส่วน
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 ตู้ ปณ. 2 คอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112 เว็บไซต์ chem.eng.psu.ac.th
 โทรศัพท์ 074-287055-6 โทรสาร 074-558833 อีเมล kumant.c@psu.ac.th



รายงานผลการทดสอบ

ใบขอรับบริการเลขที่ 7/2559


บันทึกงานเลขที่ Pe3/2559


วันที่รับตัวอย่าง 12 พฤศจิกายน พ.ศ.2558
 ชื่อผู้ขอรับบริการ นางสาวณมล อินทร์น
 ที่อยู่ 77/1 ม.5 ต.ครน อ.สวี จ.ชุมพร
 ชื่อ/ชนิดของตัวอย่าง โปไอดีเซล

รายงานผลการทดลอง

| ชื่อตัวอย่าง | รายการทดสอบ | วิธีการทดสอบ | ค่ามาตรฐาน | ผลการทดสอบ |
|----------------|---|--------------|------------|------------|
| 1. Ethyl Ester | จุดวาบไฟ (Flash Point) | ASTM-D93 | > 120 °C | 166°C |
| | การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Corrosion) | ASTM-130 | ≤No.1 | No.1a |

หมายเหตุ :-


 (นายธนกร เกียรติขวัญบุตร)
 นักวิทยาศาสตร์ผู้ทดสอบ
 ๒๐ / 11 / ๒๕๕๘


 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินินาฏ จงคง)
 รองหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมีฝ่ายบริการวิชาการและประกันคุณภาพ
 ๒๐ / 11 / ๕๘

ลงวันที่ทำการทดสอบเสร็จ 20/11/58

หมายเหตุ - รายงานนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์ทดสอบเท่านั้น
 - ห้ามคัดถ่ายรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ อ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-033 ฉบับที่ 2 บังคับใช้ 05/06/58

รายงานผลการทดสอบ

| | |
|---|--------------------------------------|
| เลขที่รายงาน: C 1150/58 | หน้า: 1/1 |
| เลขที่ใบขอใช้บริการฯ: 4363/58 และ 4571/58 | วันที่รับตัวอย่าง: 12 พฤศจิกายน 2558 |
| ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: น.ศ.ณฤมล อินทร์คน วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | |
| ชื่อตัวอย่าง: เอทิลเอสเตอร์ | |
| รายละเอียดตัวอย่าง: น้ำมันไบโอดีเซล | |

ผลการทดสอบ:

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ | หน่วย | เครื่องมือ/วิธีการทดสอบ | ผลการทดสอบ \pm SD | เกณฑ์ | สรุป |
|----------|------------------|---------------|-------------------------|----------------------|-------------|---------|
| 1. | ค่าไอโอดีน | g Iodine/100g | EN 14111 | 47.0 \pm 1.0 | \leq 120 | ผ่าน |
| 2. | กำมะถัน | % wt. | XRF | 0.0014 | $<$ 0.0010 | ไม่ผ่าน |
| 3. | โมโนกลีเซอไรด์ | % wt. | EN 14105 | 0.46 \pm 0.007 | \leq 0.80 | ผ่าน |
| 4. | ไดกลีเซอไรด์ | % wt. | EN 14105 | 0.22 \pm 0.0007 | \leq 0.20 | ไม่ผ่าน |
| 5. | ไตรโนกลีเซอไรด์ | % wt. | EN 14105 | 0.09 \pm 0.000 | \leq 0.20 | ผ่าน |
| 6. | กลีเซอรินอิสระ | % wt. | EN 14105 | 0.0032 \pm 0.00003 | \leq 0.02 | ผ่าน |
| 7. | กลีเซอรินทั้งหมด | % wt. | EN 14105 | 0.16 \pm 0.002 | \leq 0.25 | ผ่าน |
| 8. | เอทานอล | % wt. | EN 14110 | $<$ 0.01 | \leq 0.20 | ผ่าน |

- ผลการทดสอบอ้างอิงใบขอใช้บริการ (F-ASO-054) เลขที่ 4363/58 และ (F-ASO-022) เลขที่ 4571/58

- SD = Standard Deviation

- XRF = X-Ray Fluorescence Spectrometer

- ขีดจำกัดของการวัดปริมาณ (LOQ): Ethanol = 0.01% wt.

- อ้างอิงตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน

- รายงานเพิ่มเติมรายงานผลการทดสอบเบรจเลขที่ C1131/58

(นางรุสณี กุลจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

2 ธันวาคม 2558

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาหรือบางส่วน
ออกให้ทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-033 ฉบับที่ 2 บังคับใช้ 05/06/2558

รายงานผลการทดสอบ

| | | | |
|-----------------------|---|--------------------|-------------------|
| เลขที่รายงาน: | C1167/58 | หน้า: | 1/1 |
| เลขที่ใบขอใช้บริการ: | 4487/58 | วันที่รับตัวอย่าง: | 20 พฤศจิกายน 2558 |
| ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: | น.ส.นฤมล อินทร์ศรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | | |
| ชื่อตัวอย่าง: | เอทิลเอสเทอร์ | | |
| รายละเอียดตัวอย่าง: | น้ำมันไบโอดีเซล | | |

ผลการทดสอบ:

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ | หน่วย | เครื่องมือ/วิธีการทดสอบ | ผลการทดสอบ \pm SD | เกณฑ์ | สรุป |
|----------|-------------|-------|-------------------------|---------------------|-------------|------|
| 1. | ค่าซีพีเอ | % wt. | ASTM D 874 | < 0.005 | \leq 0.02 | ผ่าน |

-ผลการทดสอบอ้างอิงใบขอใช้บริการ (F-ASD-054) เลขที่ 4487/58

-SD = Standard Deviation

-อ้างอิงตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเอทิลเอสเทอร์ของกรมฯ

(นางรุตณี กุลกิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

4 ธันวาคม 2558



B041/2558


สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
Specialized Research and Development Center for Alternative Energy from Palm Oil
and Oil Crops, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,
P.O.Box 2 Hat Yai, Songkhla 90110 Tel.: 0-7428-7185 Fax: 0-7428-7185
www.biodiesel.eng.psu.ac.th

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า : ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
วันที่รับตัวอย่าง : 23/11/2558 วันที่ทำการทดสอบ : 24/11/2558
รายการทดสอบ ปริมาณน้ำและตะกอน (Water and sediment)
วิธีการทดสอบ : อ้างอิง ASTM D 2709-96
เครื่องมือทดสอบ : Centrifuge (Koehler Benchmark 2000)
สภาวะการทดสอบ : Relative centrifuge force (rcf) 800 ± 60
รายละเอียดตัวอย่าง : ไบโอดีเซล จำนวน 1 ตัวอย่าง
ผลการทดสอบ :

| ตัวอย่าง | รายละเอียด | Volumetric percent sediment (%v/v) |
|----------|------------------------|---------------------------------------|
| 1 | Ester 50 min (4363/58) | น้อยกว่า 0.05 |


.....
(นายสมหมาย โอชาพันธุ์)
ผู้ทดสอบ


.....
(นายทรงธรรม โพธิ์ถาวร)
ผู้ตรวจสอบ

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนา
เพื่อบางส่วน ยกเว้นห้าถึงฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจาก
น้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน

หน้า 1 จาก 1

ภาคผนวก ช
(เอกสารการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ)

Acid value reduction process in mixed crude palm oil by using low-grade ethanol

Naruemon Intarat^{1, a}, Krit Somnuk¹, Thanansak Theppaya¹ and Gumpon Prateepchaikul¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand, 90112

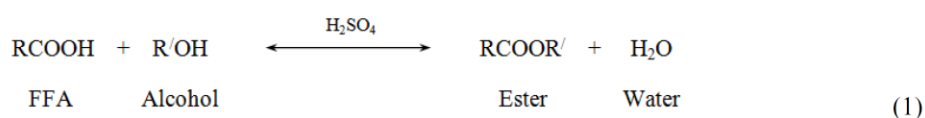
^akniisnd@gmail.com : Correspondong Author

Keywords: ethanol; esterification; six-blade disk turbine; free fatty acid; mixed crude palm oil.

Abstract. In Thailand, the ethanol production was produced from factory fermentation of many food crops such as sugar cane, molasses, and cassava. Thus, this alcohol is not required to be imported from abroad. Moreover, the advantages of ethanol over methanol are less toxic, and the fatty acid ethyl ester (FAEE) has higher heat content, cetane number and lower cloud point, pour point than the fatty acid methyl esters (FAME). In this study, the 95% commercial ethanol (as a low-grade ethanol) was used to reduce the acid value in the mixed crude palm oil (MCPO). The Response surface methodology (RSM), a 5-level 2-factor central composite design (CCD), was employed to optimize the ethanol, and sulfuric acid. The results showed that the 95% ethanol can reduce the acid value from 34.5 mgKOH/g to less than 2 mgKOH/g. Therefore, the esterified oil can be used to produce biodiesel by base-catalyzed transesterification when the optimal condition: 81.3 vol.% ethanol, 10 vol.% sulfuric acid, and 75°C reaction temperature are used. Moreover, the acid value in MCPO was sharply reduced to less than 7.477 mgKOH/g at 5 min, and to less than 1.621 mgKOH/g after 30 min of reaction time when the model of optimal condition was verified.

Introduction

In Thailand, Crude palm oil (CPO) and mixed crude palm oil (MCPO) were used as a raw material to produce biodiesel. However, the free fatty acid (FFA) content in both CPO and MCPO are a major problem to produce biodiesel. Because the FFA in oils will be reacted with the base to produce soap (saponification process) when the base-catalyzed transesterification is employed [1,2]. Consequently, the FFA should not exceed 1 wt.% or an acid value (AV) less than 2 mgKOH/g when use as the raw material. The FFA can be converted to esters by direct esterification with H₂SO₄ as acid-catalyst. This reaction is shown in Eq. (1). [3]



where R and R' denote any hydrocarbon chains. Mostly, the biodiesel production from high FFA in oils can be produced by a two-stage process. First process is the acid-catalyzed esterification for reducing FFA, followed by a process of base-catalyzed to produce the high yield biodiesel [4,5]. Furthermore, methanol usually uses in both esterification and transesterification reactions. For instance, Somnuk et al. [5] studied the two-stage continuous process of methyl ester from high free fatty acid (FFA) mixed crude palm oil (MCPO) was performed by using static mixer coupled with high-intensity of ultrasound. The results showed that the esterification was employed with the 18 vol.% of methanol, 2.7 vol.% of sulfuric acid, and 20 L.hr⁻¹ of MCPO flow rate at 60°C, for reducing the acid value from 28 mgKOH.g⁻¹ to less than 2 mgKOH.g⁻¹. The 96.52 wt.% ester was

achieved when the transesterification was carried out under the 18 vol.% of methanol, 8 gKOH.L⁻¹ of oil, 30°C of temperature, and 20 L.hr⁻¹ of esterified oil flow rate. Charoenchaitrakool and Thienmethangkoon [6] studied the optimum conditions in biodiesel production from waste frying oil using two-step process. The optimal conditions were determined with the aid of the Box-Behnken design of experiment. In the first step, the conditions were methanol to oil molar ratio of 6:1:1, 0.68 wt.% of H₂SO₄, and 60 min of reaction time at 51°C. For the second step, the 90.56 wt.% methyl ester was achieved with the 1 wt.% KOH, methanol to oil molar ratio of 9.1:1, and reaction time of 60 min at 55°C in the second step. However, the methanol is the poisonous chemical reactant in the biodiesel synthetic processes and this toxic alcohol was extensively used to research and to produce the commercial biodiesel production. Because methanol has several advantage over ethanol to use in the biodiesel process such as higher conversion, faster reaction, and lower cost [7]. However, the non-toxic alcohol is the ethanol (EtOH) which was produced by factory fermentation of food crops. It will be used as alternative alcohol for replacement the methanol. The advantages of ethanol over methanol are less toxic than methanol and can be derived from renewable resources. The advantages of fatty acid ethyl ester (FAEE) on fatty acid methyl esters (FAME) are : higher heat content, higher cetane number, lower cloud point and lower pour point. This is due to the extra carbon contained in ethanol [7].

Currently, few researchers have studied the direct esterification process to produce biodiesel by using ethanol instead of methanol. Farag et al. [8] studied the factors affecting esterification of high percentage of FFA in mixed oil. The conditions used in the study were : 6:1 alcohol to oil molar ratio, 2.5 wt.% H₂SO₄, 300 rpm, 0-180 min reaction time at 60°C. Results showed that using higher molar mass of alcohol results in decreasing of FFA conversion. Therefore, the methanol was used as the best type of alcohol in esterification, however, blending of methanol and ethanol can improve the FFA conversion as well. Pisarello et al. [9] studied the biodiesel production from the refined sunflower oil, coconut oil and concentrated FFA by direct acid-catalyst esterification. All experiment was carried out while stirring with a magnetic stirrer. In preliminary experiment, the 0.2 vol.% H₂SO₄ was carried out to reduce the acidity of oils at 60°C and 70°C reaction temperature when the anhydrous ethanol and methanol, and 96% ethanol were used. They found that the reaction conditions were 18% initial acidity in oil, 15 molar ratio alcohol to FFA, 0.2 vol.% H₂SO₄ at 60°C or 70°C. Clearly, methanol reacts faster than anhydrous ethanol for the esterification reaction at 60°C. When reaction temperature was increased to 70°C, the anhydrous ethanol reacts more rapidly than 96% ethanol. Moreover, the 96% low-grade ethanol cannot reduce the acidity in oil to less than 5 g OA/100g S.

Consequently, the above reviews induce the objective of this work to determine the feasibility of using low-grade ethanol of acid value reduction process in mixed crude palm oil (MCPO). The RSM, a 5-level 2-factor central composite design (CCD), is employed to optimize two parameters (95% ethanol, and sulfuric acid). The main goal is to determine the response surface model and optimal condition of the relationship between the acid value of the esterified oil and two factors.

Materials and methods

Materials. Mixed crude palm oil (MCPO) having acid value of 34.5 mgKOH/g, was used as raw material in the acid-catalyzed esterification process to reduce the acid value in oils. All chemicals used in this experiments, the 99% sulfuric acid (H₂SO₄) and the 95% ethanol (EtOH), are of commercial grade. Analytical grade potassium hydroxides (KOH), isopropyl alcohol (IPA) and phenolphthalein (pH indicator) are used to determine the acid value in the esterified oil. The thin layer chromatograph with flame ionization detection (TLC/FID) (IATROSCAN MK-65; Mitsubishi Kagaku Iatron Inc.; Tokyo, Japan) was used to analyze the conversions of fatty acid ethyl esters (FAEE), triglyceride (TG), diglyceride (DG), monoglyceride (MG), and free fatty acid (FFA) in oils. The physical properties and compositions of MCPO and esterified oil were shown in Table 1.

Table 1. Physical properties and compositions of MCPO and esterified oil.

| Property | MCPO | Esterified oil (at 30 min) |
|-------------------------------|-----------|----------------------------|
| Mean molecular weight (g/mol) | 772.1 [4] | - |
| Density at 75°C (kg/L) | 0.873 | 0.865 |
| Free fatty acid (wt.%) | 15.233 | 0.358 |
| Tri-glyceride (wt.%) | 82.116 | 78.197 |
| Di-glyceride (wt.%) | 2.348 | 9.189 |
| Mono-glyceride (wt.%) | 0.244 | 0.717 |
| Ester (wt.%) | 0.059 | 11.539 |
| Acid value (mgKOH/g) | 34.5 | 1.621 |

Methods. Fig. 1 is the schematic diagram of acid value reduction process using the stirred tank reactor and 6-blade disk turbine (rushton turbine) to mix the oil and chemical reactants. The physical dimensions of stirred tank reactor were 140 mm stirred tank diameter (D_t), 130 mm height of liquid (H), and 11.7 mm width of baffle (J). The dimensions of 6-blade disk turbine were 70 mm stirred blade diameter (D_a), 47 mm stirred disk diameter (D_d), 14 mm width of the stirred blade (W), 17 mm length stirred blade (L), and 45 mm height of the blade from the bottom of tank (C).

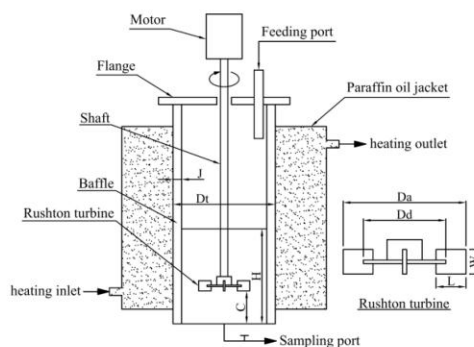


Fig. 1, Schematic diagram of the experiment setup.

Procedures

The MCPO was heated to 75°C to decrease the viscosity of oils. Heating of the oils and chemical reactants in reactor was achieved by circulating hot paraffin oil through the jacket around the reactor for controlling the 75°C of reaction temperature. However, the temperature level must not exceed 78.37°C boiling point of ethanol. Subsequently, the 1000 mL of heated MCPO was slowly poured into the reactor at the feeding port. At the same time, the motor was immediately turned on and the 900 rpm of speed was fixed. Next, the required ethanol was fed into the reactor base on the experimental design matrix. After 5 min of mixing of MCPO with ethanol, the sulfuric acids were very slowly poured into the reactor and suddenly started the timer. Subsequently, the experimental samples were collected at the reaction time of 5, 10, 15, 20, 30 and 40 min. Each sample was quickly cooled with 0°C water to stop reaction, and was washed eliminated the residual ethanol, sulfuric acid, and water by water washing. Acid value can be calculated using Eq. (2) [10], and compositions of the MCPO and the esterified oil were analyzed using the thin layer chromatography/flame ionization detection technique (TLC/FID).

$$\text{Acid value} = \frac{(\text{mL of titrant}) \times (N \text{ of titrant}) \times 56.1}{\text{weight of sample in grams}} \quad (2)$$

Results and Discussions

Experimental results. Five-coded levels of independent variables (ethanol and sulfuric acid) were as -1.414, -1, 0, +1, and +1.414 for varying independent variables, as shown in Table 2. In the experiment design, the twelve tests were employed in analyzing the conditions to reduce the acid value in MCPO. Table 3 shows the matrix of experimental design, and the results of tests.

Table 2, Coding of independent variables

| Independent variable | Coded level | | | | |
|----------------------------------|-------------|----|----|----|--------|
| | -1.414 | -1 | 0 | +1 | +1.414 |
| <i>E</i> : Ethanol (vol.%) | 24.6 | 35 | 60 | 85 | 95.3 |
| <i>S</i> : Sulfuric acid (vol.%) | 7.2 | 8 | 10 | 12 | 12.8 |

Table 3, Experimental design matrix and results at the 30 min of reaction time

| Run | Ethanol, <i>E</i> (vol.%) | Sulfuric acid, <i>S</i> (vol.%) | Acid value, <i>AV</i> (mgKOH/g) |
|-----|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 95.3 | 10.0 | 4.575 |
| 2 | 85.0 | 8.0 | 4.325 |
| 3 | 60.0 | 7.2 | 6.350 |
| 4 | 35.0 | 12.0 | 8.900 |
| 5 | 24.6 | 10.0 | 16.000 |
| 6 | 60.0 | 12.8 | 4.350 |
| 7 | 60.0 | 10.0 | 8.150 |
| 8 | 60.0 | 10.0 | 8.000 |
| 9 | 85.0 | 12.0 | 3.675 |
| 10 | 60.0 | 10.0 | 8.150 |
| 11 | 35.0 | 8.0 | 7.725 |
| 12 | 60.0 | 10.0 | 8.400 |

(900 rpm of stirrer, 75°C of reaction temperature, were fixed in all experiments)

Response surface models of results. Response surface model (RSM) was analyzed from data in Table 4 using a multiple regression model to fit a second-order polynomial equation. It was found that the relationship between the acid value and two independent variables was obtained in the form of a squared and interaction model. The models of the two responses are expressed in Eq. (3) to reduce the acid value in MCPO.

$$AV = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 S + \beta_3 ES + \beta_4 S^2 + \beta_5 SE^2 + \beta_6 ES^2 \quad (3)$$

where *AV* is acid value, *E* is ethanol, *S* is sulfuric acid, and β is coefficient value.

Table 4, Coefficient values of response surface model.

| Coefficient | β_0 | β_1 | β_2 | β_3 | β_4 | β_5 | β_6 |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Value | -43.06 | 0.825 | 10.40 | -0.198 | -0.463 | 0.000195 | 0.00841 |
| <i>p</i> -value | 0.01214 | 0.00620 | 0.00594 | 0.00299 | 0.00947 | 0.0000725 | 0.00594 |

($R^2 = 0.990$, $R^2_{\text{adjusted}} = 0.978$, and $R^2_{\text{prediction}} = 0.746$)

Response surface plot. Fig. 2 shows the relationship between the sulfuric acid and ethanol on the acid value of the esterified oil at the reaction time of 30 min. To investigate the optimum conditions, the excel solver in *Microsoft Excel add-in tool* was used to solve these conditions (Eq.

3) at the reaction times of 30 min. From results of solving, the optimal condition was the 81.3 vol.% ethanol, 10 vol.% sulfuric acid, and 75°C reaction temperature. To verify the predicted model, the acid value was to determine at 0, 5, 10, 15, 20, 30, and 40 min of reaction time with the optimal condition: 81.3 vol.% ethanol, 10 vol.% sulfuric acid, and 75°C reaction temperature. The results showed that acid value was sharply reduced from 34.5 mgKOH/g to less than 7.477 mgKOH/g at 5 min, and to less than 1.621 mgKOH/g after 30 min of reaction time as shown in Fig. 3.

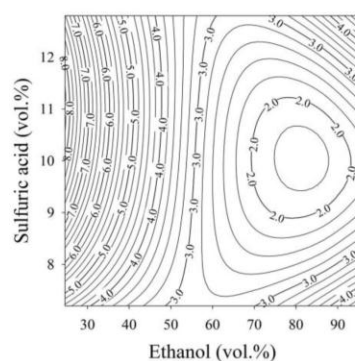


Fig. 2 Contour plot of sulfuric acid and ethanol on the acid value of the esterified oil at the reaction time of 30 min.

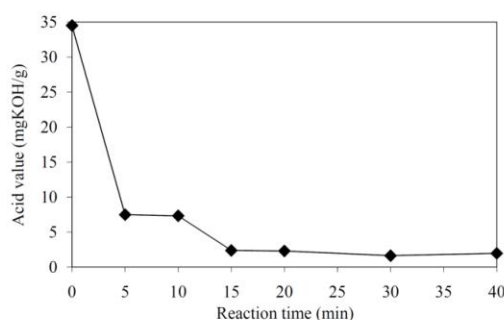


Fig. 3 Acid value in esterified oil with the optimal condition: 81.3 vol.% ethanol, 10 vol.% sulfuric acid, and 75°C reaction temperature.

Conclusions

The results showed that the 95% low-grade of ethanol can be used to reduce the acid value of 34.5 mgKOH/g MCPO to less than 2 mgKOH/g when the optimal condition: 81.3 vol.% ethanol, 10 vol.% sulfuric acid, and 75°C reaction temperature was used. In Thailand, the ethanol production was produced from many food crops such as sugar cane, molasses, and cassava. Therefore, it is renewable and can be produced within the country. Moreover, the advantages of ethanol over methanol is less toxic, and the fatty acid ethyl ester (FAEE) has higher heat content, cetane number and lower cloud point, pour point than the fatty acid methyl esters (FAME).

Acknowledgements

This work was supported by Prince of Songkla University for providing research funds.

References

- [1] Veljkovic' VB, Avramovic' JM and Stamenkovic' OS: *Renew Sustain Energy Rev.*, Vol. 16, (2012), p.1193–209.
- [2] Somnuk, K., Niseng, S. and Prateepchaikul, G. : *Energy Conversion and Management.*, Vol. 80, (2014), p. 374-381.
- [3] Atadashi, Aroua, Aziz and Sulaiman: *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*,Vol. 16, (2012), p. 3275– 3285.
- [4] Somnuk, K., Smithmaitrie, P. and Prateepchaikul, G. : *Energy Conversion and Management.*, Vol. 68,(2013), p. 193-199.
- [5] Somnuk, K., Smithmaitrie, P. and Prateepchaikul, G. : *Energy Conversion and Management.*, Vol. 75, (2013), p. 302-310.
- [6] Charoenchaitrakool M and Thienmethangkoon J. : *Fuel Process Technol.*, Vol. 92, (2011), p. 112–8.
- [7] Li, Xu, Du, Li and Liu : *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, Vol. 25, (2013), p. 742–748.
- [8] Farag, El-Maghraby and Taha: *Fuel Processing Technology.*, Vol. 92, (2011), p. 507–510.
- [9] Pisarello, Costa, Mendow, and Querini: *Fuel Processing Technology.*, Vol. 91, (2010), p. 1005–1014.
- [10] AOCS: *Official test method Cd 3a-63 for acid value*, American Oil Chemists Society Champaign, III, (1998).



การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนชนิดกรดไขมันอิสระสูง ด้วยเอทานอล

Biodiesel Production by Esterification from High Free Fatty Acid Mixed Crude Palm Oil
with Ethanol

ณกุล อินทร์¹, กฤษ สมณี², ฐานันดรศักดิ์ เทพญา³ และกัภาพ ประทีปชัยกุล⁴

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

¹Email : kniisnd@gmail.com, ²Email : kritt.s@psu.ac.th, ³Email : than@me.psu.ac.th, ⁴mail : gumpon.p@psu.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนชนิดกรดไขมันอิสระสูง โดยการทำให้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกับเอทานอลเกรดการค้า โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในท่อผสมแบบสถิตหมุนวนขนาด 100 ลิตร น้ำมันปาล์มดิบ 100 ลิตร ทำปฏิกิริยากับเอทานอล 66 ลิตร และเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยกรดซัลฟิวริก 7 ลิตร โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ในท่อผสมแบบสถิตหมุนวน ด้วยอัตราการไหล 500 ลิตรต่อชั่วโมง ได้เอทิลเอสเทอร์ความบริสุทธิ์สูงสุดร้อยละ 93.46 โดยน้ำหนัก ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง

คำสำคัญ: เอทิลเอสเทอร์, เอสเทอร์ริฟิเคชัน, เอทานอล, ระบบหมุนวนขนาดนำร่อง

Abstract

In this study, the high free fatty acid mixed crude palm oil (MCPO) was used as the raw material for 100 liters pilot-scale of ethyl ester production by using circulation through static mixer. Two reactants: anhydrous ethanol and sulfuric acid were used to produce biodiesel from MCPO by esterification reaction. The condition: 100 liter of MCPO, 66 vol.% of anhydrous ethanol, 7 vol.% of sulfuric acid, 75°C reaction temperature, were investigated to study the ethyl ester conversion. The mixtures (MCPO, ethanol, and sulfuric acid) were circulated by the chemical circulating pump. In the pilot-scale of circulation process, the 500 L/hr flow rate of mixtures were circulated through the 2-bundle tube of static mixer reactors, which consist of 7-tube bundle, 1 m. in length each. The maximum purity of ethyl ester was 93.46% by weight at 12 hour of reaction time.

Keywords: ethyl ester, esterification, ethanol, circulation, pilot-scale

1. บทนำ

ในทศวรรษที่ผ่านมาได้มีความพยายามที่จะพัฒนาเชื้อเพลิงสะอาดในหลายประเทศ ซึ่งไบโอดีเซลได้รับความสนใจเป็นพลังงานทางเลือกและพลังงานทดแทนเนื่องจากปริมาณการสำรองปิโตรเลียมที่ลดลง การเพิ่มขึ้นของราคาน้ำมันและปัญหาสิ่งแวดล้อม ทำให้การพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้รับความสนใจมากขึ้นเนื่องจาก

ปริมาณทรัพยากรที่จำกัดของพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลและความกังวลด้านสิ่งแวดล้อม มลพิษทางอากาศเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญปัญหาหนึ่งของโลก ไบโอดีเซลเป็นหนึ่งในแหล่งที่มาของพลังงานทดแทนที่สำคัญและใกล้เคียงน้ำมันดีเซล ทำให้ไบโอดีเซลมีบทบาทสำคัญในการผลิตพลังงานที่ยั่งยืนมากขึ้น [1] [2] [3] [4] ประโยชน์หลักของการใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์จะลดการพึ่งพาน้ำมันเชื้อเพลิงจากฟอสซิลและลดมลพิษทางอากาศ ไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากทรัพยากรจากแหล่งชีวภาพทดแทน เช่น น้ำมันพืชไขมันสัตว์และอื่น ๆ โดยทั่วไปไบโอดีเซลมีชื่อดีกว่าน้ำมันดีเซลจากฟอสซิล คือย่อยสลายได้ดีกว่า ไม่มีกำมะถัน มีความเป็นพิษต่ำ จุดวาบไฟสูง และลดการปล่อยไอเสียที่ทำให้เป็นพิษเป็นภัยต่อสิ่งแวดล้อม [5] [6] ปัจจุบันแนวโน้มในการผลิตไบโอดีเซลส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้แอลกอฮอล์จากพลังงานหมุนเวียน ซึ่งการใช้เอทานอลในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลเป็นที่น่าสนใจเพราะเอทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่ผลิตได้จากวัตถุดิบที่สามารถเพาะปลูกขึ้นมาได้ [7] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ น้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน (mixed crude palm oil, MCPO) ซึ่งมีกรดไขมันอิสระร้อยละ 15.233 โดยน้ำหนัก ซึ่งกรดไขมันอิสระเป็นอุปสรรคที่สำคัญสำหรับการผลิตไบโอดีเซลโดยการใช้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

ในการศึกษาที่ใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันทำปฏิกิริยาในการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานนี้คือการศึกษากระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนชนิดกรดไขมันอิสระสูง ด้วยเครื่องผลิตไบโอดีเซลท่อผสมสถิตแบบหมุนวนขนาด 100 ลิตร เนื่องจากความสามารถในการทำปฏิกิริยาที่เร็วกว่าแบบบวกรวมทั่วไป และเป็นขนาดนำร่องในการศึกษาการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยากรด

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินงาน

2.1 วัสดุ

ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน มีความเป็นกรดเริ่มต้นประมาณ 34.5 mg KOH/g หรือมีปริมาณกรดไขมันอิสระคือ 15.233 wt.% ใช้เอทานอลเกรดเชิงการค้า (99.9 vol.% anhydrous ethanol) และใช้กรดซัลฟิวริก 98% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยากรด

2.2 อุปกรณ์

ใช้ชุดเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วยถังน้ำมันปาล์มดิบ, ถังเอทานอล, ถังกรดซัลฟิวริก, ท่อผสมสถิต ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 10 มิลลิเมตร

ยาว 1 เมตร มีไส้ท่อเป็นแผ่นสแตนเลส กว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร บิดทำมุม 180 องศา และแต่ละชั้นแผ่นสแตนเลสต่อเชื่อมจุดกัน ด้วยมุม 90 องศา ตลอดความยาวท่อ จำนวน 14 ท่อผสม โดยแบ่งเป็น 2 ชุดท่อ ชุดละ 7 ท่อ และมีฉนวนหุ้มท่อผสมแบบสติดแต่ละชุดเพื่อควบคุม ความร้อนสูญเสียระหว่างทำปฏิกิริยา ดังแสดงตามแผนภาพในรูปที่ 1 โดยการศึกษานี้ได้มีส่วนผสมของปฏิกิริยา คือ น้ำมันปาล์มดิบ 100 ลิตรต่อครั้ง เอทานอล 66 ลิตร และกรดซัลฟิวริก 7 ลิตร ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส โดยผสมสารทั้ง 3 ชนิด ด้วยปั๊มสารเคมีแบบหมุนวน สารผสมจะไหลผ่านท่อผสมแบบสติดขนาดความยาว 1 เมตร จำนวน 14 ท่อผสมด้วยอัตราการไหล 500 ลิตรต่อชั่วโมง โดยภายในท่อประกอบด้วยไส้ท่อผสมเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยา

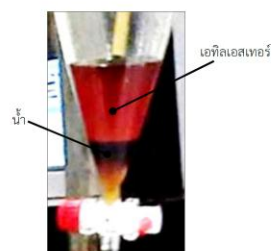


รูปที่ 1 เครื่องผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงด้วยท่อผสมแบบสติดหมุนวนขนาด 100 ลิตร (1: ถังน้ำมันปาล์มดิบ ขนาด 180 ลิตร, 2: ถังเอทานอล ขนาด 70 ลิตร, 3: ถังกรดซัลฟิวริก ขนาด 20 ลิตร, 4: ท่อผสมแบบสติดจำนวน 2 ชุดต่อ, 5: ปั๊มสารเคมีแบบหมุนวน และ 6: ถังเก็บใบโอดีเซล)

2.3 วิธีการดำเนินการ

ดังหมายเลข 1 ทำหน้าที่ 3 อย่าง คือ เก็บน้ำมันปาล์มดิบ เป็นถังทำปฏิกิริยาขณะสารเคมีและน้ำมันปาล์มดิบผสมกัน และใช้เป็นถังแยกเอทิลเอสเทอร์ที่นำหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จแล้ว โดยการทดลองนี้เริ่มต้นด้วยเติมน้ำมันปาล์มดิบ 100 ลิตร ลงในถังน้ำมันปาล์มดิบ ในขณะที่เดียวกันก็เปิดปั๊มหมุนวนน้ำมันปาล์มดิบที่อัตราการไหล 500 ลิตรต่อชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิภายในถังผสมแบบหมุนวน หรือ ถังน้ำมันปาล์มดิบ ไว้ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ และเติมเอทานอล 66 ลิตร (66 vol.%) ลงในถังเอทานอล และเปิดวาล์วป้อนเอทานอลให้มีอัตราการไหล 495 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อปริมาณของเอทานอลในถังเอทานอลถูกป้อนเข้าสู่ระบบหมุนวนหมดแล้ว จึงเติมกรดซัลฟิวริก 7 ลิตร (7 vol.%) ไปในถังกรดซัลฟิวริก และเริ่มจับเวลาการทำปฏิกิริยาตั้งแต่เริ่มเติมกรด

ซัลฟิวริก ในการทำปฏิกิริยามีเวลาเป็นตัวแปรของการทดลอง ซึ่งจะกำหนดระยะเวลาของการทำปฏิกิริยา คือ 0.5, 1, 2, 3, 6, 9 และ 12 ชั่วโมง เพื่อเก็บตัวอย่างการทดลอง หลังการเก็บตัวอย่างทุกครั้งหยุดการเกิดปฏิกิริยาด้วยการนำไปแช่ในน้ำเย็นโดยทันที หลังจากนั้นเติมน้ำมันตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องให้เกิดการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ เห็นการแบ่งชั้นที่ชัดเจนของน้ำมันและของเสีย ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นถ่ายน้ำมันของเสียซึ่งอยู่ด้านล่าง น้ำมันตัวอย่างที่ถ่ายของเสียออกแล้วมาล้างด้วยน้ำร้อนจนสะอาด และนำไปทดสอบความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ด้วยเครื่องมือทดสอบ Fourier Transform NMR Spectrometer 500 MHz, Model: Unity Inova, Varian, Germany (NMR)



รูปที่ 2 แสดงการแยกชั้นของเอทิลเอสเทอร์ (ด้านบน) จากน้ำมันปาล์มดิบและน้ำ (ด้านล่าง)

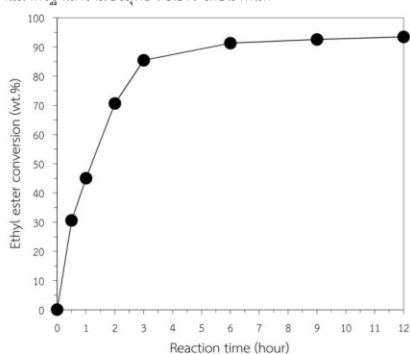
3. ผลการทดลอง

ผลการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบที่บวมชนิดกรดไขมันอิสระสูงกับเอทานอลด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสติดแบบหมุนวน และมีการทดสอบความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องมือทดสอบ NMR ดังแสดงในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาของการทำปฏิกิริยามีผลต่อการแปลงเปลี่ยนแปลงกลีเซอไรด์ในน้ำมันเป็นเอสเทอร์ ซึ่งในการทดลองนี้เป็นการแปลงองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบที่บวมซึ่งส่วนใหญ่เป็นไตรกลีเซอไรด์ ดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นก็ให้ค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ที่สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะมีการแปลงของเอสเทอร์อย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 30-180 นาที แต่หลังจากผ่านไป 180 นาที หรือ 3 ชั่วโมง จนถึงเวลา 6 ชั่วโมงการแปลงของเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเริ่มคงที่หลังจากผ่านไป 6 ชั่วโมงในการทำปฏิกิริยาที่เวลา 6-12 ชั่วโมง ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเอทานอล (anhydrous ethanol) มีศักยภาพในการผลิตเอทิลเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์สูง ถึงแม้ว่าน้ำมันปาล์มดิบที่บวมที่ใช้ในงานวิจัยมีกรดไขมันอิสระสูงประมาณ 15% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญสำหรับการผลิตไบโอดีเซล โดยสามารถผลิตเอทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์มากที่สุดคือ 93.46 wt.% ที่เวลา 12 ชั่วโมง

4. การอภิปรายผล

ในการทดสอบวิเคราะห์ค่าความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ พบว่าน้ำมันปาล์มดิบถูกเปลี่ยนเป็นเอทิลเอสเทอร์ได้ตั้งแต่เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที จนได้ความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์มากที่สุดคือร้อยละ 93.46 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 12 ชั่วโมง แต่ค่าดังกล่าวก็ยังไม่ผ่านค่าความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ 96.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าตามมาตรฐานลักษณะและ

คุณภาพ ของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2556[8] โดยสาเหตุหนึ่งเกิดจากน้ำที่เพิ่มขึ้นระหว่างกระบวนการทำปฏิกิริยาเอสเตอร์ริเคชัน น้ำระหว่างกระบวนการที่สูงขึ้นจะทำให้ลดความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของกรด และความเข้มข้นของเอทานอลที่กำลังทำปฏิกิริยา น้ำจึงเป็นอุปสรรคสำคัญในการทำปฏิกิริยาเอสเตอร์ริเคชันในขั้นตอนเดียว (single-step esterification) ทำให้เกิดการขัดขวางการทำปฏิกิริยา ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของเอสเทอร์นั้นมิอัตราการการเพิ่มขึ้นที่ช้าลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงเวลา 12 ชั่วโมง ก็ยังไม่สามารถทำให้กลีเซอไรด์ที่เหลือเปลี่ยนแปลงเป็นเอสเทอร์ได้จนสามารถผ่านมาตรฐานความบริสุทธิ์ 96.5% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 3 การสังเคราะห์ของเอทิลเอสเทอร์ของน้ำมันปาล์มดิบ ในการทำปฏิกิริยาที่ต่างกัน ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสตีทมนวขนาด 100 ลิตร

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบที่รวม

| Property | MCPO | Biodiesel @ 12 hour |
|-------------------------|--------|---------------------|
| Density at 75°C (kg/L) | 0.910 | 0.896 |
| Viscosity at 75°C (cSt) | 13.72 | 6.29 |
| Free fatty acid (wt.%) | 15.233 | 0.823 |
| Triglyceride (wt.%) | 82.116 | 1.113 |
| Diglyceride (wt.%) | 2.348 | 2.411 |
| Monoglyceride (wt.%) | 0.244 | 2.866 |
| Ester (wt.%) | 0.059 | 93.460 |
| Acid value (mgKOH/g) | 34.5 | 1.630 |

5. สรุป

จากการศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงโดยใช้ปฏิกิริยาเอสเตอร์ริเคชันด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสตีทมนวขนาด 100 ลิตร สามารถให้ค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ที่สูงได้ โดยใช้เครื่องมือ NMR ในการทดสอบวิเคราะห์ค่าความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ พบว่าน้ำมันปาล์มดิบถูกเปลี่ยนเป็นเอทิลเอสเทอร์ได้ตั้งแต่ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที จนได้ความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์มากที่สุดคือร้อยละ 93.46 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 12 ชั่วโมง แต่ค่าดังกล่าวก็ยังไม่ผ่านค่าความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ 96.5% โดยน้ำหนัก จึงควรใช้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริเคชันในการเปลี่ยนแปลงเป็นกลีเซอไรด์ที่เหลือเป็นเอสเทอร์ ในขั้นตอนที่สอง ต่อจากกระบวนการเอสเตอร์ริเคชัน ซึ่ง

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการผลิตเอทิลเอสเทอร์ให้มีความบริสุทธิ์สูงจากน้ำมันปาล์มดิบกรดไขมันอิสระสูงไม่สามารถทำได้ด้วยปฏิกิริยาเอสเตอร์ริเคชันเพียงขั้นตอนเดียว แต่จำเป็นต้องใช้ปฏิกิริยาสองขั้นตอนสำหรับการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบที่มีกรดไขมันอิสระสูงคือปฏิกิริยาเอสเตอร์ริเคชัน และปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริเคชัน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนในการให้เงินทุนวิจัยโดยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ รหัสโครงการ ENG570123b และ ENG570123a

เอกสารอ้างอิง

- [1] Shah S, Sharma S, Gupta MN. "Biodiesel preparation by lipase-catalyzed transesterification of Jatropha oil," Energy Fuels, 2004, Vol. 18, p. 154-9.
- [2] Ramadhas AS, Wurleedharan C, JayaraJ S. "Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil," Renew Energy, 2005, Vol. 30, p. 1789-800.
- [3] Luque R, Herrero-Davila L, Campelo JM, Clark JH, Hidalgo JM, Luna D, et al. "Biofuels: a technological perspective," Energy Environ Sci, 2008 Vol. 1(5), p. 542-54.
- [4] Luque R, Lovett JC, Datta B, Clancy J, Campelo JM, Romero AA. "Biodiesel as feasible petrol fuel replacement," a multidisciplinary overview. Energy Environ Sci, 2010, Vol. 11, p. 1706-21.
- [5] Zhang, L., Xian, M., He, Y., Li, L., Yang, J., Yu, S., Xu, X. "A Bronsted acidic ionic liquid as an efficient and environmentally benign catalyst for biodiesel synthesis from free fatty acids and alcohols," Bioresour. Technol., 2009, Vol. 100, p. 4368-4373.
- [6] Semwal, S., Arora, A.K., Badoni, R.P., Tuli, D.K. "Biodiesel production using heterogeneous catalyst," Bioresour. Technol., 2010, Vol. 102, p. 2151-2161.
- [7] Encinar JM, Gonzalez JF, Rodriguez JJ, Tejedor A. "Biodiesel fuels from vegetable oils," transesterification of Cynara cardunculus L. oils with ethanol. Energy Fuels, 2002 Vol. 16, p. 443-50.
- [8] กรมธุรกิจพลังงาน "กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2556," ราชกิจจานุเบกษา, 2556 เล่มที่ 130, หน้า 15-17.



เกี่ยวกับผู้เขียน
นฤมล อินทร์น
บัณฑิตวิทยาลัย
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
สาขางานวิจัย ไบโอดีเซล

ประวัติผู้เขียน

| | | |
|--|--------------------------|---------------------|
| ชื่อ สกุล | นางสาวนฤมล อินทร์ตัน | |
| รหัสนักศึกษา | 5610120058 | |
| วุฒิการศึกษา | | |
| วุฒิ | ชื่อสถาบัน | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
| วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | 2555 |

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการการศึกษา)

ทุนมหาวิทยาลัยประเภททุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ จากบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ทุนงบประมาณแผ่นดิน (งบบุทธศาสตร์รัฐบาล) จากสำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Naruemon Intarat, Krit Somnuk, Thanansak Theppaya and Gumpon Prateepchaikul. 2014. "Acid value reduction process in mixed crude palm oil by using low-grade ethanol". การประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ "The 2014 International Conference on Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering", 3-4 พฤษภาคม 2014. เมืองอินช็อน ประเทศเกาหลีใต้, ตีพิมพ์ในวารสาร Advanced Materials Research, Vol.1025-1026, 2557, p677-682. กันยายน 2014.

นฤมล อินทร์ตัน, กฤษ สมนึก, ฐานันดรศักดิ์ เทพญา และกำพล ประทีปชัยกูร. 2558. "การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมชนิดกรดไขมันอิสระสูงด้วยเอทานอล". การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8, 4-6 พฤศจิกายน 2558. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี