



วิทยานิพนธ์

การหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมัน
สบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน

STATISTICAL OPTIMIZATION FOR BIODIESEL
PRODUCTION FROM JATROPHA CURCAS OIL USING
TWO-STEP CATALYZED PROCESS

นายธีรยุทธ์ ธรรมวิจิตร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

สาขา

วิศวกรรมเคมี

ภาควิชา

เรื่อง การหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน

Statistical Optimization for Biodiesel Production from Jatropha Curcas Oil Using
Two-step Catalyzed Process

นามผู้วิจัย นายธีรยุทธ ธรรมวิจิตร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มานพ เจริญไชยตระกูล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ไพศาล คงกาญจนาย, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุ่นดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
แบบสองขั้นตอน

Statistical Optimization for Biodiesel Production from Jatropha Curcas Oil Using Two-step
Catalyzed Process

โดย

นายธีรยุทธ ธรรมวิจิตร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
พ.ศ. 2551

ธีรยุทธ์ ธรรมวิจิตร 2551: การหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมัน
สบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
มานพ เจริญไชยตระกูล, Ph.D. 118 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่ง
ปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ใช้ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด
ส่วนขั้นตอนที่ 2 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้การออกแบบ
การทดลองแบบ One variable at a time ในขั้นตอนที่ 1 ส่วนในขั้นตอนที่ 2 ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ
One variable at a time และแบบ Box – Behnken โดยปัจจัยที่ได้ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา
อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา และความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา จาก
การศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสอง
ขั้นตอนโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ One variable at a time คือ ขั้นตอนแรก ใช้ความเข้มข้นของ
ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อ
น้ำมัน 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 20 นาที ขั้นตอนที่สอง ใช้ความเข้มข้นของ
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 อุณหภูมิ 50 องศา
เซลเซียส เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 30 นาที ได้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 96.4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้การออกแบบ
แบบ Box – Behnken ในขั้นตอนที่ 2 แทนการใช้ One variable at a time พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ ใช้ความ
เข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 7.36:1
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยพบว่าที่สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวให้ค่า
เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 97.7 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้พบว่าแบบจำลองแบบ Full Quadratic ซึ่งมีค่า
สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้วและค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 84 เปอร์เซ็นต์และ 3.127
ตามลำดับ มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาเป็นแบบจำลองเพื่ออธิบายผลการทดลอง เมื่อพิจารณาค่า
สัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปรในแบบจำลอง Full Quadratic พบว่า อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทา
นอลต่อน้ำมันมีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มากที่สุดทั้งในรูปของ Linear terms และ Square terms
ส่วนตัวแปรใน Interaction terms ไม่มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ นอกจากนี้จากการทดสอบคุณสมบัติ
ของผลิตภัณฑ์ พบว่าคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ค่าความหนืด จุดวาบไฟ จุดหมอกควัน จุดไหลเท และค่า
ความเป็นกรด ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM 6751

Teerayut Thamvijit 2008: Statistical Optimization for Biodiesel Production from *Jatropha Curcas* Oil Using Two-step Catalyzed Process. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Manop Charoenchaitrakool, Ph.D. 118 pages.

The aim of this research was to investigate the optimum conditions for biodiesel production from *Jatropha curcas* oil using two-step catalyzed process. In the first step, iron (III) sulfate pentahydrate was used as an acid catalyst while potassium hydroxide was chosen as a basic catalyst in the second step. In this research, One variable at a time technique was applied for the experimental design in the first step. In the second step, the experimental designs were carried out using One variable at a time technique and Box-Behnken design. The effects of temperature, methanol to oil molar ratio, reaction time and amount of catalyst on percentage methyl ester were studied. It was found that the optimum conditions based on the One variable at a time technique were when using 2 wt% of iron (III) sulfate pentahydrate, methanol to oil molar ratio of 6:1, at 50 °C and reaction time of 20 minutes in the first step, followed by using 1 wt% potassium hydroxide, methanol to oil molar ratio of 6:1, at 50 °C and reaction time of 30 minutes in the second step. The highest methyl ester content from this condition was found to be 96.4%. In the case of using the Box-Behnken design in the second step instead of the One variable at a time technique, the optimum conditions for biodiesel production were when using 1 wt% potassium hydroxide, methanol to oil molar ratio of 7.36:1, at 60 °C and reaction time of 30 minutes in the second step. The methyl ester obtained from the optimum conditions was 97.7 %. In addition, it was illustrated that a Full Quadratic model with the adjusted coefficient of determination (R^2_{adj}) and Standard Error of 84% and 3.127 respectively was able to predict the methyl ester content. When considering the regression coefficient of each variables in the Full Quadratic model, it was found that molar ratio had the most significant effect on the %FAME in terms of the linear terms and the square terms, whereas the interaction terms had no effect on the %FAME. In addition, it was found that the viscosity, flash point, cloud point, pour point and acid value of the produced biodiesel were in the acceptable ranges according to the ASTM 6751 standard.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์มานพ เจริญไชยตระกูล ประธานกรรมการ ที่ให้คำปรึกษาและแนะแนวทางต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรูญ ถัฏรมานพ ประธานการสอบ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สินสุภา จั๊ยจุลเจิม ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่สละเวลาเพื่อเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำแนะนำและแนวคิดที่เป็นประโยชน์ อย่างยิ่งต่อผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณ โครงการศูนย์ไปโอดีเซลที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือแก๊สโครมาโทกราฟี ตลอดจนผู้มีส่วนช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้สำเร็จ

ขอขอบพระคุณ นายเมธี ขำดวง และนางสาวทัศนีย์ สวัสดิ์พาณิชย์ ที่ให้คำแนะนำในการใช้งานโปรแกรม MINITAB

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ ครอบครัว และนิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้

ธีรยุทธ์ ธรรมวิจิตร

เมษายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	41
อุปกรณ์	41
วิธีการ	42
ผลและวิจารณ์	47
สรุปและข้อเสนอแนะ	81
สรุป	81
ข้อเสนอแนะ	83
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	84
ภาคผนวก	91
ภาคผนวก ก การเตรียมสารตั้งต้น	92
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดในน้ำมัน	94
ภาคผนวก ค การคำนวณเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์	96
ภาคผนวก ง โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม	99
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	118

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ผลวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันสบู่ดำ	10
2	ข้อมูลเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันสบู่ดำกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว	11
3	คุณสมบัติทางกายภาพของสารในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	20
4	จุดหลอมเหลวของกรดไขมัน เมทิลเอสเทอร์ และ โมโน/ได/ไตรกลีเซอไรด์	20
5	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	25
6	เปรียบเทียบความแตกต่างของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล	30
7	ข้อกำหนดคุณสมบัติของไบโอดีเซลและวิธีการตรวจสอบ	32
8	ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซล ชุมชน) พ.ศ. 2549	33
9	การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร	35
10	ตัวแปรและระดับค่าของตัวแปรของการออกแบบแบบ Box-Behnken	44
11	สภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken โดยใช้โปรแกรม MINITAB	44
12	ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรทที่ใช้ในปฏิกิริยา	51
13	ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์หลังจากขั้นตอนที่ 1 เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่ใช้ในปฏิกิริยา	53
14	ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์หลังจากขั้นตอนที่ 1 เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตรา ส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำที่ใช้ในปฏิกิริยา	56
15	ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์หลังจากขั้นตอนที่ 1 เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ ในการทำปฏิกิริยา	57
16	เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของผลิตภัณฑ์ ที่สภาวะการทดลองต่างๆ ตามการ ออกแบบ Box - Behnken Design	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
17	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ	73
18	ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย	74
19	ค่า p -value ของแบบจำลอง	76
20	เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทดลองกับค่าเปอร์เซ็นต์ เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากแบบจำลอง Full Quadratic	78
21	คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้เทียบกับค่ามาตรฐาน	80

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ลำต้นของสบู่ดำ	7
2 ใบของสบู่ดำ	7
3 ดอกของสบู่ดำ	8
4 ผลของสบู่ดำ	8
5 เมล็ดของสบู่ดำ	9
6 กลไกการแตกสลายด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์	17
7 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) ของไตรกลีเซอไรด์	19
8 การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	19
9 ปฏิกิริยาสปอนนิฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ	22
10 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ	24
11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างปริมาณเมทานอลกับปริมาณกรดไขมันอิสระที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เอนไซม์ไลเปส <i>C. antarctica</i>	26
12 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน	28
13 การออกแบบบ็อกซ์-เบ้นเคนสำหรับ 3 ตัวแปร	36
14 พื้นที่การตอบสนองแบบ 3 มิติและกราฟเส้นโครงร่าง	37
15 เครื่องมือผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน	43
16 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ	48
17 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรตที่ความเข้มข้นต่างๆ	51
18 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 ที่อุณหภูมิต่างๆ	53
19 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำในขั้นตอนที่ 1 ที่อัตราส่วนต่างๆ	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
20 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 ที่เวลาต่างๆ	57
21 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	60
22 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิต่างๆ	61
23 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำในขั้นตอนที่ 2 ที่อัตราส่วนต่างๆ	62
24 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 ที่เวลาต่างๆ	64
25 Surface Plot (ก) และ Contour Plot (ข) แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 30 นาที	68
26 Surface Plot (ก) และ Contour Plot (ข) แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 30 นาที	70
27 Surface Plot (ก) และ Contour Plot (ข) แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 30 นาที	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค1 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของผลิตภัณฑ์จากการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน	98
ง1 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที	100
ง2 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที	101
ง3 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	102
ง4 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	103

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง5 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 3:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	104
ง6 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 9:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	105
ง7 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	106

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง8 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 9:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	107
ง9 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 3:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	108
ง10 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 3:1 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	109

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง11 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 3:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	110
ง12 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	111
ง13 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	112

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง14 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	113
ง15 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 9:1 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	114
ง16 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	115

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง17 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 9:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	116
ง18 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	117

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

FAME	=	Fatty Acid Methyl Ester
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
°C	=	degree celsius
GC	=	Gas Chromatography
AV	=	Acid Value
KOH	=	potassium hydroxide
wt%	=	percentage by weight

การหาสถานะที่เหมาะสมทางสถิติสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุदाโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน

Statistical Optimization for Biodiesel Production from Jatropha Curcas Oil Using Two-step Catalyzed Process

คำนำ

เนื่องด้วยวิกฤตการณ์ทางด้านพลังงานจากน้ำมันปิโตรเลียมที่ขาดแคลน ส่งผลให้มีการ
คิดค้นพลังงานทดแทนขึ้น โดยข้อมูลของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ได้กล่าวถึง ความจำเป็นที่
ประเทศต้องพัฒนาพลังงานเชื้อเพลิงทดแทน เนื่องจากราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นเรื่อยๆ จาก
สภาพวิกฤตน้ำมันที่ทั่วโลกกำลังเผชิญอยู่ ณ ขณะนี้ และความต้องการพึ่งพาตนเองของประเทศไทย
ในการที่จะสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงาน ประกอบกับราคาพืชผลทางการเกษตรตกต่ำ ซึ่งสวน
ทางกับราคาน้ำมันที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกษตรกรประสบปัญหาการขาดทุนอย่างต่อเนื่อง รวมทั้ง
ปัญหาทางด้านมลพิษและสิ่งแวดล้อม ปัจจัยเหล่านี้เป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ประเทศไทยจำเป็นต้อง
พัฒนาเชื้อเพลิงทดแทนอย่างจริงจัง โดยการแสวงหาและพัฒนาพลังงานใหม่ที่มีความยั่งยืน ซึ่ง
เป็นการเน้นการใช้พลังงานที่มีในท้องถิ่นเพื่อทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม โดยเลือกใช้น้ำมัน
พืชและแอลกอฮอล์ที่ผลิตจากพืชมาเป็นตัวเลือกในอันดับแรกๆ เพื่อนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงใน
เครื่องยนต์ทดแทนน้ำมันปิโตรเลียม นอกจากนี้ประเทศไทยยังจัดเป็นประเทศที่มีศักยภาพที่จะนำ
ผลผลิตทางการเกษตรมาใช้ผลิตเป็นพลังงานทดแทนได้ เนื่องจากประเทศไทยมีภูมิประเทศที่
เหมาะแก่การทำกิจกรรมได้ตลอดทั้งปี จากการที่มีผลผลิตและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็น
จำนวนมาก และยังสามารถลดมูลค่าการนำเข้าพลังงานในรูปน้ำมันปิโตรเลียมต่างๆ ได้ อีกทั้งยัง
เป็นการช่วยยกระดับชีวิตความเป็นอยู่ของเกษตรกรไทยได้อีกทางหนึ่ง โดยพลังงานทางเลือก
(Alternative energy) ที่นำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลที่นับวันจะลดน้อยลงและมีราคาแพงขึ้นที่มี
ความเหมาะสมอย่างหนึ่ง คือ ไบโอดีเซล (Biodiesel)

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่เป็นเอสเทอร์ (Ester) ได้จากการทำปฏิกิริยาเคมีของน้ำมัน
พืชหรือน้ำมันสัตว์กับเมทานอลหรือเอทานอล ซึ่งน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ที่นำมาผสมนี้ได้มาจาก
พืชน้ำมัน น้ำมันประกอบอาหารที่ใช้แล้วจากพืชและสัตว์ โดยน้ำมันไบโอดีเซลจะมีคุณสมบัติคือ
เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาดปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม และมีคุณสมบัติทางกายภาพคล้ายกับน้ำมันดีเซล แต่

ให้การเผาไหม้ที่สะอาดกว่าน้ำมันดีเซล ไอเสียมีคุณภาพดีกว่า ทั้งนี้เพราะมีออกซิเจนอยู่ในไบโอดีเซล ทำให้การสันดาปที่สมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซลปกติ จึงมีการปล่อยมลพิษน้อยกว่า และเนื่องจากไม่มีกำมะถันในไบโอดีเซลจึงไม่มีปัญหาเรื่องสารซัลเฟต นอกจากนี้ยังมีเขม่าคาร์บอนน้อย จึงไม่ทำให้เกิดการอุดตันของระบบไอเสีย

วัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ พืชน้ำมัน น้ำมันประกอบอาหารที่ใช้แล้วจากพืชและสัตว์ โดยพืชน้ำมัน ได้แก่ ปาล์ม มะพร้าว ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ละหุ่ง งา และเมล็ดทานตะวัน ซึ่งในปัจจุบันนิยมเลือกใช้น้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตไบโอดีเซล นอกจากพืชน้ำมันดังกล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีพืชน้ำมันอีกชนิดหนึ่งซึ่งในอนาคตจะมีการส่งเสริมให้นำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลมากขึ้น ได้แก่ สบู่ดำ เนื่องจากในเมล็ดของสบู่ดำ มีปริมาณน้ำมันสูงถึงร้อยละ 52.8 ของน้ำหนักเนื้อในของเมล็ดสบู่ดำ และในน้ำมันสบู่ดำมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวในปริมาณสูงคือ มีปริมาณกรดโอเลอิก 44.8 เปอร์เซ็นต์ และกรดไลโนลิก 34.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่งผลทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความหนืดที่เหมาะสมและมีคุณภาพดี นอกจากนี้การนำสบู่ดำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลยังไม่เป็นการแย่งตลาดของน้ำมันที่ใช้บริโภค เนื่องจากน้ำมันสบู่ดำไม่สามารถนำมาบริโภคได้ จึงสามารถนำผลผลิตที่ได้ไปใช้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ (Kandpal and Madan, 1994)

การผลิตไบโอดีเซลสามารถทำได้โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ อาจจะเป็นสารเคมีที่มีสมบัติเป็นกรดหรือเบส การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล พบว่ามีข้อดี คือ สามารถใช้น้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูงมาทำปฏิกิริยาได้ แต่ใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยานาน ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส ใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่มีข้อเสีย คือ ถ้าในน้ำมันมีปริมาณกรดไขมันอิสระมากเกินไปอาจทำให้เกิดสบู่ ซึ่งส่งผลทำให้ปริมาณเอสเทอร์เกิดขึ้นลดลง ดังนั้นข้อจำกัดของการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ น้ำมันเริ่มต้นในการผลิตไบโอดีเซลควรมีกรดไขมันอิสระน้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ ด้วยสาเหตุดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนขึ้น โดยขั้นตอนแรกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดเพื่อกำจัดกรดไขมันอิสระ เมื่อกรดไขมันอิสระมีค่าน้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ จึงทำปฏิกิริยากับตัวเร่งที่เป็นเบสเพื่อให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาการผลิตไบโอดีเซลทั้งในส่วนองงานวิจัยและในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

วัตถุประสงค์

ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน ซึ่งในขั้นตอนแรกใช้ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนขั้นตอนที่สองใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้หลักทางสถิติในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยวิเคราะห์ผลจากพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology)

ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน ได้แก่

1.1 ขั้นตอนที่ 1 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ

One variable at a time

- ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำ
- อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 3:1 ถึง 30:1
- อุณหภูมิ 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส
- เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 10 ถึง 30 นาที

1.2 ขั้นตอนที่ 2

1.2.1 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ One

variable at a time

- ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำ
- อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 3:1 ถึง 9:1
- อุณหภูมิ 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส
- เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 10 ถึง 30 นาที

1.2.2 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box- Behnken

- ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของน้ำมันสนุดำ
- อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำ 3:1 ถึง 9:1
- อุณหภูมิ 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส
- เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

2. ศึกษาคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้ ได้แก่ ความหนืด ค่าความเป็นกรด จุดหมอกควัน จุดไหลเท และจุดวาบไฟ

การตรวจเอกสาร

จากสภาวะขาดแคลนน้ำมันดิบทั่วโลก ส่งผลให้ราคาน้ำมันดิบที่นำเข้าจากต่างประเทศเพื่อผลิตน้ำมันดีเซลมีราคาสูง ดังนั้นรัฐบาลจึงได้มีนโยบายในการส่งเสริมให้จัดหาพลังงานจากทรัพยากรธรรมชาติในประเทศมาทดแทน ได้แก่ ไบโอดีเซล เนื่องจากข้อดีของไบโอดีเซล คือ เป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน และเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด ส่งผลให้มีการสนับสนุนการผลิตไบโอดีเซลมากขึ้น จากความสนใจที่เพิ่มมากขึ้นของการผลิตไบโอดีเซล งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษหาข้อมูลของไบโอดีเซลและแสดงถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับไบโอดีเซล โดยจะแบ่งเป็นหัวข้อตามลำดับดังนี้ หัวข้อแรกจะกล่าวถึงวัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้น้ำมันสบู่ดำในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากข้อดีดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำ องค์ประกอบทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันสบู่ดำที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซล หัวข้อถัดมาได้อธิบายถึงความหมายของไบโอดีเซล วิธีการผลิตไบโอดีเซล ข้อดีและข้อเสียของการผลิตไบโอดีเซล และปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน และหัวข้อสุดท้าย ได้แก่ ข้อกำหนดคุณสมบัติของไบโอดีเซลและวิธีการตรวจสอบ

1. น้ำมันสบู่ดำ

น้ำมันจากสบู่ดำถูกนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลเป็นครั้งแรกในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ณ ประเทศมาลี (Mali) แต่คนทั่วไปก็ยังนิยมใช้น้ำมันที่ได้มาจากได้ผิวโลกมากกว่า เนื่องจากความสะดวกในการใช้งาน ทำให้การใช้น้ำมันจากพืชจำกัดอยู่ในบางประเทศเท่านั้น แต่หลังจากที่ทั่วโลกประสบปัญหาวิกฤตราคาน้ำมันแพงและการขาดแคลนน้ำมันที่ได้จากได้ผิวโลก ทำให้ความสนใจในการที่จะศึกษาเกี่ยวกับการนำน้ำมันพืชต่างๆ รวมถึงน้ำมันจากสบู่ดำมาใช้ประโยชน์มีมากขึ้น ประกอบกับต้นสบู่ดำเป็นพืชที่ทนแล้ง ดูแลง่าย และมีศัตรูทางธรรมชาติค่อนข้างน้อย ทำให้มีการปลูกอย่างแพร่หลาย รวมถึงในประเทศไทยได้มีการนำน้ำมันจากสบู่ดำไปทดลองใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2523 และพบว่าสามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้

สบู่ดำจัดเป็นพืชในตระกูล *Euphorbiaceae* ซึ่งอยู่ในตระกูลเดียวกับมันสำปะหลังและยางพารา สบู่ดำมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha curcas* L. ชื่อสามัญคือ physic nut (คำว่า *Jatropha* มีรากศัพท์มาจากการแพทย์ของภาษากรีก 2 คำ คือ *iatros* แปลว่า หมอ และ *tropa* แปลว่า อาหาร ส่วนคำว่า *curcas* เป็นชื่อเรียกของสบู่ดำ บริเวณเมือง Malabar ในประเทศอินเดีย) นอกจากนี้ ยังมีชื่อเรียกที่แตกต่างกันในแต่ละประเทศอีกด้วย เช่น *purging nut* (อังกฤษ), *pourghere*, *pignon d'Inde* (ฝรั่งเศส), *purgeernoot* (เนเธอร์แลนด์), *purgueira* (โปรตุเกส), *fagiola d'India* (อิตาลี), *kadam* (เนปาล), *yu-lu-tzu* (จีน), *tubing-bakod* (คอสตาริกา), *mundubi-assu* (บราซิล), *pinol* (เปรู), และ *pinon* (กัวเตมาลา) จึงเป็นที่น่าสังเกตว่าสบู่ดำสามารถเจริญเติบโตได้ทั่วทุกพื้นที่ ทำให้มีชื่อที่ใช้เรียกแตกต่างกัน แต่มีการสันนิษฐานว่า สบู่ดำเป็นพืชพื้นเมืองในแถบทวีปอเมริกากลาง อเมริกาใต้ และแอฟริกาใต้ สำหรับในประเทศไทย คาดว่า ถูกนำเข้ามาในช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 18 (ช่วงปลายสมัยกรุงศรีอยุธยา) โดยพ่อค้าชาวโปรตุเกสได้นำเข้ามาเพื่อคั้นเอาน้ำมันไปทำสบู่ และได้มีการปลูกอย่างแพร่หลายในทุกภาคของประเทศไทย โดยมีชื่อเรียกที่แตกต่างกันออกไป ส่วนสาเหตุที่เรียกต้นสบู่ดำเนื่องจาก มีน้ำยางสีขาวคล้ายสบู่บริเวณลำต้นและกิ่ง ภาคเหนือ เรียกว่า มะหุ้งฮั่ว ไท-ยว หรือเกงยู ภาคอีสาน เรียกว่า มะเข่า มักเข่า หรือสีหลอด ส่วนภาคใต้ เรียกว่า หงส์เทศ และภาษายาวี เรียกว่า ยาเมาะ เป็นต้น

1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ (อนุวัฒน์, 2551)

ต้นสบู่ดำเป็นพืชที่มีโครโมโซมแบบดิพลอยด์ ($2n = 22$) เป็นไม้พุ่มยืนต้นขนาดกลาง และอาจมีความสูงกว่า 5 เมตร อายุยืนกว่า 20 ปี

1.1.1 ลักษณะทางกายภาพของต้นสบู่ดำ

ลำต้น มีเปลือกลำต้นเรียบ มีสีเทา-น้ำตาล ลำต้นเกลี้ยง อวบน้ำ เป็นไม้เนื้ออ่อน ไม้มีแก่น หักง่าย มีน้ำยางสีขาวใส ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ลำต้นของสับดูดำ

ที่มา: ฅกัณฐภัทร และคณะ (2549)

ใบ เป็นใบเดี่ยวรูปไข่ กว้างหรือค่อนข้างกลม จัดเรียงแบบสลับ โคนใบเว้ารูปหัวใจ ปลายใบแหลม ขอบใบเรียบหรือหยักเว้า 3-5 หยัก ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ใบของสับดูดำ

ที่มา: อนุวัฒน์ (2551)

ดอก มีช่อดอกแบบ Panicle หรือ Panicle cyme ประกอบด้วยดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในช่อดอกเดียวกัน ดอกทั้ง 2 ชนิด มีกลีบรอง และกลีบดอก อย่างละ 5 กลีบ ดอกตัวผู้มีเกสรเรียงเป็นวง 2 วง วงละ 5 อัน ดอกตัวเมียมีรังไข่ ก้านเกสรตัวเมียมี 6 แฉก ดอกมีขนาดเล็กสีเขียวแกมเหลือง มีกลิ่นหอมอ่อนๆ ออกเป็นช่อที่ชอกใบหรือปลายยอด ในช่อดอกเดียวกันมีดอกตัวผู้มากกว่าดอกตัวเมีย (อัตราดอกตัวผู้ : ดอกตัวเมีย เท่ากับ 6-7 : 1) ดอกแต่ละช่อบานไม่พร้อมกัน มีช่อดอกประมาณ 15-30 ช่อต่อต้น แต่ละช่อดอกมีดอกย่อย 70-120 ดอก แต่ละช่อติดผลเพียง 8-14 ผล ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ดอกของสบู่ดำ

ที่มา: ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร จังหวัดชัยนาท (2550)

ผล ที่เกิดจากช่อดอกเดียวกันจะสุกแก่ไม่พร้อมกัน ผลอ่อนมีสีเขียว เมื่อแก่มีสีเหลืองคล้ายลูกจันทน์ ผลมีลักษณะกลมรีเล็กน้อย ผลมีขนาดปานกลาง กว้าง 2-3 เซนติเมตร ยาว 2.5-3.5 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4 ผลมี 3 พูๆ ละ 1 เมล็ด เมื่อผลสุกจะปริแตก ผลสด 1 กิโลกรัม มีจำนวน 85-90 ผล



ภาพที่ 4 ผลของสบู่ดำ

ที่มา: อนุวัฒน์ (2551)

เมล็ด มีรูปกลมรี เปลือกนอกสีดำ เนื้อในสีขาว (Albumen หรือ Kernel) มีสารพิษ (Curcin) หากบริโภคจะเกิดอาการอาเจียนและท้องเสีย เมล็ดกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร ยาวประมาณ 2 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 5 น้ำหนัก 100 เมล็ด ประมาณ 70 กรัม เมล็ด 1 กิโลกรัม มีประมาณ 1,300-1,500 เมล็ด ภายในเมล็ดประกอบด้วยเนื้อเมล็ดประมาณ 32 เปอร์เซ็นต์ น้ำมัน 30-38 เปอร์เซ็นต์ และเปลือก 30-38 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักเมล็ด



ภาพที่ 5 เมล็ดของสบู่ดำ

ที่มา: อนุวัฒน์ (2551)

1.1.2 พิษของสบู่ดำ (*Jatropha curcas* L.) (นันทวรรณ, 2549)

ก. ใบมีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อและฆ่าพยาธิโดยยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียกลุ่ม *Staphylococcus*, *Bacillus* และ *Micrococcus* ขาง (Sap) ที่ความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ และ 100 เปอร์เซ็นต์ สามารถฆ่าไข่พยาธิไส้เดือน พยาธิปากขอ ยับยั้งการเจริญของลูกน้ำยุง และยางจะมีความเป็นพิษสูงมากต่อหนูถีบจักรเมื่อเข้าทางปากหรือนิดเข้าร่องท้อง

ข. กิ่งก้านหรือส่วนต้น (จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการ) พบว่ามีฤทธิ์ยับยั้ง Cytopathic effect ของเชื้อ HV โดยมีพิษต่ำ

ค. ผล จากการทดสอบกับปลาคาร์พ พบว่าพิษของ Phorbol Ester ทำให้ปลาเจริญเติบโตช้าลง มีมูกในอุจจาระและไม่กินอาหาร แต่ถ้าหยุดให้ Phorbol Ester ปลาจะกลับมาเจริญเป็นปกติ ได้ทดสอบกับตัวอ่อนในครรภ์ของหนู พบว่าผลสบู่ดำทำให้หนูแท้งได้

ง. สารพิษในเมล็ด คือ Curcin มีฤทธิ์ต่อสัตว์หลายชนิดและมนุษย์แบ่งเป็น 2 ประเภทดังนี้

1) พิษสะสมของเมล็ดสบู่ดำ จากการศึกษากับหนู พบว่าสารพิษ Curcin มีฤทธิ์ยับยั้งการสร้างโปรตีน แต่ในทางกลับกันพบว่าในเมล็ดสบู่ดำ มีสารบางชนิด ซึ่งมีฤทธิ์เป็นสารเร่งการเกิดมะเร็ง (Tumor Promoter) กล่าวคือ ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง แต่สามารถกระตุ้นให้เซลล์ที่มียีนผิดปกติ แบ่งตัวอย่างรวดเร็วและอาจพัฒนาเจริญเป็นก้อนมะเร็งได้

2) พิษเฉียบพลันของเมล็ดสบู่ดำ จากการศึกษากับหนูเมื่อให้ทางปากในหนูถีบจักร พบว่าทำให้หนูตาย เนื่องจากการคั่งในหลอดเลือด และ/หรือ เลือดออกในลำไส้ใหญ่ และเมื่อทดสอบกับลูกไก่ พบว่าเมื่อนำเมล็ดมาผสมอาหารให้ลูกไก่กินทำให้ลูกไก่โตช้า ดับและไตโต พิษในสัตว์ เช่น แกะ แพะ ทำให้ท้องเสีย ขาดน้ำ ไม่กินอาหาร และมีเลือดออกในอวัยวะภายใน เช่น กระเพาะอาหาร ปอด ไต หัวใจผิดปกติ มีเลือดออกหลายแห่งในร่างกาย พิษที่พบในเด็กที่รับประทานเมล็ดสบู่ดำ ได้แก่ อาการกระสับกระส่าย คลื่นไส้ อาเจียน ท้องเดิน และขาดน้ำ พิษที่พบในผู้ใหญ่ กรณีที่เป็นสายพันธุ์ที่มีสารเป็นพิษสูง หากรับประทานเพียงแค่ 3 เมล็ด ก็เป็นอันตรายแก่ระบบทางเดินอาหาร แต่บางพันธุ์รับประทานถึง 50 เมล็ดก็ไม่เป็นอันตราย

3) รากมีฤทธิ์ต้านอักเสบ ผงรากเมื่อทาบนใบหูของหนูถีบจักร จะช่วยต้านอาการอักเสบจากการถูกสาร 12-O-Tetradecanoyl Phorbol-13-Acetate (TPA) ซึ่งเป็นสารเร่งการเกิดมะเร็งได้ และสารสกัดด้วยเมทานอลของผงราก เมื่อให้ทางปากจะต้านการอักเสบของอุ้งเท้าหนูที่ได้รับสาร Carrageenan

4) ยางสบู่ดำทำให้เลือดแข็งตัวเร็วขึ้น (พบในคน) แต่ถ้าเจือจางมากๆ จะทำให้เลือดไม่แข็งตัว

1.1.3 คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันสบู่ดำ

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันที่ได้จากสบู่ดำแสดงดังตารางที่ 1 นอกจากนี้เมื่อนำคุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันสบู่ดำมาเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลจะพบว่า คุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมาก ยกเว้นค่าความหนืดซึ่งน้ำมันจากสบู่ดำมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันสบู่ดำ

คุณสมบัติ	ปริมาณ
ค่ากรด (mgKOH/g) ¹	0.06-0.5
ค่าสaponิฟิเคชัน (mgKOH/g) ¹	202.6
ค่าไอโอดีน (mg iodine/g) ¹	93-106
ค่าความหนืด (cSt) ¹	4.84-5.65

ตารางที่ 1 (ต่อ)

คุณสมบัติ	ปริมาณ
กรดไขมัน ²	
กรดไมริสติก (C14:0) (เปอร์เซ็นต์)	0-0.1
กรดพาล์มมิก (C16:0) (เปอร์เซ็นต์)	14.1-15.3
กรดสเตียริก (C18:0) (เปอร์เซ็นต์)	3.7-9.8
กรดโอเลอิก (C18:1) (เปอร์เซ็นต์)	34.3-45.8
กรดลิโนเลอิก (C18:2) (เปอร์เซ็นต์)	29.0-44.2
กรดไลโนเลนิก (C18:3) (เปอร์เซ็นต์)	0-0.3
กรดอาราคิดิก (C20:0) (เปอร์เซ็นต์)	0-0.3
กรดบีฮีนิก (C22:0) (เปอร์เซ็นต์)	0-0.2

ที่มา: ¹ Achten *et al.* (2008)

² Berchmans and Hirata (2008)

ตารางที่ 2 ข้อมูลเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันสบู่ดำกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว

รายการวิเคราะห์	น้ำมันสบู่ดำ	น้ำมันดีเซล	วิธีที่ใช้วิเคราะห์
ความถ่วงจำเพาะ	0.860-0.933	0.82-0.84	JIS-K-2249
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	210-240	50	JIS-K-2265
คาร์บอนตกค้าง (เปอร์เซ็นต์)	0.07-0.64	น้อยกว่า 0.15	JIS-K-2270
ค่าซีเทน	38.0-51.0	มากกว่า 50	JIS-K-2271
ค่าความหนืด (cSt)	37.00-54.80	มากกว่า 2.7	JIS-K-2283
ปริมาณซัลเฟอร์ (เปอร์เซ็นต์)	0-0.13	น้อยกว่า 1.2	JIS-K-2273

ที่มา: Achten *et al.* (2008)

2. ไบโอดีเซล (Biodiesel)

ตามที่มีการคาดการณ์ล่วงหน้าในการใช้พลังงานจากน้ำมันปิโตรเลียม จะหมดจากโลกในอีก 40 ปีข้างหน้า เนื่องจากโลกมีการใช้น้ำมันปิโตรเลียมในการให้พลังงานในรูปแบบต่างๆ เพิ่มขึ้นทุกปี ทำให้มีผู้คิดค้นหาพลังงานทดแทนในหลากหลายวิธีการ เพื่อให้กิจกรรมต่างๆ ดำเนินต่อไปได้ การแสวงหาและพัฒนาพลังงานใหม่ที่มีความยั่งยืนเป็นพลังงานที่มีในท้องถิ่นนั้นๆ เพื่อทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม น้ำมันพืช และแอลกอฮอล์ที่ผลิตจากพืช จึงเป็นตัวเลือกในอันดับแรกๆ ที่ถูกนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ทดแทนน้ำมันปิโตรเลียม โดยเมื่อย้อนกลับไปในอดีตจะพบว่า มีการนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงพร้อมกับการถือกำเนิดของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์ที่คุ้นเคยกันอย่างดีและใช้กันอยู่แพร่หลายในขณะนี้คือ เครื่องยนต์ที่สันดาปภายใน โดยมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ที่อยู่ในตัวเครื่องยนต์ ซึ่งแบ่งเป็นประเภทหลักได้ 2 ประเภท คือ

1. เครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยประกายไฟ คือ เครื่องยนต์เบนซิน
2. เครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยการอัดอากาศให้ร้อนแล้วจุดระเบิดด้วยการฉีดน้ำมันคือเครื่องยนต์ดีเซล

ประเทศเยอรมันถือเป็นประเทศแรกที่ผลิตเครื่องยนต์ทั้งสองประเภท เครื่องยนต์เบนซินถูกประดิษฐ์ สำเร็จในปี พ.ศ. 2419 โดย ดร.ออตโต้ (Nicholas Otto) ได้ใช้น้ำมันเบนซิน หรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แก๊สโซลีนเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งกลั่นมาจากน้ำมันปิโตรเลียมที่มีความไวไฟ โดยใช้เชื้อเพลิงรวมกับอากาศอัดเข้าไปในห้องเผาไหม้ในกระบอกสูบก่อน แล้วควบคุมการจุดระเบิด ด้วยประกายไฟจากหัวเทียน ต่อจากนั้นในปี พ.ศ. 2428 เครื่องยนต์ดีเซลจึงถูกประดิษฐ์ได้สำเร็จ โดย ดร.ดีเซล (Rudolf Diesel) ในครั้งนั้น เครื่องยนต์ถูกออกแบบให้ใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันถั่วลิสง เครื่องยนต์ชนิดนี้ให้กำลังขณะเผาไหม้สูง แต่มีความไวไฟต่ำ จึงจุดไฟได้ยากกว่าน้ำมันเบนซิน ทำให้ต้องทำการอัดอากาศ เข้าห้องเผาไหม้ในกระบอกสูบ เพื่อให้เกิดความร้อนสูงก่อน แล้วจึงฉีดละออง น้ำมันเชื้อเพลิงเข้าไปให้เกิดการจุดระเบิดเอง

ในยุคแรกการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากพืชนี้เกิดมาพร้อมๆ กับการสร้างเครื่องยนต์ ดร.ดีเซล เคยกล่าวไว้ว่า เครื่องยนต์ดีเซลที่ประดิษฐ์ขึ้นมานั้น สามารถใช้กับน้ำมันพืชหลากหลาย

ชนิด แต่ทว่าในยุคนี้เป็นยุคของการปฏิวัติอุตสาหกรรม ซึ่งมีการขุดหาและผลิตปิโตรเลียมเพื่อพัฒนาให้เชื้อเพลิงมีความหลากหลาย สำหรับการใช้งานในรูปแบบต่างๆ โดยน้ำมันดีเซลในขณะนั้นหาได้ง่าย สะดวกต่อการใช้งาน และมีราคาถูกกว่าน้ำมันพืช ด้วยคุณสมบัติต่างๆ ข้างต้นนี้ ทำให้มีการพัฒนาออกแบบปรับปรุงเครื่องยนต์ เพื่อตอบสนองการใช้น้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม

หลายประเทศสร้างแรงจูงใจให้เอกชนหันมาใช้พลังงานทดแทน โดยลดหย่อนค่าภาษีแก่ผู้ติดตั้งเครื่องจักรหรืออุปกรณ์การผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้พลังงานทดแทนในการผลิต ทำให้สถิติการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยพลังงานชีวภาพอีกประเภทหนึ่งที่คาดว่าจะนำมาทดแทนน้ำมันที่ผลิตจากปิโตรเลียมได้ คือ ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (Biodiesel) คือ น้ำมันที่ได้จากพืช หรือไขมันสัตว์ หรือน้ำมันที่ใช้แล้วจากการปรุงอาหาร ซึ่งสามารถนำมาปรับคุณสมบัติให้ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล สามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้โดยตรงโดยใช้เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลเท่านั้น

2.1 วิธีการผลิตไบโอดีเซลแบ่งออกเป็น 4 วิธี ได้แก่

2.1.1 การนำน้ำมันพืชมาใช้โดยตรงและการนำมาผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ (Direct use and blending)

2.1.2 การทำให้เป็นอิมัลชันขนาดเล็ก (Microemulsion)

2.1.3 การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking or Pyrolysis)

2.1.4 การใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification)

โดยรายละเอียดของการผลิตไบโอดีเซลแต่ละวิธีสามารถกล่าวได้ดังนี้

2.1.1 การนำน้ำมันพืชมาใช้โดยตรงและการนำมาผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ (Direct use and blending)

โดยวิธีดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากการพัฒนากระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยเริ่มต้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 การใช้น้ำมันที่ได้มาจากพืชมาทดแทนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้มาจากฟอสซิลเริ่มเป็นเรื่องที่มีการให้ความสนใจมากขึ้น โดยบริษัท Caterpillar Brazil ได้ทดลองใช้น้ำมันพืชผสม

กับน้ำมันดีเซลกับเครื่องยนต์ซึ่งไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงสภาพแต่อย่างใด และทำการทดลองใช้อัตราส่วนน้ำมันพืชผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าไม่สามารถใช้น้ำมันพืชแทนน้ำมันดีเซลได้ทั้ง 100 เปอร์เซ็นต์ แต่สามารถใช้น้ำมันพืช 20 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับน้ำมันดีเซล 80 เปอร์เซ็นต์ได้ แต่หลังจากทดสอบพบว่าเกิดปัญหาการสะสมของคราบแข็งคาร์บอน

Anon (1982) ทำการทดลองโดยใช้น้ำมันใช้แล้ว 95 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับน้ำมันดีเซล 5 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองพบว่า ไม่เกิดปัญหาการคาร์บอนสะสม แต่ปัญหาที่พบคือ มีการปนเปื้อนในน้ำมันเครื่อง ทำให้ต้องเปลี่ยนน้ำมันเครื่องทุกๆ 4,000-4,500 ไมล์

Jones *et al.* (2001) ทำการทดลองเปรียบเทียบการสะสมของคราบแข็งคาร์บอนโดยใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว 2.5 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับน้ำมันดีเซล พบว่าเมื่อทดสอบโดยใช้น้ำมันที่มีปริมาณน้ำมันพืช 2.5 เปอร์เซ็นต์ พบการสะสมของคราบแข็งคาร์บอนปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซล ขณะที่เมื่อทดสอบโดยใช้น้ำมันที่มีปริมาณน้ำมันพืช 20 เปอร์เซ็นต์ พบการสะสมของคราบแข็งคาร์บอนปริมาณมาก

Pramanik (2003) ทำการทดลองโดยนำน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำผสมกับน้ำมันดีเซล พบว่าเมื่อผสมน้ำมันสบู่ดำ 50 เปอร์เซ็นต์กับน้ำมันดีเซล ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และเมื่อทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันพบว่าสามารถใช้น้ำมันสบู่ดำ 40-50 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับน้ำมันดีเซลแทนการใช้น้ำมันดีเซลได้ โดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์

Dorado *et al.* (2002) ศึกษาผลกระทบของการนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาผสมกับน้ำมันดีเซล โดยนำน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับน้ำมันดีเซล พบว่าเมื่อใช้น้ำมันในระยะยาว ค่าความหนืดของน้ำมันจะเพิ่มขึ้น กำลังเครื่องลดลง 12 เปอร์เซ็นต์ เครื่องยนต์กินน้ำมันมากขึ้นเล็กน้อย และเกิดควันมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซล

Wang *et al.* (2006a) ทำการทดสอบโดยผสมน้ำมันพืชในอัตราส่วน 25 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ กับน้ำมันดีเซล โดยให้เครื่องยนต์ทำงานที่ 1,500 รอบต่อนาที พบว่า กำลังของเครื่องยนต์และอัตราการใช้ น้ำมันใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันดีเซล อีกทั้งค่า NO_x ยังต่ำกว่าการใช้ น้ำมันดีเซลบริสุทธิ์

อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้น้ำมันพืชกับเครื่องยนต์เป็นระยะเวลานาน พบว่า เกิดโค้ก และคราบคาร์บอนที่หัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง เกิดคราบตะกอนแข็งของคาร์บอน (Carbon deposits) เกิด oil ring sticking และทำให้น้ำมันเครื่องหนืดขึ้น (Thickening) และเป็นเจลในระบบ น้ำมันเครื่องเนื่องจากการปนเปื้อนของน้ำมันพืช

ดังนั้นการใช้น้ำมันพืชโดยตรงและการใช้น้ำมันพืชผสมกับน้ำมันดีเซลนั้น เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วให้ผลที่ไม่น่าพึงพอใจ จึงไม่สามารถนำไปใช้ได้สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลทั้งประเภท Direct และ Indirect injection ได้ เพราะเกิดปัญหาจากน้ำมันที่มีความหนืดสูง มีองค์ประกอบที่เป็นกรดมีกรดไขมันอิสระ การเกิดยางเหนียวเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน กระบวนการพอลิเมอร์เซชันระหว่าง การเก็บการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์จะเกิดคราบแข็งของคาร์บอน และปัญหาที่น้ำมันเครื่องมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาความหนืดของน้ำมันสูงเกินไปจึงมีการพัฒนาวิธีการผลิตโดยการทำให้เป็นอิมัลชันขนาดเล็ก (Microemulsion)

2.1.2 การทำให้เป็นอิมัลชันขนาดเล็ก (Microemulsion)

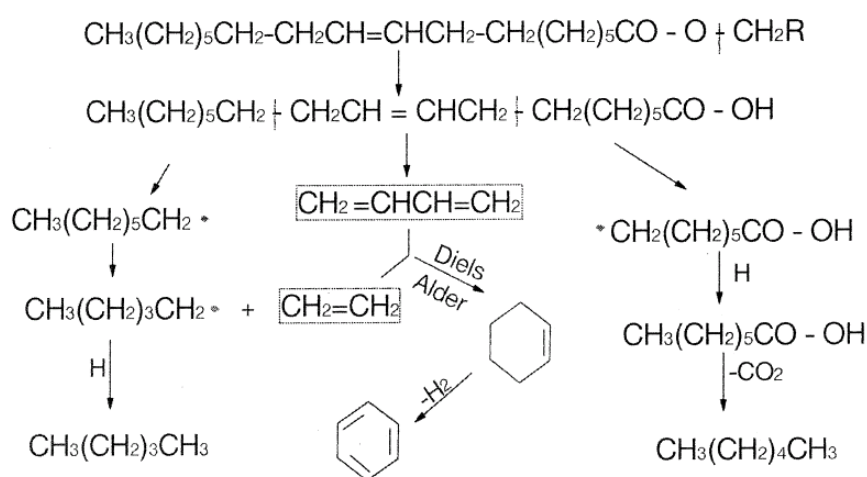
อิมัลชันขนาดเล็ก คือ คอลลอยด์ที่กระจายตัวอยู่ในสภาวะสมดุล มีขนาดอนุภาคระหว่าง 1-150 นาโนเมตร โดยสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติโดยการนำของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันในสภาวะปกติ และมี Amphiphiles ผสมอยู่ในของเหลวดังกล่าวอย่างน้อยหนึ่งชนิดเพื่อให้เกิดความคงสภาพ โดยอาจเป็นสารมีประจุหรือไม่มีประจุก็ได้ (Schwab *et al.*, 1987)

Ziejewski *et al.* (1984) ทำการทดลองโดยเตรียมสารอิมัลชันของน้ำมันดอกทานตะวัน (Alkali-Refined and Winterized) 53 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร กับเอทานอล (190-Proof Ethanol) 13.3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ 1-บิวทานอล 33.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าสารอิมัลชันที่ไม่มีประจุมีความหนืด 6.31 cSt ที่ 40 องศาเซลเซียส ค่าชีเทนเท่ากับ 25 และปริมาณเล็กน้อยกว่า 0.01 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ 1-บิวทานอลมากขึ้น จะพบว่าความหนืดของเชื้อเพลิงลดลงและรูปแบบการฉีดเชื้อเพลิงของระบบหัวฉีดดีขึ้น จากการทดลองในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 200 ชั่วโมง พบว่าไม่มีการเสื่อมลงของระบบการกรอง แต่เกิดยางเหนียวติดอยู่ในท่อของหัวฉีด เกิดคราบตะกอนแข็งของคาร์บอน เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และความหนืดของน้ำมันเครื่องที่เพิ่มขึ้น

Kerihuel *et al.* (2006) ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ของไขมันสัตว์ โดยการใช้อิมัลชันขนาดเล็กร่วมกับการใช้สาร SPAN 83 ซึ่งเป็นสารช่วยลดแรงตึงผิว โดยเริ่มจากการนำน้ำมันกับน้ำมาผสมกันให้เป็นสารอิมัลชัน จากนั้นนำมาผสมกับเอทานอล จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณสารที่ใช้ทำให้เกิดการอิมัลชันขนาดเล็กได้ดีที่สุด คือ ใช้เอทานอล 36.4 เปอร์เซ็นต์ SPAN 83 3.6 เปอร์เซ็นต์ น้ำ 10 เปอร์เซ็นต์ และไขมันสัตว์ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แต่ด้วยปัญหาที่พบคราบตะกอนแข็งของคาร์บอน เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และความหนืดของน้ำมันเครื่องที่เพิ่มขึ้น ในการใช้น้ำมันจากการทำอิมัลชันขนาดเล็กจึงเป็นสาเหตุให้ต้องมีการพัฒนาวิธีการผลิตไบโอดีเซลไปสู่การทำให้แตกตัวด้วยความร้อน

การทำให้แตกตัวด้วยความร้อน คือ กระบวนการเปลี่ยนสารตั้งต้นชนิดหนึ่งไปเป็นอีกชนิดหนึ่งโดยอาศัยความร้อนและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย ซึ่งการแตกตัวด้วยความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้กับน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ และกรดไขมันตามธรรมชาติ จากรายงานพบว่า การแตกตัวด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์สามารถทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ได้ดี เมื่อนำน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้ไปใช้กับเครื่องยนต์ พบว่าน้ำมันมีค่าความหนืดต่ำ มีค่าซีเทนสูง และมีการแตกตัวของพันธะเคมีให้ผลผลิตเป็นอนุภาคนาโนเล็กกลอง (Sonntag, 1979 และ Fukuda *et al.*, 2001)

Schwab *et al.* (1988) ศึกษาการใช้ น้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันดอกคำฝอยที่มีปริมาณกรดโอเลอิกสูงมาทำการไพโรไลซิส พบว่า ได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอน 73-77 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารตั้งต้น และได้ 80-88 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้น้ำมันดอกคำฝอยเป็นสารตั้งต้น โดยองค์ประกอบหลักที่ได้จะเป็นอัลเคนและอัลคีน มีปริมาณรวมกันประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักทั้งหมด มีกรดคาร์บอกซิลิกประมาณ 9.6-16.1 เปอร์เซ็นต์ โดยกลไกการแตกสลายด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 กลไกการแตกสลายด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์

ที่มา: Schwab *et al.* (1988)

Onay and Kockar (2004) ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์แบบ Fixed Bed 2 ชนิดได้แก่ แบบ Heinze และแบบ Well-swept พบว่า เมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ Heinze อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 550 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ 51.7 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ Well-swept อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 300 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ 68 เปอร์เซ็นต์

Adebanjo *et al.* (2004) ทำการทดลองโดยใช้การทำให้แตกตัวด้วยความร้อนในการผลิต ไบโอดีเซลจากน้ำมันหมู ซึ่งในการทดลองจะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ Fixed-Bed อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่าน้ำมันที่ได้มีค่าซีเทน 46 ค่าความถ่วงจำเพาะ 0.86 และให้ค่าความร้อน 40 MJ/kg จากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำน้ำมันหมูที่ผ่านกระบวนการนี้ไปใช้

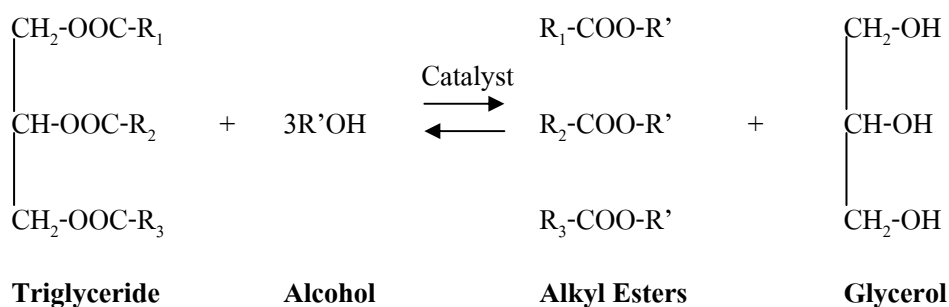
Onay and Kockar (2006) ทำการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากเมล็ดเรฟ โดยใช้การทำให้แตกตัวด้วยความร้อนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบ Free Fall ที่อุณหภูมิ 400-700 องศาเซลเซียส พบว่าน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากเมล็ดเรฟ สามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้

Dai (2006) ได้ใช้กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนร่วมกับการใช้อะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30-50 นาที จากนั้นทำการควบแน่นไอของน้ำมันได้เป็นน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันไบโอดีเซลสูงกว่า 85 เปอร์เซ็นต์อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้จะไม่เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและเอสเทอร์ฟิเคชัน

อย่างไรก็ตาม กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนมีข้อเสีย คือ เครื่องมือมีราคาแพง ขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกับแก๊สโซลีนมากกว่าน้ำมันดีเซล และออกซิเจนที่ถูกกำจัดออกไประหว่างกระบวนการไพโรไลซิสจะทำให้เกิดผลเสียต่อสภาพแวดล้อมเนื่องจากข้อเสียจากการผลิตตามวิธีกระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน จึงมีการปรับกระบวนการผลิตมาในรูปแบบการใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถแก้ไขข้อบกพร่องของกระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนได้

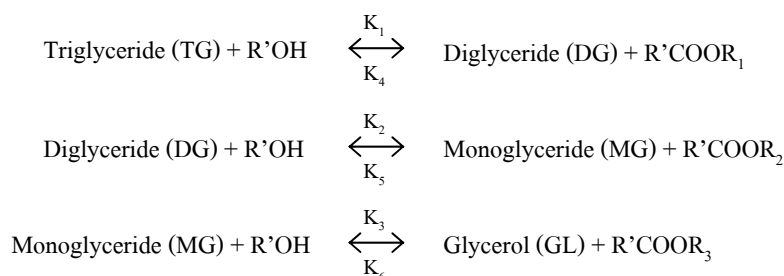
2.1.4 การใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Alcoholysis เป็นปฏิกิริยาของไขมันและน้ำมันกับแอลกอฮอล์ ที่ทำให้เกิดอัลคิลเอสเทอร์ (Biodiesel) กับกลีเซอรอล ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วยเพื่อลดเวลาที่ใช้ในปฏิกิริยา และเพิ่มปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้เพราะปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้



ภาพที่ 7 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) ของไตรกลีเซอไรด์

การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

แอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาจะมีอะตอมของคาร์บอนอยู่ในช่วง 1-8 คาร์บอนอะตอม (Sprules and Price, 1950) โดยแอลกอฮอล์ที่สามารถใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้แก่ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล และเอมิลแอลกอฮอล์ แต่แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ในปฏิกิริยานี้ คือ เมทานอล เนื่องจากมีราคาถูก สายโซ่คาร์บอนสั้น ความมีขี้ผึ้งสูง ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วและจากปฏิกิริยาในภาพที่ 7 จะต้องใช้สัดส่วนระหว่างแอลกอฮอล์กับไตรกลีเซอไรด์เท่ากับ 3:1 โดยคุณสมบัติของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่สำคัญที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแสดงดังตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของสารในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

สารในปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	ความถ่วง จำเพาะ	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	การละลาย (>10 เปอร์เซ็นต์)
เมทิลไมริสเตท (Methyl Myristate)	0.875(75)	18.8	-	-
เมทิลปาล์มมิเตท (Methyl Palmitate)	0.825(75)	30.6	196.0	กรด เบนซีน เอทานอล เอทิลออกไซด์
เมทิลสเตียเรท (Methyl Stearate)	0.850	38.0	215.0	เอทิลออกไซด์ คลอโรฟอร์ม
เมทิลโอเลอิก (Methyl Oleate)	0.875	-19.8	190.0	เอทานอล เอทิลออกไซด์
เมทานอล	0.792	-97.0	64.7	น้ำ อีเทอร์ เอทานอล
เอทานอล	0.789	-112.0	78.4	น้ำ อีเทอร์
กลีเซอรอล	1.260	17.9	290.0	น้ำ เอทานอล

ที่มา: Ma and Hanna (1999)

ตารางที่ 4 จุดหลอมเหลวของกรดไขมัน เมทิลเอสเทอร์ และ โมโน/ได/ไตรกลีเซอไรด์

กรดไขมัน			จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)			
ชื่อ	จำนวน คาร์บอน	กรด	เมทิลเอส เทอร์	1-โมโนกลี เซอไรด์	1,3-ไดกลีเซอ ไรด์	ไตรกลีเซอ ไรด์
กรดไมริสติก (Myristic)	14	54.4	18.8	70.5	66.8	57.0
กรดปาล์มเมติก (Palmitic)	16	62.9	30.6	77.0	76.3	63.5

ตารางที่ 4 (ต่อ)

กรดไขมัน			จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)			
ชื่อ	จำนวน คาร์บอน	กรด	เมทิลเอส เทอร์	1-โมโนกลี เซอไรด์	1,3-ไดกลีเซอ ไรด์	ไตรกลีเซอ ไรด์
กรดสเตียริก (Stearic)	18	69.6	39.1	81.5	79.4	73.1
กรดโอเลอิก (Oleic)	18:1	16.3	-19.8	35.2	21.5	5.5
กรดลิโนลิก (Linoleic)	18:2	-6.5	-35.0	12.3	-2.6	-13.1

ที่มา: Ma and Hanna (1999)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทดังนี้

1. ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
3. ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
4. กระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน

โดยรายละเอียดของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแต่ละประเภทสามารถอธิบายได้ดังนี้

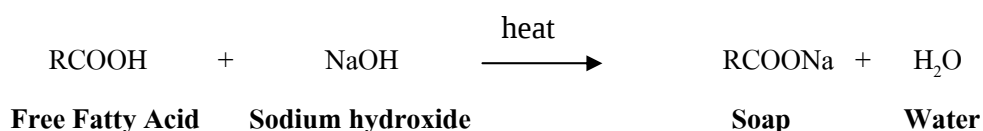
1. ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้นิยมใช้ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานี้ ควรใช้ค่าสัดส่วนระหว่างเมทานอลกับไตรกลีเซอไรด์ในช่วง 3:1 ถึง 6:1

น้ำมันที่ใช้ในปฏิกิริยานี้สามารถใช้ไขมันพืชได้หลายชนิด เช่น น้ำมันข้าวโพด น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะกอก และน้ำมันปาล์ม เป็นต้น ส่วนวิธีการที่จะเลือกน้ำมันชนิดใดมาเป็นสารตั้งต้นในการทำไบโอดีเซลนั้น ควรพิจารณาจากราคาในท้องตลาดของน้ำมันชนิดนั้นๆ

จากงานวิจัยของ Barnwal and Sharma (2005) และ Srivastava and Prasad (2000) พบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ ตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญคืออุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา ซึ่งโดยมาตรฐานแล้วจะใช้ที่ 60 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ด้วย อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วง 25 ถึง 120 องศาเซลเซียส

การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากให้ค่าผลผลิตสูง และมีค่าการก่อกวนต่ำเมื่อเทียบกับการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ข้อจำกัดของการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันคือ ถ้ามีน้ำและกรดไขมันอิสระในสารตัวอย่างมากเกินไปจะทำให้เสี่ยงต่อการเกิดสบู่ในปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 9 ทำให้ต้องเพิ่มต้นทุนในการแยก และทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลง



ภาพที่ 9 ปฏิกิริยาสaponification ของกรดไขมันอิสระ

Darnoko and Cheryan (2000) ทำการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาเท่ากับ 60 ± 2 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันถั่วเหลืองเท่ากับ 6:1 จากผลการทดลองพบว่า 90 ถึง 98 เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันถั่วเหลืองจะเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์

Meher *et al.* (2006) ทำการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมัน Karanja พบว่าที่สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมัน Karanja คือ ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง ซึ่งในสภาวะการทดลองนี้ให้ค่าร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์มากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ ในเวลาเพียง 15 นาที และเมื่อปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์จะให้ค่าร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 97-98 เปอร์เซ็นต์

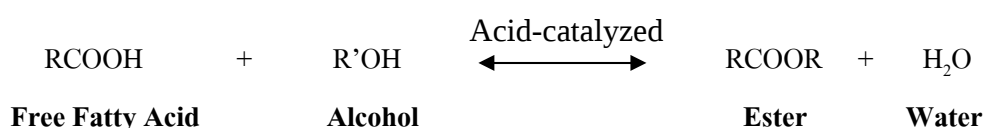
Rashid and Anwar (2008) ทำการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ พบว่าที่สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ คือ ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วในการกวน 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ซึ่งในสภาวะการทดลองนี้ให้ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 96 เปอร์เซ็นต์

2. ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยทั่วไปแล้วกรดที่ใช้ในปฏิกิริยานี้จะเป็นกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก การใช้กรดเป็นตัวเร่งจะให้ค่าผลผลิตสูง แต่การเกิดปฏิกิริยาก่อนข้างช้า (โดยปกติแล้วต้องการเวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่า 1 วัน ในการทำปฏิกิริยาให้สมบูรณ์) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) ดังแสดงในภาพที่ 10 และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ซึ่งใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานาน เนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากกว่า กรดไขมันอิสระ นอกจากนี้ผลพลอยได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน คือ น้ำ ซึ่งน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดลดลงอย่างมาก ทำให้เอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันลดลง (Saka and Kusdiana, 2004)

โดยทั่วไปแล้วสภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะใช้ค่าสัดส่วนระหว่างเมทานอลกับไตรกลีเซอไรด์เท่ากับ 30 : 1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ใช้จะอยู่ในช่วง 55 ถึง 80 องศาเซลเซียส

การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิยมใช้น้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูง เนื่องจากไม่ทำให้เกิดสบู่ขึ้นในปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นก็มีข้อเสีย คือ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน นอกจากนี้ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีนี้ยังต้องมีกระบวนการกำจัดกรดส่วนเกิน ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงกว่าการใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 10 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ

Schuchardt *et al.* (1998) กล่าวว่า กรดซัลฟูริก และกรดซัลโฟนิก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ปริมาณเอสเทอร์สูง แต่ปฏิกิริยาที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานกว่า 3 ชั่วโมง ปฏิกิริยาจึงจะเกิดสมบูรณ์ และต้องใช้อุณหภูมิมากกว่า 100 องศาเซลเซียส

Zullaikah *et al.* (2005) ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันรำข้าวที่มีกรดไขมันอิสระเจือปนตั้งแต่ 6.6-7 เปอร์เซ็นต์ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 10:1 ใช้ตัวเร่งเป็นกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ามีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ถึง 96 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 8 ชั่วโมง

Chongkhong *et al.* (2007) ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม ซึ่งทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 8:1 ใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 1.834 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที พบว่า ที่สภาวะในการทดลองนี้สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระจาก 93 เปอร์เซ็นต์ จนเหลือน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์

3. ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น สามารถนำมาใช้กับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันได้อีกด้วย ซึ่งการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีทั้งข้อดีและข้อเสียดังแสดงในตารางที่ 5

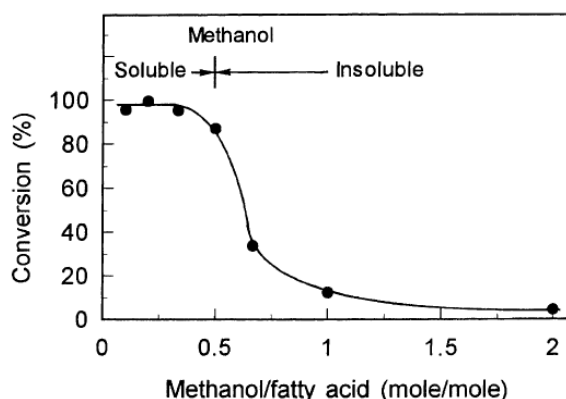
ตารางที่ 5 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ข้อดี	ข้อเสีย
1. สามารถนำเอนไซม์กลับมาใช้ใหม่ได้	1. มีการสูญเสียอนุภาคของน้ำมันในช่วงเอนไซม์เริ่มทำงาน
2. สามารถใช้เอนไซม์ที่มีความเข้มข้นสูงเพื่อที่จะทำปฏิกิริยาเป็นเวลานาน	2. จำนวนเอนไซม์ไม่แน่นอน
3. ขณะที่มีการทำปฏิกิริยาอุณหภูมิจะไม่มีเปลี่ยนแปลง	3. ราคาแพง
4. สามารถแยกเอนไซม์ออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย	

ที่มา: Marchetti *et al.* (2005)

Nelson *et al.* (2006) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการนำน้ำมันมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ไลเปส *R.miehei* ที่ตรึงไว้มาทำปฏิกิริยาและมีเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย สามารถผลิตเอสเทอร์ได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์

Shimada *et al.* (2002) ทำการทดลองโดยใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้วและเมทานอล ซึ่งในการทดลองนี้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างปริมาณเมทานอลกับปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง ผลการทดลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระมากกว่า 0.5 จะทำให้การทำงานของเอนไซม์ไลเปสลดลง ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างปริมาณเมทานอลกับปริมาณกรดไขมันอิสระที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เอนไซม์ไลเปส *C. antarctica*

ที่มา: Shimada *et al.* (2002)

เนื่องจากเอนไซม์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีราคาแพง วิธีการนี้จึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก แต่ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนแรก จากนั้นจึงใช้ไลเปสเข้าทำปฏิกิริยาต่อเพื่อให้เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ที่ได้ในผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ซึ่งวิธีนี้ก็สามารถลดต้นทุนในส่วนของไลเปสลงได้ (Fukuda *et al.*, 2001)

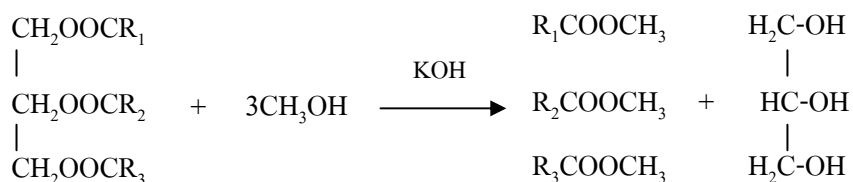
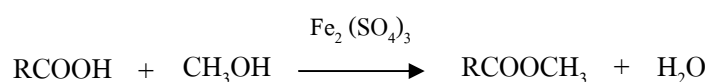
4. กระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน

เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล จึงได้มีการพยายามที่จะนำน้ำมันใช้แล้วหรือน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์มาใช้ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล แต่เนื่องจากน้ำมันเหล่านี้มักจะประกอบไปด้วยกรดไขมันอิสระเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะเกิดปัญหากับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส (Wang *et al.*, 2007) เนื่องจากจะทำให้เกิดสบู่ ดังนั้นจึงมีการแก้ปัญหาโดยการนำน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงมาทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด แต่การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นต้องใช้แอลกอฮอล์ในปริมาณมากในการผลิตไบโอดีเซล และปริมาณเอสเทอร์ที่ได้มีปริมาณน้อย ดังนั้นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เนื่องจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนมีข้อดีหลายด้าน เช่น มีประสิทธิภาพในการผลิตสูง และอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลมีราคาถูก โดยกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนนั้น ในขั้นแรกจะทำปฏิกิริยาโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อลดปริมาณของกรดไขมันอิสระ เมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระมีค่าน้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสจะ

ถูกนำมาใช้ในขั้นตอนที่สอง เพื่อเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็นเอสเทอร์ อย่างไรก็ตาม การผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนก็มีข้อเสีย คือ ไม่สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ (Zhang *et al.*, 2003)

Keim (1945) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม ที่ประกอบไปด้วยกรดไขมันอิสระถึง 50.8 เปอร์เซ็นต์ ใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ 0.75 เปอร์เซ็นต์ ใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากทำปฏิกิริยาโดยใช้กรดเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระแล้ว จึงทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสที่มีความเข้มข้น 1.25 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณเอสเทอร์เท่ากับ 97 เปอร์เซ็นต์

เพื่อที่จะนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ Wang *et al.* (2006b) จึงใช้ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนแรกแทนการใช้กรดซัลฟิวริก เนื่องจากน้ำมันที่ใช้แล้วมีปริมาณของกรดไขมันอิสระสูงถึง 75.92 mgKOH/g โดยกรดไขมันอิสระของน้ำมันใช้แล้วจะทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับเมทานอล จากนั้นในขั้นตอนที่สองจึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนแรกไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกับเมทานอล โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรตที่มีความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันใช้แล้วเท่ากับ 10:1 อุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยา คือ 95 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง เมื่อนำมาทดลองต่อในขั้นตอนที่สองโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ผลการทดลองพบว่าได้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 97.02 เปอร์เซ็นต์ โดยปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน

ที่มา: Wang *et al.* (2006b)

El-Mashad *et al.* (2008) ทำการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปลาแซลมอน ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากกระบวนการผลิตแซลมอน ที่ประกอบไปด้วยกรดไขมันอิสระถึง 12 เปอร์เซ็นต์ ในขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ 1 เปอร์เซ็นต์ ในการทำปฏิกิริยาเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระ พบว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระลดลงจาก 12 เป็น 3 mgKOH/g จากนั้นจึงทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันต่อโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 52 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 9.2:1 ได้ปริมาณร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์

Veljkovic *et al.* (2006) ทำการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันจากเมล็ดยาสูบ ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง จึงจำเป็นต้องใช้กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 18:1 และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที ในการลดกรดไขมันอิสระให้น้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาต่อในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที จากผลการทดลองพบว่าได้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 91 เปอร์เซ็นต์

Berchmans and Hirata (2008) ทำการศึกษการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยวิธีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ใช้กรดซัลฟิวริก ส่วนขั้นตอนที่ 2 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ จากการศึกษพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน

0.60 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปริมาณกรดซัลฟิวริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ส่วนขั้นตอนที่ 2 ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 0.24 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์

สุวภัทร์ (2550) ทำการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบโดยวิธีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ใช้กรดซัลฟิวริก และขั้นตอนที่ 2 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ ขั้นตอนที่ 1 ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบที่ 12:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปริมาณกรดซัลฟิวริก 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ส่วนในขั้นตอนที่ 2 ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 12:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 97.33 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้พบว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากน้ำมันปาล์มดิบ มีค่าความหนาแน่น ความหนืด จุลวาวไฟ และค่าความเป็นกรด ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM 6751-02 ส่วนจุดหมอกควันและจุดไหลเทยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

จริญญา (2550) ทำการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน จากน้ำมันสุญุดำและเมทานอล จากผลการทดลองพบว่า การสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยวิธีการผลิตแบบสองขั้นตอนมีเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงที่สุดเท่ากับ 99.69 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการทดลองในขั้นตอนแรกที ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 20:1 ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ขั้นตอนที่สอง ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ จากการทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ พบว่าคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM โดยพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ 40 องศาเซลเซียส มีค่าความหนืดเท่ากับ 4.02 เซนติสโตกส์ ที่ 15 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 880 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จุดไหลเท 1 องศาเซลเซียส จุดหมอกควันเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส และจุลวาวไฟที่ 220 องศาเซลเซียส

การเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีต่าง ๆ

การผลิตไบโอดีเซลสามารถทำได้หลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน จากที่กล่าวมาข้างต้น โดยในตารางที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการต่างๆ

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบความแตกต่างของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

คุณสมบัติในการทำ ปฏิกิริยา	กระบวนการผลิตโดยใช้			
	กรดเป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยา ^a	เบสเป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยา ^a	เอนไซม์ ไลเปสเป็นตัว เร่งปฏิกิริยา ^a	ตัวเร่ง ปฏิกิริยาแบบ สองขั้นตอน ^b
กรดไขมันอิสระใน น้ำมันพืชหรือสัตว์	เอสเทอร์	เกิดผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ต้องการ	เอสเทอร์	เอสเทอร์
ปริมาณน้ำในน้ำมันพืช หรือสัตว์	รบกวนการ เกิดปฏิกิริยา	รบกวนการ เกิดปฏิกิริยา	ไม่ส่งผลต่อ ปฏิกิริยา	รบกวนการ เกิดปฏิกิริยา
อุณหภูมิในการทำ ปฏิกิริยา	55-80	60-70	30-40	50-60
(องศาเซลเซียส)				
ปริมาณเอสเทอร์	ปกติ	ปกติ	สูง	สูง
การแยกกลีเซอรอลออก จากผลิตภัณฑ์	ยาก	ยาก	ง่าย	ยาก
การแยกสารเพื่อให้ ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์	ทำการแยก หลายขั้นตอน	ทำการแยก หลายขั้นตอน	ไม่ต้องมี	ทำการแยก หลายขั้นตอน
ราคาของผลิตภัณฑ์ที่ได้	ราคาถูก	ราคาถูก	ค่อนข้างแพง	ราคาถูก

ที่มา: ^a Marchetti *et al.* (2005)

^b Wang *et al.* (2006b)

2.2 ข้อกำหนดและมาตรฐานวิธีการทดสอบไบโอดีเซล

ข้อกำหนดและมาตรฐานวิธีการทดสอบไบโอดีเซล ดังแสดงในตารางที่ 7 และมาตรฐานวิธีการทดสอบไบโอดีเซลชุมชน ดังตารางที่ 8 คือ

2.2.1 การตรวจสอบคุณสมบัติทั่วไปที่เป็นคุณภาพที่ดีของน้ำมัน ได้แก่ ค่าความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ ปริมาณกำมะถัน ปริมาณกากถ่าน จำนวนซีเทน ปริมาณเถ้าซัลเฟต ปริมาณน้ำ สิ่งเจือปนทั้งหมด การกัดกร่อนผิวทองแดง ค่าความเป็นกรด และปริมาณโลหะอัลคาไล และ อัลคาไลเอิร์ทที่ปนเปื้อน

2.2.2 การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ ได้แก่

ก. ปริมาณเมทิลเอสเทอร์และกรดลิโนเลนิกเอสเทอร์ (สัดส่วนของปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ในเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันทั้งหมด) ซึ่งจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ที่ใช้

ข. ปริมาณเมทานอล โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมด ซึ่งกำหนดเกณฑ์ให้มีสารเหล่านี้อยู่ในปริมาณน้อย เพราะเป็นการบ่งบอกถึงความสำเร็จของการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำมันพืชและสัตว์กับเมทานอล และมีกระบวนการแยกกลีเซอรินที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกไปได้เป็นอย่างดี

ค. ทดสอบความมีเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และค่าไอโอดีนเนื่องจากไบโอดีเซลผลิตจากน้ำมันพืชจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวกับออกซิเจนในอากาศส่งผลต่อเสถียรภาพการเก็บ

ตารางที่ 7 ข้อกำหนดคุณสมบัติของไบโอดีเซลและวิธีการตรวจสอบ

รายการ	คุณสมบัติ	ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ
1	เมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	860-900	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตกส์)	3.5-5.0	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
5	กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.0010	ASTM D 2622
6	กากถ่าน ร้อยละ 10 ของกากถ่านที่เหลือจาก การกลั่น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.30	ASTM D 4530
7	ค่าซีเทน	ไม่ต่ำกว่า 51	ASTM D 613
8	เถ้าซิลิเฟอรัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D 874
9	น้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.050	ASTM D 2709
10	สิ่งเจือปนทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.0024	ASTM D 5452
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	ไม่สูงกว่า หมายเลข 1	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (ชั่วโมง)	ไม่ต่ำกว่า 6	EN 14112
13	ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)	ไม่สูงกว่า 0.50	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัม)	120	EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	12.0	EN 14103
16	เมทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.20	EN 14110
17	โมนอกลิเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.80	EN 14105
18	ไดกลิเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.20	EN 14105
19	ไตรกลิเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.20	EN 14105
20	กลิเซอรินอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.02	EN 14105

ตารางที่ 7 (ต่อ)

รายการ	คุณสมบัติ	ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ
21	กลีเซอรินทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่มที่ 1 : โซเดียมและโพแทสเซียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	5.0	EN 14108 และ EN 14109
	โลหะกลุ่มที่ 2 : แคลเซียมและแมกนีเซียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	5.0	PrEN 14538
23	ฟอสฟอรัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.0010	ASTM D 4951
24	สารเติมแต่ง (ถ้ามี)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบ จากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน	

ที่มา: ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (2549)

ตารางที่ 8 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549

คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง	หน่วย	วิธีทดสอบ	เกณฑ์ต่ำสุด	เกณฑ์สูงสุด
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C	กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	ASTM D 1298	860	900
ค่าความหนืดที่ 40 °C	เซนติสโตกส์	ASTM D 445	1.9	8.0
จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	ASTM 93	120	-
ปริมาณกำมะถัน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D 2622	-	0.0015
ค่าซีเทน		ASTM D 613	47	
ค่าซีลเฟต	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D 874	-	0.02
น้ำและตะกอน	ร้อยละโดยปริมาตร	ASTM D 2709	-	0.2

ตารางที่ 8 (ต่อ)

คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง	หน่วย	วิธีทดสอบ	เกณฑ์ ต่ำสุด	เกณฑ์ สูงสุด
ค่าความเป็นกรด	มิลลิกรัมโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์/กรัม	ASTM D 664	-	0.80
กลีเซอรินอิสระ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D 6584	-	0.02
กลีเซอรินทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D 6584	-	1.5
สี			ม่วง ¹	ตรวจพินิจ ด้วยสายตา
สารเติมแต่ง (ถ้ามี)		ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน		

หมายเหตุ ¹ ใช้สารประกอบประเภท 1, 4-dialkylamino anthraquinone และ alkyl derivatives of azobenzene-4-azo-2-naphthol

ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน (2549)

3. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

3.1 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

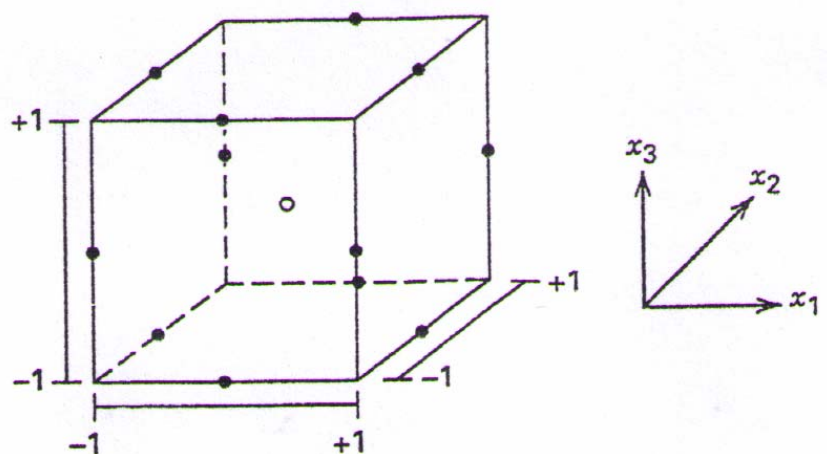
การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพิดพื้นที่การตอบสนอง การออกแบบแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกซ์ไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการทดลองที่ต่องานมีจำนวนน้อย

จากตารางที่ 9 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัว รูปทรงเรขาคณิตของการออกแบบแสดงดังภาพที่ 13 พบว่า การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลม ที่จุดวางอยู่บนวงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ นอกจากนี้ การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัว

แปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือการรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการ

ตารางที่ 9 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร

RUN	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0



ภาพที่ 13 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนสำหรับ 3 ตัวแปร

3.2 พื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

พื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยให้ผลที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้ ซึ่ง ยกตัวอย่างเช่น สมมติต้องการหาระดับของอุณหภูมิ (x_1) และความดัน (x_2) ที่จะทำให้ผลผลิตจากกระบวนการมีค่ามากที่สุด ผลของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิกับความดัน กล่าวคือ

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (1)$$

โดยที่

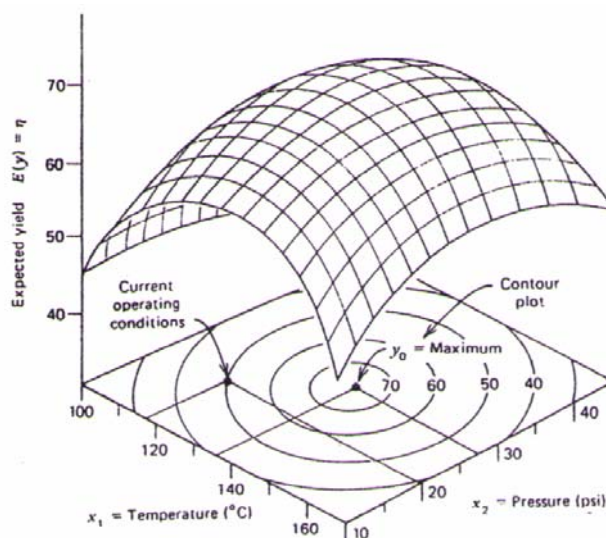
ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า

$$E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$$

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2)$$

ซึ่งเรียกว่า “พื้นที่การตอบสนอง (Response Surface)”

การแสดงผลที่การตอบสนองในรูปแบบของกราฟจะแสดงตัวอย่างในภาพที่ 14 โดย η จะพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 ซึ่งจะพล็อตในรูปแบบ Contour Plot



ภาพที่ 14 พื้นที่การตอบสนองแบบ 3 มิติและกราฟเส้นโครงร่าง

3.3 การวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Regression Analysis)

การวิเคราะห์แบบถดถอยเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ประเภทคือ ตัวแปรตาม (Dependent Variable: นิยมใช้สัญลักษณ์ Y) และตัวแปรอิสระ (Independent Variable: นิยมใช้สัญลักษณ์ X) โดยมุ่งเน้นที่จะพยากรณ์ตัวแปรตามด้วยค่าความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ ซึ่งเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) การหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยจะทำให้หลังจากที่ได้สร้างหรือกำหนดรูปแบบของความสัมพันธ์ (Model) (ศิริชัย, 2548) ซึ่งในการออกแบบแบบ Response Surface Methodology นั้นมีรูปแบบของแบบจำลองอยู่ 4 แบบจำลองคือ Linear model, Linear + Interaction model, Linear + Square model และ Full Quadratic model ดังสมการที่ 3-6

Linear model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i \quad (3)$$

Linear + Interaction model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 \beta_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

Linear + Square model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_i^2 \quad (5)$$

Full Quadratic model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 \beta_{ij} x_{ij} \quad (6)$$

3.4 วิธีการพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ Response Surface Methodology ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีอยู่ 4 รูปแบบ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นการนำรูปแบบใดมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ ควรจะต้องมีหลักการในการเลือกตัวแบบจำลองที่มีความเหมาะสม โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error: SE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) ซึ่งมีหลักการดังนี้

3.4.1 พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error: SE)

ถ้ามูลค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่าน้อย แสดงว่าตัวแบบจำลองที่นำมาใช้มีความเหมาะสมค่อนข้างมาก แต่ถ้ามูลค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่ามาก แสดงว่าตัวแบบจำลองที่นำมาใช้มีความเหมาะสมน้อยมาก และถ้าในกรณีที่ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่าต่ำศูนย์ แสดงว่าตัวแบบจำลองมีความเหมาะสมดีมาก

3.4.2 พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ตัวแบบจำลองที่ดีควรจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเข้าใกล้ 1 หรือ เท่ากับ 1 ซึ่งแสดงว่าตัวแปรอิสระที่อยู่ในตัวแบบจำลองสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้ดี

โดยค่า R^2 (adj) เป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว ใช้ประกอบการพิจารณาเมื่อข้อมูลมีจำนวนน้อยกว่า 30 ตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-k-1} \times (1 - R^2) \quad (7)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} n &= \text{จำนวนการทดลอง} \\ k &= \text{จำนวนสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง} \end{aligned}$$

3.5 วิธีการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i)

เป็นการตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัว ที่นำมาใช้ในตัวแบบจำลองสามารถนำมาใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้หรือไม่ โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) มีการทดสอบ 2 ลักษณะดังนี้

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมๆ กัน โดยกำหนดสมมติฐานทางสถิติ ดังนี้

$$H_0 : \beta_i = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad \text{หรือตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม}$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \quad \text{อย่างน้อย 1 ตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม}$$

ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F-test หรือ สามารถดูจากค่า p -value ได้ โดยผู้ทดสอบจะต้องกำหนดระดับนัยสำคัญ (α) มาก่อน ถ้า p -value มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญ (α) จะตัดสินใจยอมรับสมมติฐาน H_0 นั่นคือตัวแปรอิสระทุกตัวในแบบจำลองไม่สามารถใช้พยากรณ์ตัว

แปรตามได้ แต่ถ้า p -value มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ (α) จะตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน H_0 (หรือยอมรับสมมติฐาน H_1) นั่นคือตัวแปรอิสระในแบบจำลองอย่างน้อย 1 ตัว สามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวโดยกำหนดสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \beta_i = 0 \quad \text{หรือตัวแปรอิสระที่ } i \text{ ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม}$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \quad \text{หรือตัวแปรอิสระที่ } i \text{ มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม}$$

ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ F-test หรือสามารถพิจารณาค่า p -value ก็ได้ โดยผู้ทดสอบกำหนดระดับนัยสำคัญ (α) ถ้า p -value ของตัวแปรที่ i มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้นตัดสินใจยอมรับสมมติฐาน H_0 แสดงว่าตัวแปรอิสระที่ i ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม แต่ถ้า p -value ของตัวแปรที่ i มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้นตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน H_0 นั่นแสดงว่าตัวแปรอิสระที่ i มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

3.6 การวิเคราะห์ความไม่สมรูปของแบบจำลอง (Test for Lack of Fit)

การวิเคราะห์ผลจาก Response Surface Methodology เป็นการวิเคราะห์ความไม่สมรูปของแบบจำลอง ซึ่งถือเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้สำหรับทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เนื่องจากมีการทดลองซ้ำที่จุดกึ่งกลาง ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาได้จากผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนจากส่วนตกค้าง (Sum of Square of the Residual Error: SS_E) โดยค่าความคลาดเคลื่อนจากส่วนตกค้างสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ SS_{PE} และ SS_{LOF} ดังสมการที่ 8

$$SS_E = SS_{PE} + SS_{LOF} \quad (8)$$

โดยที่

SS_{PE} คือ ผลรวมของกำลังสองที่เกิดขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดโดยตรง
 SS_{LOF} คือ ผลรวมของกำลังสองที่เกิดขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจาก Lack of fit

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน
 - 1.1 เครื่องกวนให้ความร้อน (SCHOTT, บริษัท Scientific Promotion Co., Ltd)
 - 1.2 เครื่องแก้ว เช่น ขวดรูปชมพู่ กรวยแยก ปีกเกอร์ (Pyrex, บริษัท Labsystem Co., Ltd)
 - 1.3 แผ่นฟิล์มปิดปีกเกอร์ (Parafilm, บริษัท Pechiney Plastic Packaging)
 - 1.4 ชุดอุปกรณ์ควบแน่น (บริษัท Labsystem Co., Ltd)
 - 1.5 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (Ohaus, รุ่น Adventure บริษัท Ohaus Corp)
2. อุปกรณ์การวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
 - 2.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (รุ่น GC-2010, บริษัท J&W Scientific)
 - Capillary column ชนิด polyethylene glycol stationary phase (DB-WAX ความยาว 30 เมตร ความหนา 0.25 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.32 มิลลิเมตร)
 - Split injector (อัตราเร็ว 20-100 มิลลิลิตร/นาที่ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส)
 - เฟลมไอออไนเซชัน ดีเทกเตอร์ (อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส)
 - 2.2 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (Ohaus รุ่น Adventure บริษัท Ohaus Corp)

สารเคมี

1. สารเคมีสำหรับการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน
 - 1.1 น้ำมันสบู่ดำ (จากเมล็ดสบู่ดำสด)
 - 1.2 เมทานอล (ความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ จากบริษัท Carlo Erba Reagent)
 - 1.3 ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต (ความบริสุทธิ์ 97 เปอร์เซ็นต์ จากบริษัท ALDRICH)
 - 1.4 โซเดียมซัลเฟต (ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ จากบริษัท Merck KGaA)
 - 1.5 ฟีนอล์ฟทาลีน (ความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ จากบริษัท Carlo Erba Reagent)
 - 1.6 เอ็น - โพรพานอล (ความบริสุทธิ์ 96 เปอร์เซ็นต์ จากบริษัท Fluka)

1.7 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ความบริสุทธิ์ 98 เปอร์เซ็นต์ จากบริษัท Carlo Erba Reagent)

2. สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

2.1 เอ็น- เฮปเทน (ความบริสุทธิ์ 98 เปอร์เซ็นต์ จากบริษัท Fluka)

2.2 Tricaprin (Analytical grade บริษัท Fluka)

2.3 เมทิลเฮปตะดีคาโนเอท (ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ จากบริษัท Fluka)

วิธีการ

1. การเตรียมน้ำมันสนูปดำ

นำน้ำมันสนูปดำที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกและนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

2. การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน

2.1 ขั้นตอนที่ 1 การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1.1 ชั่งน้ำมันสนูปดำ 30 กรัม ใส่ลงในขวดก้นกลม

2.1.2 นำน้ำมันสนูปดำมาอุ่นประมาณ 10 นาที

2.1.3 เตรียมเมทานอลตามอัตราส่วนโดยโมลที่กำหนด

2.1.4 ชั่งไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต และนำเมทานอลกับกรดซัลฟิวริกที่เตรียมไว้ไปผสมกับน้ำมันสนูปดำ โดยทำการประกอบเครื่องมือดังภาพที่ 15 (ในการทำปฏิกิริยาต้องควบคุมอุณหภูมิและความเร็วรอบการหมุนของแท่งแม่เหล็กให้คงที่ที่ 400 รอบต่อนาที ตลอดระยะเวลาที่กำหนด)

2.1.5 เมื่อทำปฏิกิริยาจนครบกำหนดเวลาที่ตั้งไว้ เทสารในขวดก้นกลมลงในกรวยแยกทำการแยกผลิตภัณฑ์ที่อยู่ด้านล่างออกเพื่อนำไปทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่สองต่อไป

2.2 ขั้นตอนที่ 2 การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.2.1 นำผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนที่หนึ่งมาซึ่งน้ำหนัก 30 กรัม ใส่ลงในขวดก้นกลม

2.2.2 นำผลิตภัณฑ์มาอุ่นประมาณ 10 นาที ที่อุณหภูมิประมาณ 50 ± 5 องศาเซลเซียส

2.2.3 เตรียมเมทานอลตามอัตราส่วนโดยโมลที่กำหนดไว้

2.2.4 ชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ตามที่ต้องการและนำไปละลายในเมทานอลที่เตรียมไว้

2.2.5 นำสารละลายที่เตรียมได้ผสมกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนที่หนึ่งลงในขวดก้นกลม โดยอุปกรณ์ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 15 (ในการทำปฏิกิริยาต้องควบคุมอุณหภูมิและความเร็วรอบการหมุนของแท่งแม่เหล็กให้คงที่ที่ 400 รอบต่อนาที ตลอดระยะเวลาที่กำหนด)

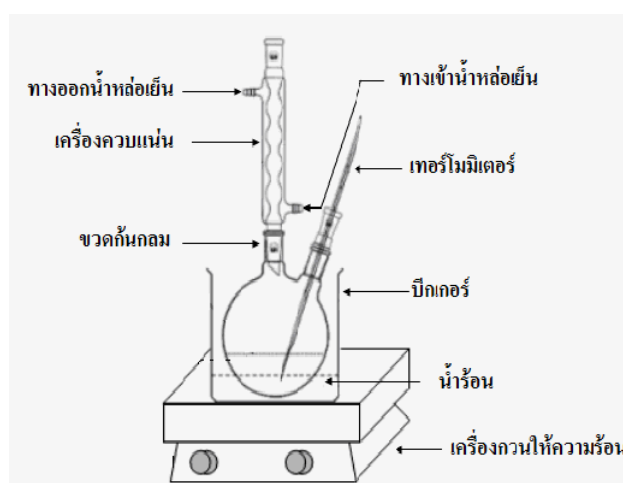
2.2.6 เมื่อทำปฏิกิริยาจนครบกำหนดเวลาที่ตั้งไว้ ให้ทำการเทผลิตภัณฑ์ลงในกรวยแยกตั้งทิ้งไว้ 1 คืน แล้วทำการแยกกลีเซอรอลที่อยู่ชั้นล่างออก ให้เหลือแต่ด้านบนซึ่งเป็นเมทิลเอสเทอร์

2.2.7 นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 62 ± 1 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยเมทานอลที่เหลืออยู่ออกให้หมด

2.2.8 จากนั้นทำการล้างผลิตภัณฑ์ในกรวยแยกด้วยน้ำกลั่น ทำการล้างซ้ำจนกระทั่งกำจัดกลีเซอรอลออกหมด แล้วเติมโซเดียมซัลเฟต 1 กรัม เพื่อทำการดูดน้ำที่อาจยังหลงเหลืออยู่

2.2.9 นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 เพื่อแยกโซเดียมซัลเฟตออกและนำผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการกรองไปทำการวิเคราะห์ผลต่อไป

2.2.10 แต่ละสภาวะการทดลองจะทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง



ภาพที่ 15 เครื่องมือผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน

3. การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ด้วยโปรแกรม MINITAB

ออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลด้วยโปรแกรม MINITAB Release 14 โดยเลือกการออกแบบแบบ Box-Behnken (Myers and Montgomery, 2002) โดยมีตัวแปร (variable) ที่เลือกศึกษาและมีอิทธิพลต่อการผลิตไบโอดีเซลจำนวน 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน โดยอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามี 3 ระดับคือ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มี 3 ระดับคือ 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันมี 3 ระดับคือ 3:1 6:1 และ 9:1 ดังแสดงในตารางที่ 10 และเมื่อใช้โปรแกรม MINITAB ออกแบบจะได้ดังตารางที่ 11 ซึ่งสามารถออกแบบการทดลองได้ทั้งหมด 15 การทดลอง

ตารางที่ 10 ตัวแปรและระดับค่าของตัวแปรของการออกแบบแบบ Box-Behnken

ตัวแปร	-1	0	1
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส) (T)	40	50	60
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (KOH) (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) (C)	0.5	1.0	1.5
อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน (M)	3:1	6:1	9:1

ตารางที่ 11 สภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken โดยใช้โปรแกรม MINITAB

การทดลองที่	ปริมาณตัวเร่ง KOH (เปอร์เซ็นต์)	อัตราส่วนโดยโมล MeOH:Oil	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	0.5	6	60
2	1	3	60
3	1	9	60
4	1	6	50
5	1.5	9	50
6	0.5	3	50

ตารางที่ 11 (ต่อ)

การทดลองที่	ปริมาณตัวเร่ง KOH (เปอร์เซ็นต์)	อัตราส่วนโดยโมล MeOH:Oil	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
7	1	3	40
8	1.5	3	50
9	1.5	6	60
10	1.5	6	40
11	1	6	50
12	1	9	40
13	0.5	6	40
14	0.5	9	50
15	1	6	50

4. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดในน้ำมัน

- 4.1. ชั่งน้ำมันที่ต้องการทดสอบจำนวน 5 กรัม เทใส่ในขวดรูปชมพู่
- 4.2. เติมสารละลายเอ็น-โพรพานอลปริมาณ 50 มิลลิลิตร
- 4.3. ทำการหยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 2 ถึง 3 หยด
- 4.4. นำสารละลายที่ได้มาทำการไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.1 N โดยสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีบานเย็นเมื่อถึงจุดยุติ
- 4.5. ทำการบันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเป็นกรดจากสมการที่ 9

$$\text{ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)} = \frac{\text{ปริมาตร NaOH ที่ใช้ (ml)} \times 56.1 \times 0.10}{\text{น้ำหนักของน้ำมันตัวอย่าง (g)}} \quad (9)$$

5. การวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography รุ่น GC-2010) ใช้ปริมาณการฉีด 1 ไมโครลิตร โดยใช้ Heptadecanoic Acid (C17:0) เป็นสารมาตรฐานภายใน (Internal Standard) ตามมาตรฐาน EN 14103 สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ได้ดังสมการที่ 10 ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์} = \frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{M} \times 100 \quad (10)$$

โดยที่

$\sum A$	=	ผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟตั้งแต่ C14:0 ถึง C24:1
A_{EI}	=	พื้นที่ใต้กราฟของ C17:0
C_{EI}	=	ความเข้มข้นของ C17:0 ที่ใช้ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
V_{EI}	=	ปริมาตร C17:0 ที่ใช้ (ไมโครลิตร)
M	=	น้ำหนักไบโอดีเซลที่ใช้ (มิลลิกรัม)

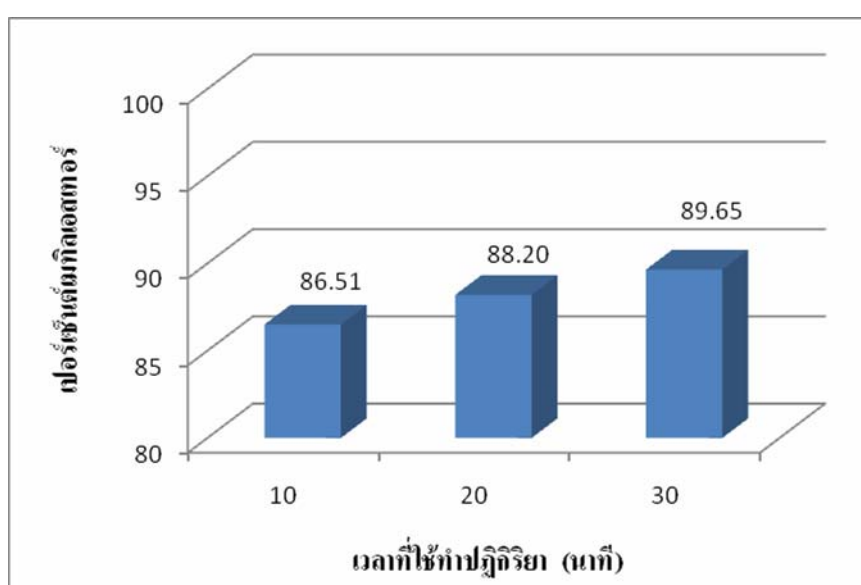
ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ซึ่งน้ำมันสบู่ดำที่ใช้มีค่าความเป็นกรดเริ่มต้น 1.586 mgKOH/g โดยเบื้องต้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส เนื่องจากปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันมีไม่มากนัก อย่างไรก็ตามปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันดังกล่าวมีค่าเกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีโอกาสทำให้เกิดสบู่อขึ้นในการทำปฏิกิริยา ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงทำการศึกษการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน โดยในขั้นตอนที่ 1 ใช้ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด ส่วนขั้นตอนที่ 2 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ One variable at a time ในขั้นตอนที่ 1 ส่วนในขั้นตอนที่ 2 ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ One variable at a time และแบบ Box - Behnken โดยปัจจัยที่ได้ทำการศึกษาคือ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ความหนืด ค่าความเป็นกรด จุดหมอกควัน จุดไหลเท และจุดวาบไฟ

1. การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสได้ทำการทดลองโดยใช้สภาวะสำหรับการผลิตไบโอดีเซลที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 10 20 และ 30 นาที พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจาก 10 เป็น 30 นาที ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 86.51 88.20 และ 89.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 16 เนื่องจากเมื่อใช้เวลานานขึ้น โอกาสที่สารตั้งต้นจะทำปฏิกิริยามีมากขึ้น ส่งผลให้เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานจะได้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Warabi *et al.* (2004) ที่ได้ทำการศึกษากิจกรรมทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้น้ำมันจากเมล็ดเรพ พบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสังเกตได้จากโครมาโทแกรมของเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) คือ เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำ

ปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 15 นาที ไปเป็น 30 และ 45 นาที โครมาโทแกรมที่แสดงปริมาณอัลคิล เอสเทอร์จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้ยังต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ASTM D6751 ที่ระบุให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซลต้องไม่ต่ำกว่า 96.5 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในน้ำมันเริ่มต้นมีปริมาณกรดไขมันอิสระเกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์ และมียางในน้ำมันสบู่ดำ จึงต้องมีการปรับคุณสมบัติของน้ำมันให้เหมาะสมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด ก่อนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ได้ (Zullaikah *et al.*, 2005)



ภาพที่ 16 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ (เมื่อใช้สภาวะคงที่ต่างๆ ดังนี้ ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส)

งานวิจัยนี้จึงได้มีการกำจัดกรดไขมันอิสระและยางในน้ำมันสบู่ดำก่อนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ดังนั้นจึงเลือกใช้การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2. การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน

2.1. ขั้นตอนที่ 1 : การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรกจะเป็นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด คือ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต ซึ่งมีสถานะเป็นของแข็ง เพื่อกำจัดกรดไขมันอิสระและยางในน้ำมัน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด (Acid Value) โดยค่าความเป็นกรดของน้ำมันจะบอกได้ถึงปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) ที่มีอยู่ในน้ำมัน การทดลองนี้จึงได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลในขั้นตอนที่ 1 ของการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน ได้แก่

- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน
- อุณหภูมิ 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส
- อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 3:1 ถึง 30:1
- เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 10 ถึง 30 นาที

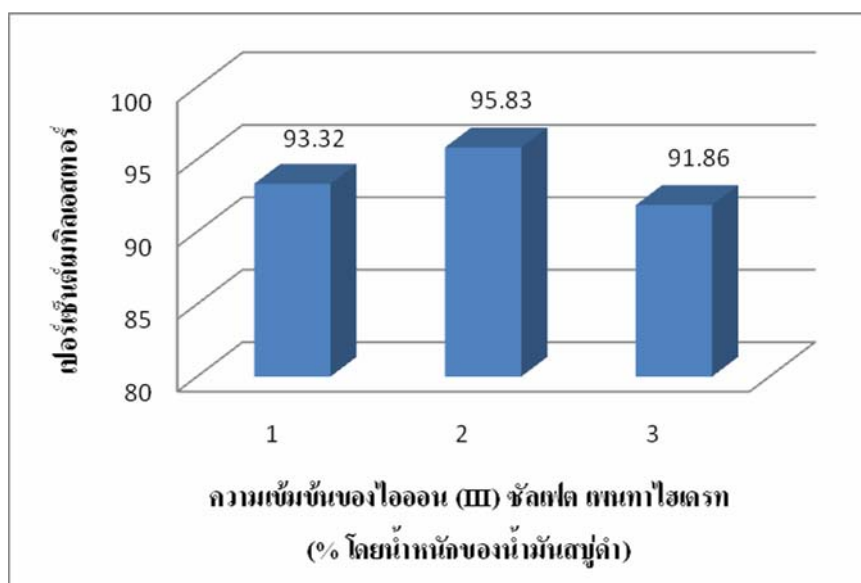
เนื่องจากค่าความเป็นกรดในน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองมีค่า 1.586 mgKOH/g ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สูงมากนัก ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการทดลองแบบ One variable at a time จากนั้นจะนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ไปทำปฏิกิริยาต่อในขั้นตอนที่ 2 เพื่อทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของขั้นตอนที่ 1 โดยในเบื้องต้นได้เลือกใช้สภาวะการทดลองของจริญญา (2550) และ Wang *et al.* (2006b) สำหรับการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่จะกล่าวดังต่อไปนี้

2.1.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต

การศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต เมื่อทำการเปลี่ยนความเข้มข้นจาก 1 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำ ตามลำดับ โดยทำการทดลองขั้นตอนที่ 1 ที่เวลา 30 นาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเป็น 20:1

อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และขั้นตอนที่ 2 ใช้เวลา 30 นาที ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเป็น 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต จาก 1 เป็น 3 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เฉลี่ยเท่ากับ 93.32 95.83 และ 91.86 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงในภาพที่ 17 โดยที่ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงกว่า ที่ 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์เล็กน้อย จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรตจาก 1 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรตเป็น 3 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเมทิลเอสเทอร์กลับลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรตที่มากเกินไป ทำให้เกิดน้ำจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น (Wang *et al.*, 2006b) ซึ่งเป็นสารที่ไม่ต้องการ (By-Product) เมื่อนำน้ำมันจากขั้นตอนที่ 1 ไปทำปฏิกิริยาต่อในขั้นตอนที่ 2 น้ำเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และจะไปก่อให้เกิดสบู่ ซึ่งสบู่จะเป็นตัวลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานอกจากนี้ผลของการเกิดสบู่จะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น และทำให้แยกกลีเซอรอลออกจากผลิตภัณฑ์ได้ยาก ส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ลดลง

เมื่อทำการวัดค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 โดยไม่ผ่านการล้างผลิตภัณฑ์ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรตจาก 1 เป็น 3 เปอร์เซ็นต์ ค่าความเป็นกรดเท่ากับ 0.721 0.696 และ 0.643 mgKOH/g ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 12 จากผลการทดลองข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรตจาก 1 เป็น 3 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันสบู่ดำจะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยผลการทดลองข้างต้นนี้พบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang *et al.* (2007) ที่ได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 โดยใช้ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ เปอร์เซ็นต์การแปลงผันของกรดไขมันอิสระมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อนำน้ำมันจากการทดลองขั้นตอนที่ 1 ไปทำการทดลองต่อในขั้นตอนที่ 2 พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้ในขั้นตอนที่ 2 จากการเพิ่มความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ ในขั้นตอนที่ 1 มีค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงที่สุด ดังนั้นจึงเลือกความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรตที่ 2 เปอร์เซ็นต์ สำหรับทำการทดลองในหัวข้อต่อไป เนื่องจากให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในขั้นตอนที่ 2 สูงและสามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้มาก



ภาพที่ 17 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรทที่ความเข้มข้นต่างๆ (เมื่อใช้สภาวะคงที่ต่างๆ ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญค่า 20:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญค่า 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที)

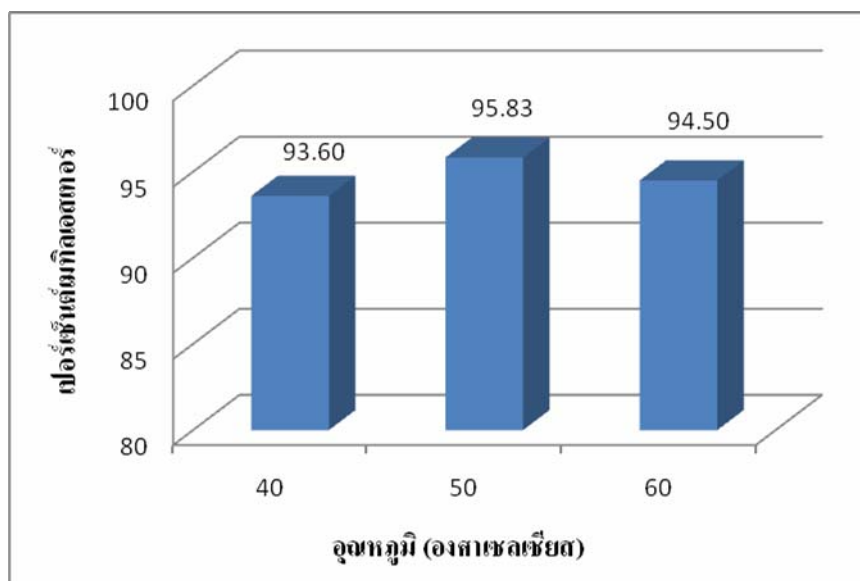
ตารางที่ 12 ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรทที่ใช้ในปฏิกิริยา

ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรท (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันสุญค่า)	ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)
1	0.721
2	0.696
3	0.643

2.1.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 พบว่า เมื่อทำการเปลี่ยนอุณหภูมิจาก 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยทำการทดลองขั้นตอนที่ 1 ใช้เวลา 30 นาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำเป็น 20:1 ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ และขั้นตอนที่ 2 ใช้เวลา 30 นาที ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำเป็น 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 40 เป็น 50 องศาเซลเซียส ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 93.60 เป็น 95.83 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 50 เป็น 60 องศาเซลเซียส ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เฉลี่ยลดลงเล็กน้อยจาก 95.83 เป็น 94.50 เปอร์เซ็นต์ แสดงในภาพที่ 18 นั้นเป็นเพราะที่อุณหภูมิสูงทำให้การแยกเฟสของสารลดลง และโมเลกุลของสารเคลื่อนที่เร็วขึ้นชนกันมากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงความสามารถในการผสมกันระหว่างแอลกอฮอล์และน้ำมันจะเกิดได้ดี ทำให้เกิดเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยนี้พบว่า ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้กับจุดเดือดของเมทานอล (63 องศาเซลเซียส) ทำให้การไหลกลับ (Reflux) ของเมทานอลเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เมทานอลมีโอกาสสัมผัสกับน้ำมันในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ทำให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลงเล็กน้อย

เมื่อทำการวัดค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 โดยไม่ผ่านการล้างผลิตภัณฑ์ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 40 เป็น 60 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดเท่ากับ 1.003 0.728 และ 0.564 mgKOH/g ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 13 จากผลการทดลองข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 40 เป็น 60 องศาเซลเซียส ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันสนุดำจะลดลงอย่างต่อเนื่อง และเมื่อนำน้ำมันจากการทดลองขั้นตอนที่ 1 ไปทำการทดลองต่อในขั้นตอนที่ 2 พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้ในขั้นตอนที่ 2 จากการใช้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนที่ 1 มีค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงที่สุด ดังนั้นจึงเลือกอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส สำหรับทำการทดลองในหัวข้อต่อไป แม้ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้สูงสุด แต่ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ 60 องศาเซลเซียส ต่ำกว่าค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ 50 องศาเซลเซียสเล็กน้อย



ภาพที่ 18 เปอร์เซนต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 ที่อุณหภูมิต่างๆ (เมื่อใช้สภาวะคงที่ต่างๆ ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรท 2 เปอร์เซนต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน สบู่ดำ 20:1 เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซนต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที)

ตารางที่ 13 ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์หลังจากขั้นตอนที่ 1 เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยา

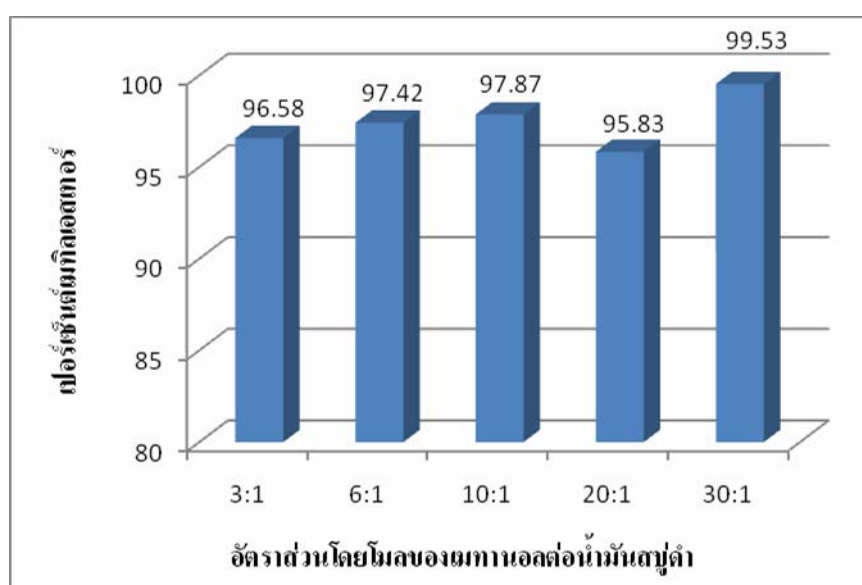
อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)
40	1.003
50	0.728
60	0.564

2.1.3 ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ

การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำจาก 3:1 ถึง 30:1 ตามลำดับ โดยทำการทดลองขั้นตอนที่ 1 ใช้เวลา 30 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรท 2 เปอร์เซนต์ และขั้นตอนที่ 2 ใช้เวลา 30 นาที ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซนต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเป็น 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 ค่าเปอร์เซนต์เมทิลเอสเทอร์เฉลี่ยเท่ากับ 96.58 แต่การแยกชั้นระหว่างเมทานอลตัวเร่งปฏิกิริยา และน้ำมัน เกิดขึ้นไม่ชัดเจนในขั้นตอนที่ 1 ทำให้ปริมาณน้ำมันที่จะนำไปทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 มีปริมาณลดลง ส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้อย ส่วนที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำที่ 6:1 10:1 และ 30:1 มีค่าเปอร์เซนต์เมทิลเอสเทอร์เฉลี่ยเท่ากับ 97.41 97.87 และ 99.53 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 19 ซึ่งยังคงสูงกว่าค่ามาตรฐาน ASTM D6751 ที่ระบุให้เปอร์เซนต์เมทิลเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซลต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 96.5 เปอร์เซนต์ มีเพียงอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำที่ 20:1 เท่านั้น ที่มีค่าเปอร์เซนต์เมทิลเอสเทอร์เฉลี่ยเท่ากับ 95.83 เปอร์เซนต์ ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานเล็กน้อย จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันในขั้นตอนที่ 1 ไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ เนื่องจากอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันมีค่ามากเกินไป และในการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน Ramadhas *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 ถึง 9:1 พบว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่เหมาะสมที่สุดในขั้นตอนแรก คือ 6:1 ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่เหมาะสมของงานวิจัยนี้ คือ 6:1 เพราะเป็นการประหยัดปริมาณเมทานอลที่ใช้ และได้ค่าเปอร์เซนต์เมทิลเอสเทอร์สูง

เมื่อทำการวัดค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 โดยไม่ผ่านการล้างผลิตภัณฑ์ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันจาก 6:1 เป็น 30:1 ค่าความเป็นกรดเท่ากับ 1.189 0.960 0.725 และ 0.591 mgKOH/g ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 14 จากผลการทดลองข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันจาก 6:1 เป็น 30:1 ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันสบู่ดำจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ยกเว้นเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 ซึ่งไม่สามารถวัดค่าความเป็นกรดได้ เนื่องจากมีอนุภาค

ของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต เป็นอนุภาคแขวนลอยอยู่ในน้ำมัน ซึ่งไม่สามารถแยกออกได้ ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำที่ 6:1 สำหรับทำการทดลองในหัวข้อต่อไป เนื่องจากการใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำที่ 6:1 ในขั้นตอนที่ 1 สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้เพียงพอและเมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปทำปฏิกิริยาต่อในขั้นตอนที่ 2 แล้วค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ผ่านมาตรฐาน ASTM D6751



ภาพที่ 19 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำในขั้นตอนที่ 1 ที่อัตราส่วนต่างๆ (เมื่อใช้สภาวะคงที่ต่างๆ ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที)

ตารางที่ 14 ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์หลังจากขั้นตอนที่ 1 เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำที่ใช้ในปฏิกิริยา

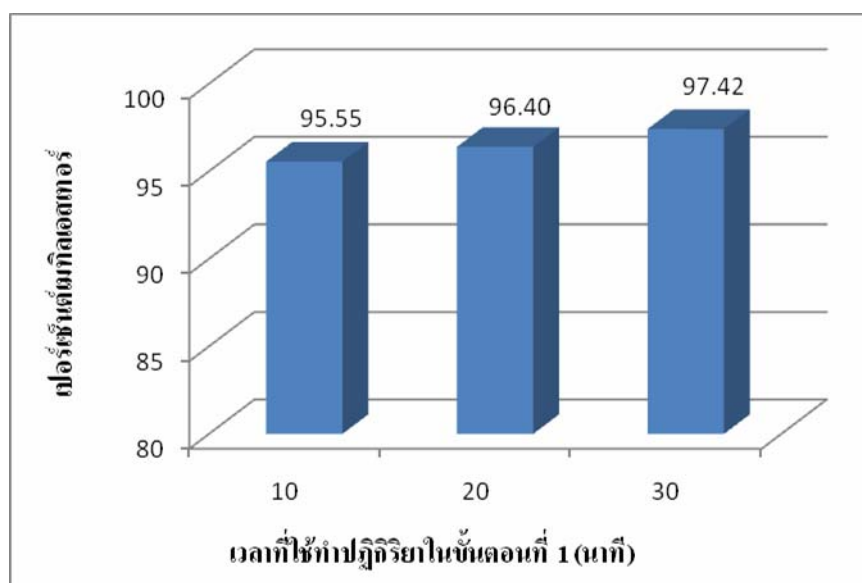
อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ	ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)
3:1	ไม่สามารถวัดได้
6:1	1.189
10:1	0.960
20:1	0.725
30:1	0.591

2.1.4 ศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 เมื่อทำการทดลองที่เวลา 10 20 และ 30 นาที ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเป็น 6:1 ความเข้มข้นไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรต 2 เปอร์เซ็นต์ และขั้นตอนที่ 2 ใช้เวลา 30 นาที ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเป็น 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาจาก 10 เป็น 20 นาที ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 95.55 เป็น 96.40 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มเวลาจาก 20 เป็น 30 นาที ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 96.40 เป็น 97.42 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 20 เนื่องจากการที่กรดไขมันอิสระมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนจึงเข้าทำปฏิกิริยากับ เมทานอลได้ง่าย และพบว่าหลังจากทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 20 นาที ปฏิกิริยาจะเริ่มเข้าสู่สมดุล ดังนั้นการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจะไม่ทำให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจากเดิมมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang *et al.* (2006b) ที่ใช้น้ำมันที่ผ่านการใช้แล้วในการทดลอง พบว่าเมื่อใช้เวลามากกว่า 30 นาที ปฏิกิริยาจะเริ่มเข้าสู่สมดุล ทำให้การใช้เวลามากกว่า 30 นาที ไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยามากนัก

เมื่อทำการวัดค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 โดยไม่ผ่านการล้างผลิตภัณฑ์ พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 10 เป็น 30 นาที ค่าความเป็นกรดเท่ากับ 1.295 1.231 และ 1.201 mgKOH/g ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 15 จากผลการทดลองข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 10 เป็น 30 นาที ปริมาณกรดไขมันอิสระ

ลดลงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 รวมด้วย จะเห็นได้ว่า ที่เวลา 20 นาที ให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูง ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน ASTM D6751) เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ไม่น้อยกว่า 96.5 เปอร์เซ็นต์ (ดังนั้นจึงเลือกเวลาที่ 20 นาที สำหรับทำการทดลองในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 20 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 ที่ เวลาต่างๆ (เมื่อใช้สภาวะคงที่ต่างๆ ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรท 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุ่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุ่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที)

ตารางที่ 15 ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์หลังจากขั้นตอนที่ 1 เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา (นาที)	ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)
10	1.295
20	1.231
30	1.201

จากผลการทดลองข้างต้น ซึ่งทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ในขั้นตอนที่ 1 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 ของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์หลังจากขั้นตอนที่ 1 จะลดลงเหลือ 1.231 mgKOH/g และเมื่อนำผลิตภัณฑ์หลังจากขั้นตอนที่ 1 ไปทำปฏิกิริยาต่อในขั้นตอนที่ 2 ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 96.40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 แล้ว จึงได้ทำการศึกษาต่อในขั้นตอนที่ 2 ของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ของทุกลำดับการทดลองจะทำการทดลองที่สภาวะเดียวกัน คือ ที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการศึกษาข้างต้น

2.2 ขั้นตอนที่ 2: การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ One variable at a time

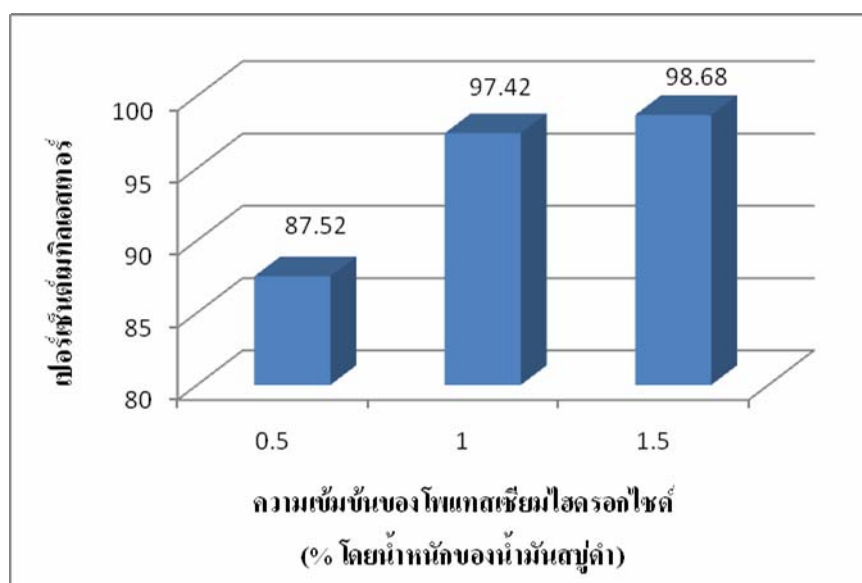
การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน จะใช้สภาวะในการทดลองในขั้นตอนที่ 1 ดังนี้ ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรท 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที ซึ่งในขั้นตอนที่ 2 ของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเป็นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสคือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ การทดลองนี้จึงได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลในขั้นตอนที่ 2 ของการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน ได้แก่

- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน
- อุณหภูมิ 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส
- อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 3:1 ถึง 9:1
- เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 ถึง 30 นาที

ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองแบบ One variable at a time โดยผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่จะกล่าวดังต่อไปนี้

2.2.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

การศึกษาผลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะทำการเปลี่ยนความเข้มข้นจาก 0.5 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำ ตามลำดับ โดยทำการทดลองขั้นตอนที่ 1 ที่เวลา 20 นาที ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเป็น 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และขั้นตอนที่ 2 ใช้เวลา 30 นาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเป็น 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จาก 0.5 ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิล เอสเทอร์เฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 87.52 เป็น 97.42 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จาก 1 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 97.42 เป็น 98.68 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 21 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จาก 0.5 เป็น 1 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1.5 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้มีปริมาณมากเกินไป ทำให้ไม่มีผลกับการเกิดปฏิกิริยา

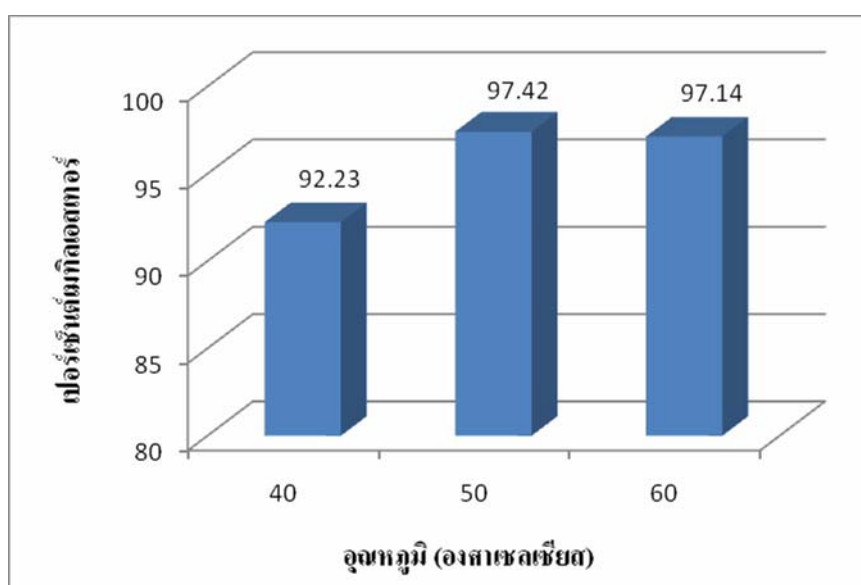


ภาพที่ 21 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ (เมื่อใช้สภาวะคงที่ต่างๆ ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบูดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบูดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที)

2.2.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 จะทำการเปลี่ยนอุณหภูมิจาก 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยทำการทดลองขั้นตอนที่ 1 ที่เวลา 20 นาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบูดำเป็น 6:1 ความเข้มข้นไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และขั้นตอนที่ 2 ใช้เวลา 30 นาที ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบูดำเป็น 6:1 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 40 เป็น 50 องศาเซลเซียส ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 92.23 เป็น 97.42 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 50 เป็น 60 องศาเซลเซียส ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เฉลี่ยลดลงเล็กน้อยจาก 97.42 เป็น 97.14 เปอร์เซ็นต์ แสดงในภาพที่ 22 นั้นเป็นเพราะที่อุณหภูมิสูงทำให้การแยกเฟสของสารลดลง และโมเลกุลของสารเคลื่อนที่เร็วขึ้นชนกันมากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงความสามารถในการผสมกันระหว่างเมทานอลและน้ำมันจะเกิดได้ดี ทำให้เกิดเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัย

นี้พบว่า ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้กับจุดเดือดของเมทานอล (63 องศาเซลเซียส) ทำให้การไหลกลับ (Reflux) ของเมทานอลเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เมทานอลมีโอกาสสัมผัสกับน้ำมันในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ทำให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลงเล็กน้อย

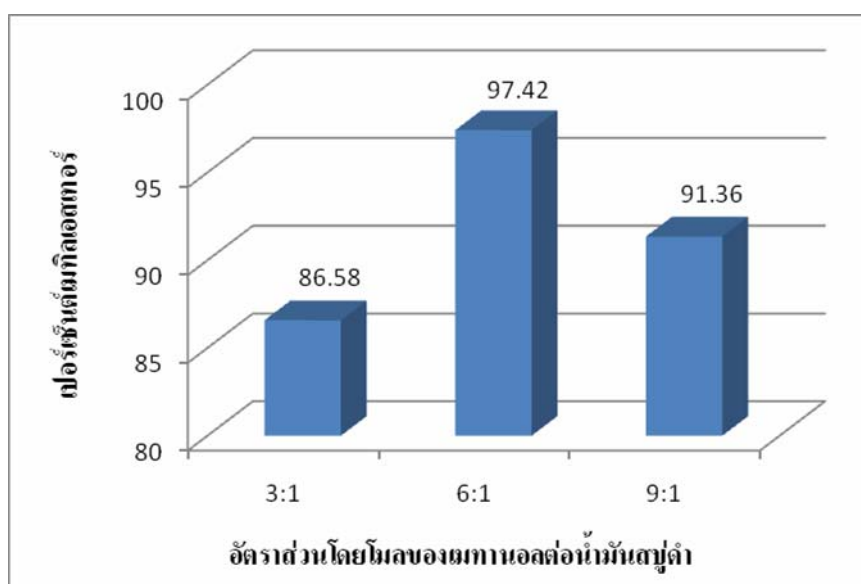


ภาพที่ 22 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิต่างๆ (เมื่อใช้สภาวะคงที่ต่างๆ ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรท 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญดำ 6:1 เวลา 30 นาที)

2.2.3 ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญดำในขั้นตอนที่ 2

การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 จะทำการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันจาก 3:1 ถึง 9:1 ตามลำดับ โดยทำการทดลองขั้นตอนที่ 1 ที่เวลา 30 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรท 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล

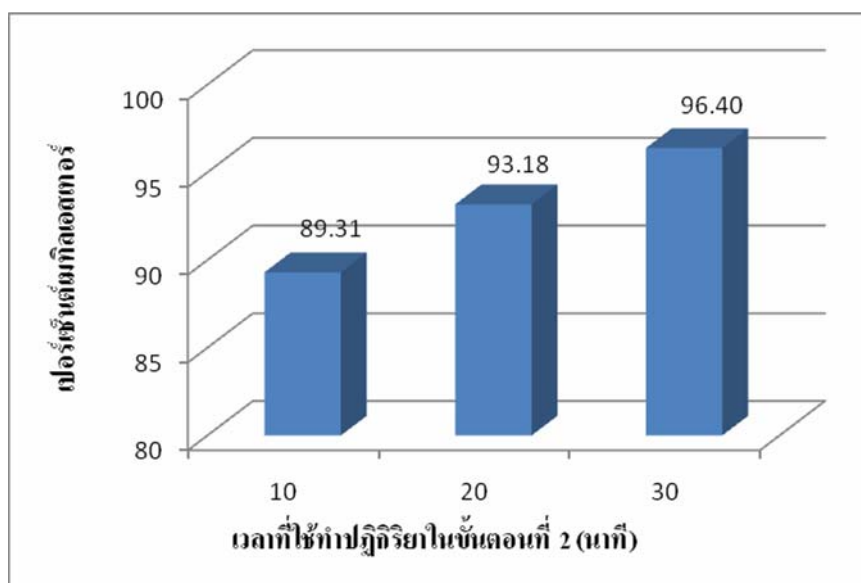
ต่อน้ำมัน 6:1 และขั้นตอนที่ 2 ใช้เวลา 30 นาที ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน จาก 3:1 เป็น 6:1 ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 86.58 เป็น 97.42 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 23 เนื่องจากอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสับุดำตามทฤษฎีเท่ากับ 3:1 แต่ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ ดังนั้นเพื่อผลักดันปฏิกิริยาให้เกิดเมทิลเอสเทอร์สูงสุด จึงมักใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันจาก 6:1 เป็น 9:1 ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เฉลี่ยจะมีค่าลดลงจาก 97.41 เป็น 91.36 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เป็นเพราะการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มากเกินไป จะทำให้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลงด้วย



ภาพที่ 23 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสับุดำในขั้นตอนที่ 2 ที่อัตราส่วนต่างๆ (เมื่อใช้สภาวะคงที่ต่างๆ ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรท 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสับุดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที)

2.2.4 ศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 โดยทำการทดลองที่เวลา 10 20 และ 30 นาที ตามลำดับ ในการทำการทดลองในขั้นตอนที่ 1 ใช้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเป็น 6:1 ความเข้มข้นไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที และขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเป็น 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาจาก 10 เป็น 30 นาที ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 89.31 93.18 และ 96.40 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 24 เนื่องจากเมื่อใช้เวลานานขึ้น โอกาสที่สารตั้งต้นจะทำปฏิกิริยามีมากขึ้น ส่งผลให้เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานจะได้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Warabi *et al.* (2004) ที่ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้น้ำมันจากเมล็ดเรพ พบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Freedman *et al.* (1984) ที่ได้ทำการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันถั่วลิสง น้ำมันทานตะวัน และน้ำมันถั่วเหลือง โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 และความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์เท่ากับ 0.5 จากผลการทดลองพบว่าหลังจากเวลา 1 นาทีได้รับปริมาณเอสเทอร์ของน้ำมันทานตะวัน และน้ำมันถั่วลิสงเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ หลังจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 1 ชั่วโมง ได้ปริมาณเอสเทอร์ 93 ถึง 98 เปอร์เซ็นต์ ในน้ำมันทุกชนิดที่ใช้ทำการทดลอง



ภาพที่ 24 เปอร์เซนต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 ที่เวลาต่างๆ (เมื่อใช้สภาวะคงที่ต่างๆ ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซนต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุบุดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซนต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุบุดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลองข้างต้น ซึ่งทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ในขั้นตอนที่ 2 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 ของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุบุดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน คือ ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุบุดำเท่ากับ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ให้เปอร์เซนต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 96.40 เปอร์เซนต์

2.3 ขั้นตอนที่ 2: การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

เนื่องจากการออกแบบการทดลองแบบ One variable at a time ในหัวข้อที่ผ่านมา มีการดำเนินการในลักษณะที่กำหนดตัวแปรอื่นๆ คงที่แล้วทำการวิเคราะห์หาค่าของตัวแปรแต่ละตัว แต่ในกรณีที่ตัวแปรแต่ละตัวมีการเปลี่ยนแปลงไปพร้อมๆ กันจะทำให้ผลการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้น

ความคลาดเคลื่อน ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยส่วนนี้ผู้วิจัยจึงได้ใช้วิธีการออกแบบ Box-Behnken Design และวิเคราะห์ผลด้วยพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ซึ่งสามารถใช้หา ระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดได้ วิธีพื้นที่การตอบสนองเป็นวิธีที่สร้างสมการของความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรอิสระ (ระดับของปัจจัย : Level of factor) กับตัวแปรตอบสนองโดยใช้วิธีการ วิเคราะห์การถดถอย (Regression) เพื่อหาค่าความเหมาะสม (Optimal settings) ของระดับในแต่ละ ปัจจัยที่สนใจในการออกแบบการทดลอง

เพื่อเป็นการลดจำนวนการทดลอง ผู้วิจัยจึงได้กำหนดให้เวลาในการทำปฏิกิริยาใน ขั้นตอนที่ 2 คงที่ โดยกำหนดขึ้นจากสถานะที่เหมาะสมในขั้นตอนที่ 2 คือ 30 นาที และใช้สภาวะ ในขั้นตอนที่ 1 คือ ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน อุณหภูมิ 50 องศา เซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 6:1 และเวลาในการทำ ปฏิกิริยา 20 นาที โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลในขั้นตอนที่ 2 ของการ ผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน ได้แก่

- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน
- อุณหภูมิ 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส
- อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 3:1 ถึง 9:1

โดยเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะการทดลองต่างๆ ตามการ ออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken แสดงดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของผลิตภัณฑ์ ที่สภาวะการทดลองต่างๆ ตามการออกแบบ Box - Behnken Design

การทดลองที่	ความเข้มข้นของ KOH (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	อัตราส่วนโดยโมล (เมทานอล:น้ำมัน)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เปอร์เซ็นต์ เมทิลเอสเทอร์
1	0.5	6:1	60	89.87
2	1	3:1	60	85.01
3	1	9:1	60	94.00
4	1	6:1	50	93.28
5	1.5	9:1	50	96.42
6	0.5	3:1	50	66.33
7	1	3:1	40	83.92
8	1.5	3:1	50	86.59
9	1.5	6:1	60	96.57
10	1.5	6:1	40	96.66
11	1	6:1	50	95.97
12	1	9:1	40	93.00
13	0.5	6:1	40	86.42
14	0.5	9:1	50	91.15
15	1	6:1	50	95.27

2.3.1 การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

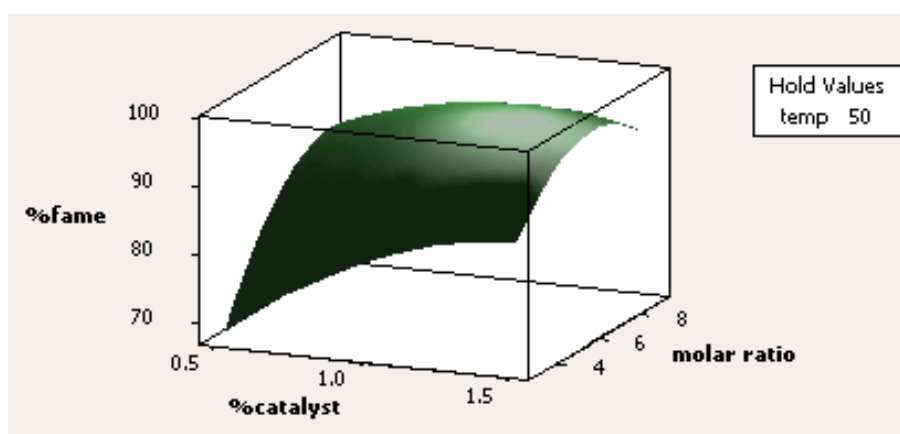
เมื่อนำเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ไปวิเคราะห์เพื่อสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ด้วยโปรแกรม MINITAB ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่จะกล่าวดังต่อไปนี้

ก. อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

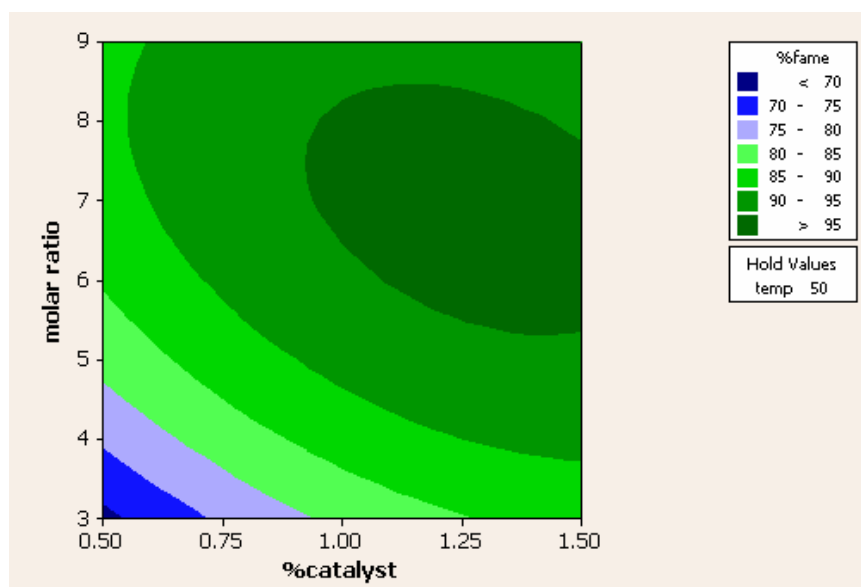
การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่า อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่างก็มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ ดังแสดงในภาพที่ 25 (ก) และ (ข) เนื่องจากเมื่อพิจารณาอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำเพิ่มจาก 3:1 เป็น 9:1 มีผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เปลี่ยนแปลงจาก 70 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มจาก 0.5 เป็น 1.5 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เปลี่ยนแปลงจาก 85 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำจาก 3:1 เป็น 7:1 ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากโดยทั่วไป อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำตามทฤษฎีเท่ากับ 3:1 แต่ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ ดังนั้นเพื่อผลักดันปฏิกิริยาให้เกิดน้ำมันไบโอดีเซลสูงสุดจึงมักใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำมากกว่า 7:1 พบว่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลงอย่างช้าๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันมากเกินไปจะทำให้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang *et al.* (2006b) ส่วนเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ พบว่า เมื่อปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0.5 เปอร์เซ็นต์ ไปจนถึงประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ พบว่า เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มีค่ามากขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนช่วยเร่งให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเกิดได้เร็วขึ้น (Ma and Hanna, 1999) ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงขึ้นที่เวลาการทำปฏิกิริยาเดียวกัน แต่ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงขึ้นจนถึงปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ค่าหนึ่งเท่านั้น หลังจากนั้นแม้จะเพิ่มปริมาณตัวเร่งมากขึ้นเพียงใด ก็ไม่ได้เป็นการช่วยให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงขึ้น (Agarwal, 2006) โดยจะเห็นได้จากการทดลองในภาพที่ 25 (ก) และ (ข) เมื่อปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มจาก 1 เปอร์เซ็นต์ ไปจนถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า

ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยของ Chitra *et al.* (2005) ที่ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.5 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงขึ้นจาก 92 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 98 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 1.5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลงจาก 97 เปอร์เซ็นต์ เป็น 75 เปอร์เซ็นต์



(ก)



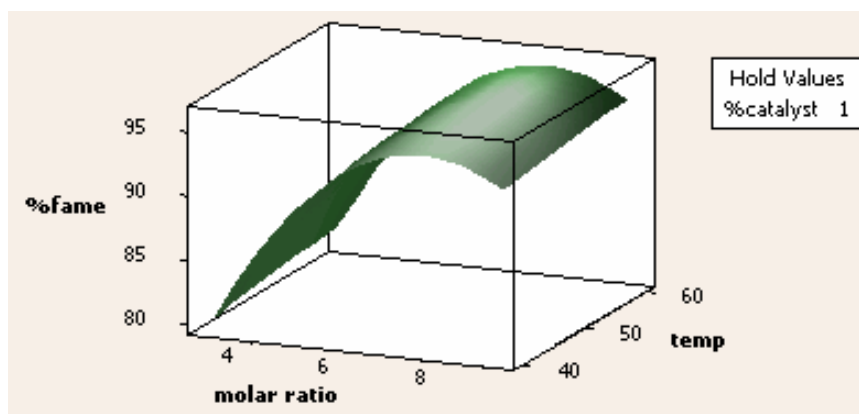
(ข)

ภาพที่ 25 Surface Plot (ก) และ Contour Plot (ข) แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 30 นาที

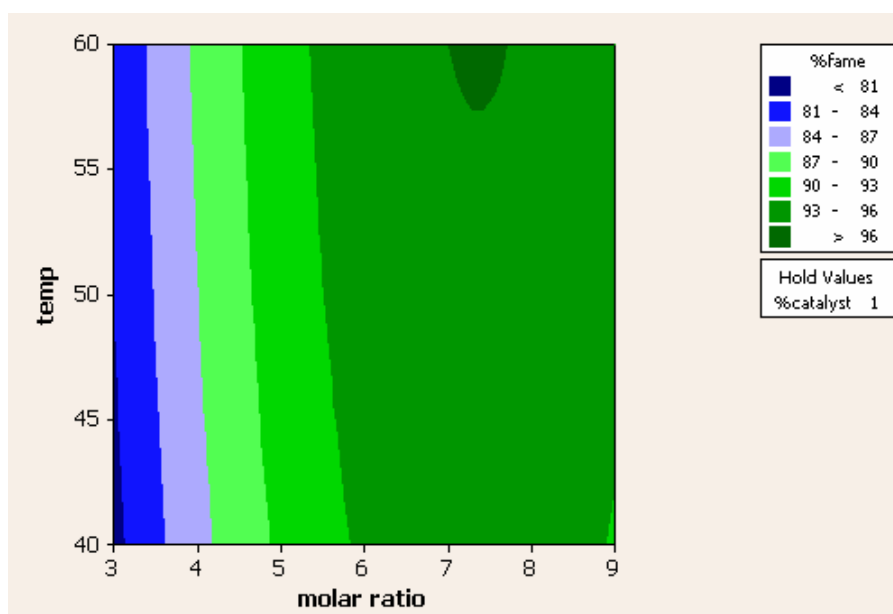
ข. อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่า อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำมีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มากกว่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 26 (ก) และ (ข) เนื่องจากเมื่อพิจารณาอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำเพิ่มจาก 3:1 เป็น 9:1 มีผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เปลี่ยนแปลงจาก 70 ถึง 96 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มจาก 40 เป็น 60 องศาเซลเซียส มีผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เปลี่ยนแปลงจาก 93 ถึง 96 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำจาก 3:1 เป็น 7:1 ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากโดยทั่วไป อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำตามทฤษฎีเท่ากับ 3:1 แต่เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ ดังนั้นเพื่อผลักดันปฏิกิริยาให้เกิดน้ำมันไบโอดีเซลสูงสุดจึงมักใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำมากกว่า 7:1 พบว่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลงอย่างช้าๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันมากเกินไปจะทำให้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang *et al.* (2006b) ส่วนเมื่อพิจารณาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจาก 40 เป็น 60 องศาเซลเซียส ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจาก ที่อุณหภูมิสูงทำให้การแยกเฟสของสารลดลง และโมเลกุลของสารเคลื่อนที่เร็วขึ้นชนกันมากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูง ความสามารถในการผสมกันระหว่างเมทานอลและน้ำมันจะเกิดได้ดี ทำให้เกิดเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zheng *et al.* (2006) ซึ่งกล่าวว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีค่าเพิ่มขึ้น



(ก)



(ข)

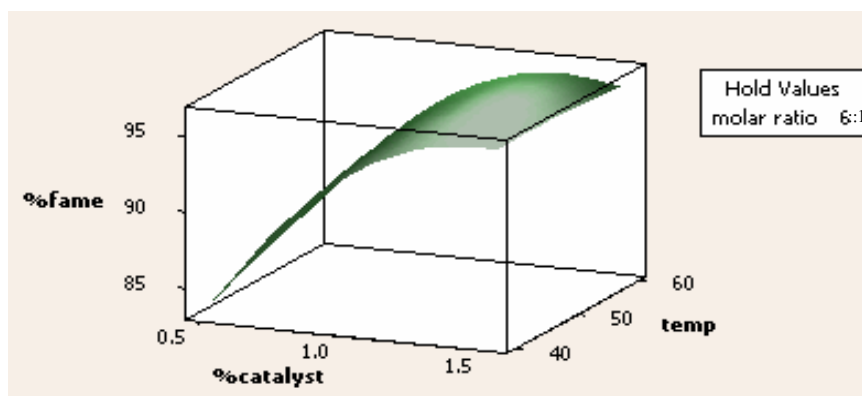
ภาพที่ 26 Surface Plot (ก) และ Contour Plot (ข) แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 30 นาที

ค. อิทธิพลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

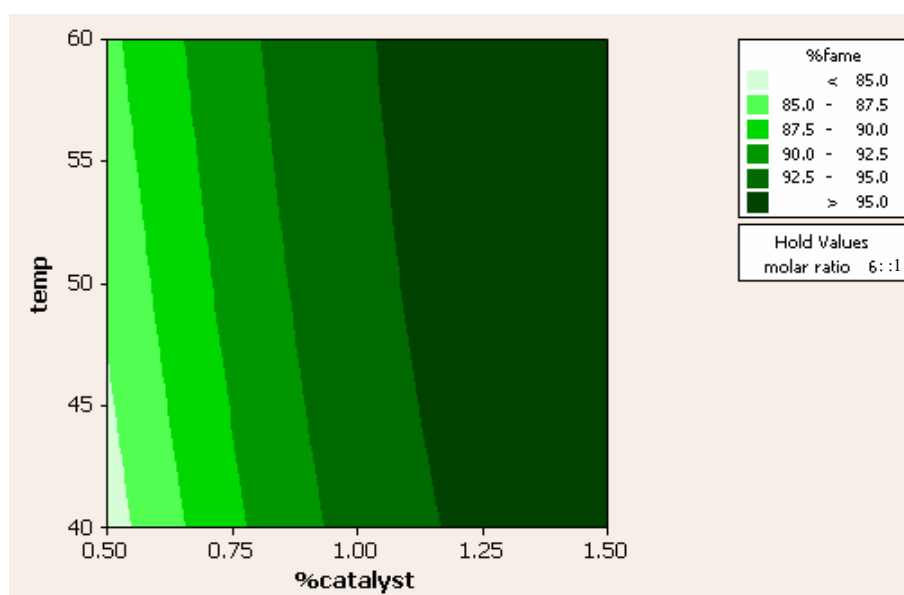
การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนับดำ 6:1 และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่า ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มากกว่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 27 (ก) และ (ข) เนื่องจากเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มจาก 0.5 เป็น 1.5 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เปลี่ยนแปลงจาก 85 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มจาก 40 เป็น 60 องศาเซลเซียส มีผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ พบว่า เมื่อปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0.5 เปอร์เซ็นต์ ไปจนถึงประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มีค่ามากขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนช่วยเร่งให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเกิดได้เร็วขึ้น (Ma and Hanna, 1999) ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงขึ้นที่เวลาในการทำปฏิกิริยาเดียวกัน แต่ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงขึ้นจนถึงปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ค่าหนึ่งเท่านั้น หลังจากนั้นแม้จะเพิ่มปริมาณตัวเร่งมากขึ้นเพียงใดก็ไม่ได้เป็นการช่วยให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Agarwal (2006) ที่กล่าวว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่ความเข้มข้น 0.5-1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (Yield) มีค่า 94-99 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบสไม่ได้เป็นการช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดมากขึ้น และ Meher *et al.* (2006) ที่ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมัน Karanja โดยใช้เมทานอล และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0.25-1.50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของน้ำมัน พบว่า ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอดีเซลเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของน้ำมัน ซึ่งถ้าใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากเกินไป จะทำให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ลดลง เนื่องมาจากการเกิดของสบู่ซึ่งทำให้สารตั้งต้นมีความหนืดเพิ่มขึ้น ผลผลิตที่ได้จึงลดลงและเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในขั้นตอนของการล้างเอาตัวเร่งปฏิกิริยาเบสออกจากผลิตภัณฑ์ ส่วนเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจาก 40 เป็น 60 องศาเซลเซียส ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงทำให้การแยกเฟสของสารลดลงและ

โมเลกุลของสารเคลื่อนที่เร็วขึ้นจนกันมากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูง ความสามารถในการผสมกันระหว่างเมทานอลและน้ำมันจะเกิดได้ดี ทำให้เกิดเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น



(ก)



(ข)

ภาพที่ 27 Surface Plot (ก) และ Contour Plot (ข) แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุ่ดำ 6:1 และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 30 นาที

2.3.2 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลอง

ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MINITAB นั้น มีแบบจำลองที่มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ ด้วยตัวแปรอิสระ (อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมันสบู่ดำ) อยู่ 4 แบบจำลอง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยที่ Y คือ ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ x_i , x_{ij} คือ ตัวแปรอิสระ β_0 คือ ค่าคงที่ (Constant) ของแบบจำลอง และ β_i , β_{ii} , β_{ij} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปรอิสระในแบบจำลอง

ในการพิจารณาตัวแบบจำลองทั้ง 4 แบบนี้ ต้องพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแต่ละแบบจำลองเปรียบเทียบกับกัน เพื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่จะสามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด จากการใช้โปรแกรม MINITAB ประมวลผลด้วยวิธี Response Surface Methodology ได้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแต่ละตัวแบบดังในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

แบบจำลอง	R^2 (%)	R^2 (adj) (%)	SE
Linear	62.7	52.5	5.377
Linear + Square	87.4	78.0	3.665
Linear + Interaction	69.6	46.8	5.695
Full Quadratic	94.3	84.0	3.127

จากตารางที่ 17 พบว่า แบบจำลอง Full Quadratic มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานน้อยที่สุด คือ 3.127 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้วมากที่สุดคือ 84.0 เปอร์เซนต์ แสดงว่า แบบจำลอง Full Quadratic มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาเป็นตัวแทนอธิบายผลการทดลอง

2.3.3 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแบบ

เมื่อได้ตัวแบบจำลองที่เหมาะสม นั่นคือ แบบจำลองแบบ Full Quadratic สำหรับการอธิบายผลการทดลองได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการดำเนินการหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปร (X_i) โดยใช้วิธี Response Surface Regression จากโปรแกรม MINITAB ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

Term	Coef	StDev	<i>t</i>	<i>p</i>
Constant	-2.0524	47.8735	-0.043	0.967
% KOH (C)	62.5206	21.3992	2.922	0.033
MeOH:oil (M)	13.7890	3.5665	3.866	0.012
Temp (T)	0.4186	1.6900	0.248	0.814
% KOH*% KOH (C ²)	-14.2478	6.5093	-2.189	0.080
MeOH:oil*MeOH:oil (M ²)	-0.7654	0.1808	-4.233	0.008
Temp*Temp (T ²)	-0.0017	0.0163	-0.107	0.919
MeOH:oil*% KOH (M*C)	-2.4849	1.0423	-2.384	0.063
Temp*% KOH (T*C)	-0.1733	0.3127	-0.554	0.603
Temp*MeOH:oil (T*M)	-0.0007	0.0521	-0.013	0.990

หมายเหตุ S = 3.127 $R^2 = 94.3\%$ $R^2(\text{adj}) = 84.0\%$

S คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน
 Coef คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย β_i ของแต่ละตัวแปรในสมการ Full Quadratic
 StDev คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)
t และ *p* คือ ตัวสถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐานและค่าความน่าจะเป็น ตามลำดับ

จากตารางที่ 18 สามารถเขียนแบบจำลองแบบ Full Quadratic แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของเมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระ (อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุ่นดำ) ได้ดังสมการ ที่ 11

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์} = & -2.0524 + 62.5206C + 13.7890M + 0.4186T \\ & -14.2478C^2 - 0.7654M^2 - 0.0017T^2 \\ & -2.4849CM - 0.1733CT - 0.007MT \end{aligned} \quad (11)$$

โดยที่

T	=	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)
M	=	อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมัน
C	=	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

2.3.4 การวิเคราะห์นัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของแต่ละตัวแปร (Test on Individual Regression Coefficients)

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยและรูปแบบจำลอง ขึ้นต่อไปเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ซึ่งเป็นการทดสอบว่าตัวแปรอิสระ X_i แต่ละตัวในสมการนั้นมีอิทธิพลหรือไม่ต่อตัวแปรตาม (% FAME) โดยกำหนดสมมติฐานดังนี้

$$\begin{aligned} H_0: \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k &= 0 & \text{ตัวแปรอิสระที่ } i (X_i) \text{ ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม} \\ H_1: \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k &\neq 0 & \text{ตัวแปรอิสระที่ } i (X_i) \text{ มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม} \end{aligned}$$

ตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบ คือ ตัวสถิติ t หรือ p -value

เมื่อพิจารณาตัวแปรอิสระที่ระดับนัยสำคัญ α จะปฏิเสธ H_0 ก็ต่อเมื่อ t_0 (ค่าที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 18) มีค่ามากกว่า $t_{\alpha/2, n-k-1}$ (n เป็นจำนวนการทดลองและ k คือจำนวนสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง) ซึ่งเป็นค่าที่เปิดจากตารางสถิติ (ศิริชัย, 2548) นอกเหนือจากการพิจารณาค่าตัวสถิติ t แล้ว ยังสามารถพิจารณาค่า p -value ได้ด้วย โดยจะปฏิเสธ H_0 ก็ต่อเมื่อค่า

p -value ของตัวแปรอิสระมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด จากการใช้โปรแกรม MINITAB ประมวลผลค่า p -value ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวได้ผลลัพธ์ตารางที่ 18 จากตารางเมื่อพิจารณาในส่วนของ Linear Terms อันได้แก่ C , M , และ T มีค่า p -value เป็น 0.033 0.012 และ 0.814 ตามลำดับ เพราะฉะนั้นที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 พบว่าค่า p -value ของ C และ M มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระ C และ M เป็นไปอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับการพิจารณาในส่วนของ Linear Terms ที่มีค่า p -value เท่ากับ 0.028 ดังตารางที่ 19 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า Linear Terms ตัวแปรอิสระ M และ C สามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในแบบจำลอง

ตารางที่ 19 ค่า p -value ของแบบจำลอง

Term	p
Linear	0.028
Square	0.029
Interaction	0.233

เมื่อพิจารณาตัวแปรอิสระในส่วนของ Square Terms ในตารางที่ 18 อันได้แก่ C^2 , M^2 , และ T^2 มีค่า p -value เป็น 0.080 0.008 และ 0.919 ตามลำดับ เพราะฉะนั้นที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 พบว่าค่า p -value ของ M^2 มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระ M^2 เป็นไปอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับการพิจารณาส่วนของ Square Terms พบว่ามีค่า p -value เป็น 0.029 ดังตารางที่ 19 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า Square Terms ตัวแปรอิสระ M^2 สามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในแบบจำลอง

สุดท้ายพิจารณาตัวแปรอิสระในส่วนของ Interaction Terms ในตารางที่ 18 อันได้แก่ MC , TC , และ TM มีค่า p -value เป็น 0.063 0.603 และ 0.990 ตามลำดับ เพราะฉะนั้นที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 พบว่าไม่มีค่า p -value ของตัวแปรอิสระตัวใด ที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระใน Interaction Terms ที่เป็นไปอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับการพิจารณาส่วนของ Interaction Terms พบว่ามีค่า p -value เป็น 0.233 ดังตารางที่ 19 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่า ตัว

แปรรูปสารใน Interaction Terms ไม่มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ ดังนั้นตัวแปรรูปสารดังกล่าวจึงไม่ควรอยู่ในตัวแบบจำลอง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

2.3.5 การวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสม

การวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม MINITAB ซึ่งเป็นการนำเอาเทคนิค Simultaneous Optimization Technique โดยนำ Desirability Functions มาใช้ในการวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสม (Myers and Montgomery, 2002) การใช้โปรแกรม MINITAB ในการประมวลผล มีสิ่งที่ต้องกำหนดดังต่อไปนี้

ก. ค่าขอบเขตบน (Upper Limit) ของเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

ค่าขอบเขตบนเป็นค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มากที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องกำหนดค่าขอบเขตบนในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์

ข. ค่าเป้าหมาย (Target) ของเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ต้องการ

วัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้เพื่อต้องการค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านมาตรฐานที่กำหนด ดังนั้นจึงกำหนดเป้าหมายเท่ากับ 96.5 เปอร์เซ็นต์

ค. ค่าขอบเขตล่าง (Lower Limit) ของเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

ค่าขอบเขตล่างเป็นค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์น้อยที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องกำหนดค่าขอบเขตล่างในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 65 เปอร์เซ็นต์

ง. ค่า Weight

ค่า Weight เป็นตัวกำหนดรูปแบบของ Desirability Functions ในที่นี้กำหนดให้เป็น 1

เมื่อกำหนดค่าดังกล่าวข้างต้นแล้ว โปรแกรม MINITAB สามารถประมวลผล ได้สภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนที่ 2 คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุปู่ดำเป็น 7.36:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง Full Quadratic จึงได้ทำการทดลองภายใต้สภาวะดังกล่าวผลการทดลองพบว่า ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 97.7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้กำหนดเป็นค่าเป้าหมาย (96.5 เปอร์เซ็นต์) ดังนั้นแบบจำลอง Full Quadratic จึงมีความถูกต้องแม่นยำในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสม ในขั้นตอน ที่ 2

เมื่อเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทดลองกับค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากแบบจำลอง Full Quadratic ดังตารางที่ 20 พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างจากค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากแบบจำลองเล็กน้อย โดยมีค่าผลต่างสูงสุดไม่เกิน 4.82 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 20 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทดลองกับค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากแบบจำลอง Full Quadratic

การทดลองที่	C	M	T	%FAME จาก การทดลอง	%FAME จาก Full Quadratic	ผลต่าง %FAME*
1	0.5	6:1	60	89.87	86.92	2.96
2	1	3:1	60	85.01	81.72	3.29
3	1	9:1	60	94.00	94.18	-0.18
4	1	6:1	50	93.28	94.30	-1.02
5	1.5	9:1	50	96.42	91.60	4.82
6	0.5	3:1	50	66.33	68.64	-2.31
7	1	3:1	40	83.92	80.25	3.67
8	1.5	3:1	50	86.59	86.54	0.05

ตารางที่ 20 (ต่อ)

การทดลองที่	C	M	T	%FAME จาก การทดลอง	%FAME จาก Full Quadratic	ผลต่าง % FAME*
9	1.5	6:1	60	96.57	95.63	0.93
10	1.5	6:1	40	96.66	95.94	0.71
11	1	6:1	50	95.97	94.30	1.67
12	1	9:1	40	93.00	92.80	0.20
13	0.5	6:1	40	86.42	83.76	2.66
14	0.5	9:1	50	91.15	88.60	2.55
15	1	6:1	50	95.27	94.30	0.97
สถานะที่ เหมาะสม	1	7.36:1	60	97.70	96.25	1.45

หมายเหตุ C	คือ	ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำ)
M	คือ	อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ
T	คือ	อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (องศาเซลเซียส)
*	คือ	%FAME ที่ได้จากการทดลอง - %FAME ที่ได้จากแบบจำลอง

3. คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล

การทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสถานะที่เหมาะสม คือ ขั้นตอนแรกทำการทดลองโดยใช้ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมันสบู่ดำ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 6:1 ระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 20 นาที และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส และขั้นตอนที่สองใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 7.36:1 ระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ คือ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ซึ่งจะแสดงผลเปรียบเทียบกับน้ำมันไบโอดีเซลมาตรฐานตามเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM ดังแสดงในตารางที่ 21 ซึ่งพบว่า

ผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนมีเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เท่ากับ 97.7 เปอร์เซ็นต์ จากมาตรฐาน ASTM D1298 ระบุว่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ต้องไม่ต่ำกว่า 96.5 ซึ่งพบว่า เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ในขณะที่มาตรฐาน ASTM D445 และมาตรฐาน ASTM D1298 ระบุว่าไบโอดีเซลควรมีความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส อยู่ระหว่าง 3.5-5.0 เซนติสโตกส์ จากการตรวจสอบความหนืดของผลิตภัณฑ์พบว่ามีค่าความหนืด เท่ากับ 4.8 เซนติสโตกส์ ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐาน ASTM คุณสมบัติสำคัญอื่นๆ ของน้ำมันที่ต้องทำ การตรวจสอบ คือ จุดไหลเท จุดหมอกควัน จุดวาบไฟ และค่าความเป็นกรด จากผลการตรวจสอบ พบว่า ผลิตภัณฑ์มีจุดไหลเทเท่ากับ -1 องศาเซลเซียส จุดหมอกควันเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส จุดวาบ ไฟเท่ากับ 190 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรดเท่ากับ 0.3 mgKOH/g ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานที่ กำหนด

ตารางที่ 21 คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้เทียบกับค่ามาตรฐาน

คุณสมบัติต่างๆ	ค่าของผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน	ค่ามาตรฐาน ASTM
เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์	97.7	ASTM D1298	ไม่ต่ำกว่า 96.5
ความหนืดที่ 40 °C (cSt)	4.8	ASTM D445	3.5-5.0
จุดไหลเท (องศาเซลเซียส)	-1	ASTM D6751	-15 ถึง 10
จุดหมอกควัน (องศาเซลเซียส)	5	ASTM D6751	-3 ถึง 12
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	190	ASTM D93	มากกว่า 120
ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)	0.3	ASTM D 664	น้อยกว่า 0.5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ One variable at a time ในขั้นตอนที่ 1 ส่วนในขั้นตอนที่ 2 ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ One variable at a time และแบบ Box - Behnken ในการหาสภาวะที่เหมาะสม โดยวิเคราะห์ผลจากพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology) ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การออกแบบการทดลองแบบ One variable at a time

สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนโดยใช้การออกแบบแบบ One variable at a time คือ ขั้นตอนแรก ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรท 2 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 20 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ขั้นตอนที่สอง ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซนต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 30 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ได้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 96.4 เปอร์เซนต์

2. การออกแบบการทดลองแบบ Box - Behnken ในขั้นตอนที่ 2

สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนโดยใช้การออกแบบแบบ Box-Behnken คือ ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซนต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 7.36:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยในขั้นตอนที่ 1 จะใช้สภาวะเดียวกับการออกแบบแบบ One variable at a time และเมื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าว พบว่าได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เป็น 97.7 เปอร์เซนต์

3. การวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม MINITAB

3.1. การศึกษาความเหมาะสมของแบบจำลองสำหรับอธิบายร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ ระหว่างแบบจำลอง Linear Model, Linear + Interaction Model, Linear + Square Model และ Full Quadratic Model จากการประมวลผลพบว่า แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการอธิบายร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ คือ แบบจำลองแบบ Full Quadratic

3.2. จากการวิเคราะห์นัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปรอิสระในแบบจำลองพบว่า ตัวแปรอิสระใน Interaction Terms ไม่มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในแบบจำลอง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

3.3. จากการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปร (อุณหภูมิ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์โดยพิจารณาจาก Surface Plot และ Contour Plot พบว่า อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันมีอิทธิพลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มากที่สุด รองลงมา คือ ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ส่วนผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามีอิทธิพลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์น้อยที่สุด

4. การทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงบางประการของผลิตภัณฑ์ พบว่า คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM 6751 ที่กำหนด โดยน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ มีเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 97.7 เปอร์เซ็นต์ ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 4.8 เซนติสโตกส์ ค่าความเป็นกรดเท่ากับ 0.3 mgKOH/g จุดไหลเท จุดหมอกควัน และจุดวาบไฟเท่ากับ -1 5 และ 190 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาต่อ ดังนี้

1. ควรทำการศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน เปรียบเทียบกับการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบขั้นตอนเดียว
2. ควรมีการพัฒนาเทคนิคการล้างไบโอดีเซล ทั้งนี้เพราะโดยทั่วไปจะต้องใช้เวลาในการล้างผลิตภัณฑ์นาน และใช้น้ำล้างปริมาณค่อนข้างมาก อีกทั้งขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลเป็นขั้นตอนที่ทำให้เกิดการสูญเสียผลิตภัณฑ์อีกด้วย
3. ควรมีการนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยไปช่วยในการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์สำหรับผลิตไบโอดีเซล
4. ควรพัฒนาคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลให้สามารถใช้กับเครื่องยนต์ได้โดยตรง เพื่อลดการนำเข้าน้ำมันดิบ
5. ควรกำจัดน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของน้ำที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมธุรกิจพลังงาน. 2548. ประกาศ เรื่อง ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2548. แหล่งที่มา: <http://www.doeb.go.th/law/law.html>. 1 ธันวาคม 2549

กรมธุรกิจพลังงาน. 2549. ประกาศ เรื่อง ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2549. แหล่งที่มา: <http://www.doeb.go.th/law/law.html>. 1 ธันวาคม 2549

จริญญา ตริวิเชียร. 2550. การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวกลางกับวิธีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นันทวรรณ สโรบล. 2549. พิษวิทยาของสนุดำ. แหล่งที่มา: <http://www.doa.go.th/fieldcrops/phinut/oth/tox.HTM>.

ณกัณฑ์กร จินดา, ณัฐฐา จันทารักษ์ และสุทธิเดือน ชุนหกันต์. 2549. สารสกัดที่มีฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์จากส่วนต่างๆ ของสนุดำ. แหล่งที่มา: http://rdi.ku.ac.th/kasetfair49/Plant/p_70/p_70.htm

ระพีพันธุ์ ภาสบุตร, สุขสันต์ สุทธิผลไพบุลย์, ไพจิตร จันทรวงศ์, วีระศักดิ์ อนันบุตร, มาลี ประภาวัต, วิไล กาญจนภูมิ และอรรณพ หวังศิธรรม. 2525. เติบโตด้วยน้ำมัน "สนุดำ". 43 หน้า

ศิริชัย พงษ์วิชัย. 2548. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยคอมพิวเตอร์. พิมพ์ครั้งที่ 15 สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ

ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร จังหวัดชัยนาท . 2550. สบู่ดำ. แหล่งที่มา: <http://www.crma.ac.th/medept/fuel/blacksoap.htm>

สุวภัทร์ อภัยสุวรรณ. 2550. การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวกลางกับวิธีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อนุวัฒน์ จันทรสวรรณ. 2551. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของสบู่ดำ. แหล่งที่มา: <http://www.doa.go.th/fieldcrops/phinut/oth/bot.HTM>.

อุดมวิทย์ ไวยทการ. การผลิตไบโอดีเซลจากสบู่ดำ. แหล่งที่มา: <http://www.doa.go.th/fieldcrops/phinut/util/002.pdf>.

Achten, J.M.W., L. Verchot, Y.J. Franken, E. Mathijs, V.P. Singh, R. Aerts and B. Muys. 2008. *Jatropha* bio-diesel production and use. **Biosource technology**: article in press.

Adebanjo, O.A., A.K. Dalai, and N.N. Bakhshi. 2004. Production of diesel-like fuel and other value-added chemicals from pyrolysis of animal fat. **Energy Fuels**. 19 (4): 1735 -1741.

Agarwal, A.K. 2006. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**. 33: 233-271.

Anon., 1982. Filtered used frying fat powers diesel fleet. **JAOCs**. 59: 780A-781A.

Barnwal, K.B. and M.P. Sharma. 2005. Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 9: 363–378.

Berchmans, J.H. and S. Hirata. 2008. Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. **Biosource technology**. 99: 1716-1721.

- Chitra, P., P. Venkatachalam and A. Sampathrajan. 2005. Optimisation of experimental conditions for biodiesel production from alkali - catalysed transesterification of *Jatropha curcus* oil. **Energy and Sustainable Development**. 9: 13-18.
- Chongkhong, S., C. Tongurai, P. Chetpattananondh and C. Bunyakan. 2007. Biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate. **Biomass and Bioenergy**. 31: 563-568.
- Dai, H.D. 2006. Catalytic cracking method for producing biodiesel using animal-plant oil. **European Patent**: CN1850945.
- Darnoko, D. and M. Cheryan. 2000. Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor. **JAACS**. 77:1263-7.
- Dorado, P.M., J.M. Arnal, J. Gomez, A. Gil and F.J. Lopez. 2002. The effect of a waste vegetable oil blend with diesel fuel on engine performance. **Transactions of the ASAE**. 45(3): 519-523.
- El-Mashad, M.H., R. Zhang and R.J. Avena-Bustillos. 2008. A two-step process for biodiesel production from salmon oil. **Biosystems Engineering**. 99: 220-227.
- Fukuda, H., A. Kondo and H. Noda. 2001. Biodiesel fuel production by transesterification of oils. **JBB**. 92: 405-416.
- Jones, T.S., C.L. Peterson and J.C. Thompson. 2001. Used vegetable oil fuel blend comparisons using injector coking in a DI diesel engine. **Paper number** 016051.
- Kandpal, J.B. and M. Madan. 1994. *Jatropha curcus*: a renewable source of energy for meeting future energy needs. **Technical Note**. 6: 159-160.
- Keim, G.I. 1945. Treating fats and fatty oils. **U.S. Patent** 2: 383-601.

- Kerihuel, A., M.S. Kumar, J. Bellettre and M. Tazerout. 2006. Ethanol animal fat emulsions as a diesel engine fuel – Part 1: Formulations and influential parameters. **Fuel** 85: 2640–2645.
- Ma, F. and M.A. Hanna. 1999. Biodiesel production: a review. **Bioresource Technology**. 70: 1-15.
- Marchetti, M.J., V.U. Miguel and A.F. Errazu. 2005. Possible methods for biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 11: 1300-1311.
- Meher, L.C., Vidya S.S. Dharmagadda and S.N. Naik. 2006. Optimization of alkali-catalyzed transesterification of Pongia pinnata oil for production of biodiesel. **Bioresource Technology**. 97: 1392-1397.
- Myers, R.H. and D.C. Montgomery. 2002. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. 2nd ed. **John Wiley and Sons, Inc.**, U.S.A.
- Nelson, A.L., T.A. Foglia and W.N. Marmer. 2006. Lipase-catalyzed production of biodiesel. **JAACS**: 1191-1195.
- Onay, O. and O.M. Kockar. 2004. Fixed-bed pyrolysis of rapeseed. **Biomass and Bioenergy**. 26: 289 – 299.
- Onay, O. and O.M. Kockar. 2006. Pyrolysis of rapeseed in a free fall reactor for production of bio-oil. **Fuel**. 85: 1921–1928.
- Pramanik, K. 2003. Properties and use of jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. **Renewable Energy**. 28: 239–248.

- Ramadhas, A.S., S. Jayaraj and C. Muraleedharan. 2005. Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. **Fuel**. 84:335–340.
- Rashid, U. and F. Anwar. 2008. Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of raseed oil. **Fuel**. 87: 265-273.
- Saka, S. and D. Kusdiana. 2001. Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. **Fuel**. 80: 225-231.
- Schuchardt, U., R. Sercheli and R.M. Vargas. 1998. Transesterification of vegetable oils: a review. **JBCS**. 9(1):199–210.
- Schwab, A.W., G.J. Dykstra, E. Selke, S.C. Sorenson and E.H. Pryde. 1988. Diesel fuel from thermal decomposition of soybean oil. **JAOCs**. 65: 1781-1786.
- Schwab, A.W., M.O. Bagby and B. Freedman. 1987. Preparation and properties of diesel fuels from vegetable oils. **Fuel**. 66: 1372-1378.
- Shimada, Y., Y. Watanabe, A. Sugihara and Y. Tominaga. 2002. Enzymatic alcoholysis for biodiesel fuel production and application of the reaction to oil processing. **Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic**. 17: 133–142.
- Sonntag, N.O.V. 1979. Reactions of fats and fatty acids. pp. 99. In Bailey's industrial oil and fat products. 4th ed. **Swern, D., John Wiley & Sons**. New York.
- Sprules, F.J. and D. Price. 1950. Production of fatty esters. **U.S. Patent** 2:366–94.
- Srivastava, A. and R. Prasad. 2000. Triglycerides-based diesel fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 4: 111-133.

- Veljkovic, B.V., S.H. lakicevic, O.S. Stamenkovic, Z.B. Todorovic and M.L. Lazic. 2006. Biodiesel production from tobacco (*Nicotiana tabacum L.*) seed oil with a high content of free fatty acid. **Fuel**. 85: 2671-2675.
- Wang, D.Y., T.A. Shemmeri, P. Eames, J. McMullan, N. Hewitt, Y. Huang and S. Rezvani. 2006(a). An experimental investigation of the performance and gaseous exhaust emissions of a diesel engine using blends of a vegetable oil. **Applied Thermal Engineering**. 26: 1684–1691.
- Wang, Y., S. Ou, P. Liu and Z. Zhang. 2007. Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process. **Energy Conversion and Management**. 48: 184-188.
- Wang, Y., S. Ou, P. Liu, F. Xue and S. Tang. 2006(b). Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical**. 252: 107–112.
- Warabi, Y., D. Kusdiana and S. Saka. 2004. Reactivity of triglycerides and fatty acids of rapeseed oil in supercritical alcohols. **Bioresource Technology**. 91: 283-287.
- Xu, Q., M. Nakajima, H. Nabetani, S. Iwamoto and X. Liu. 2001. The effects of ethanol content and emulsifying agent concentration on the stability of vegetable oil-ethanol emulsions. **JAACS**: 1185-1190.
- Zhang, Y., M.A. Dube, D.D. McLean and M. Kates. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. **Bioresource Technology**. 89:1-16.
- Zheng, S., M. Kates, M.A. Dube, and D.D. McLean. 2006. Acid-catalyzed production of biodiesel from waste frying oil. **Bioresource Technology**. 30: 267-272.

Zhong, J. 2004. Method for producing microemulsified fuel oil. **European Patent**: CN1632067.

Ziejewski, M., K.R. Kaufman, A.W. Schwab and E.H. Pryde. 1984. Diesel engine evaluation of a nonionic sunflower oil-aqueous ethanol microemulsion. **JAOCs**. 61: 1620-1626.

Zullaikah, S., C. Lai and S. Vali. 2005. A two-step acid-catalyzed process for the production of biodiesel from rice bran oil. **Bioresource Technology**. 96. 1889-1896.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การเตรียมสารตั้งต้น

การเตรียมสารตั้งต้นสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

ตัวอย่างการคำนวณ

การเตรียมปริมาณสารตามอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำที่กำหนด มีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

1. น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันสบู่ดำ = 869.56 กรัมต่อโมล (จริญญา, 2550)
2. น้ำหนักโมเลกุลของเมทานอล = 32.04 กรัมต่อโมล

วิธีการคำนวณ

1. ใช้น้ำมันสบู่ดำ 30 กรัม
2. จำนวนโมล = จำนวนสาร (กรัม)/น้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)
3. จะได้จำนวนโมลของน้ำมันสบู่ดำ เท่ากับ $30/869.56 = 0.035$ โมล
4. ต้องการเตรียมอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ = 6:1
5. จะได้จำนวนโมลของเมทานอล = $6 \times 0.035 = 0.21$ โมล
6. คิดเป็นปริมาณของเมทานอล = $0.21 \times 32.04 = 6.73$ กรัม

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดในน้ำมัน

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดในน้ำมัน

ตัวอย่างการคำนวณ

ในการทดลองที่ทำการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน เมื่อใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรทเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมันสบู่ดำ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 6:1 ระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 20 นาที และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาก็คือ 50 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดในน้ำมัน ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าความเป็นกรดในน้ำมัน (AV)} = \frac{\text{ปริมาตร NaOH ที่ใช้ (มิลลิลิตร)} \times 56.1 \times 0.10}{\text{น้ำหนักของน้ำมันตัวอย่าง (กรัม)}}$$

วิธีการคำนวณ

1. ปริมาตร NaOH ที่ใช้ = 1.3 มิลลิลิตร
2. น้ำหนักของน้ำมันตัวอย่าง = 5.925 กรัม
3. ดังนั้นค่าความเป็นกรดกรดในน้ำมัน = $\frac{1.3 \times 56.1 \times 0.10}{5.925}$
= 1.23 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม

ภาคผนวก ค

การคำนวณเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

การคำนวณเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

ตัวอย่างการคำนวณ

ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยใช้ Heptadecanoic acid (C17:0) เป็นสารมาตรฐานภายใน (Internal standard) ตามมาตรฐาน EN 14103 สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

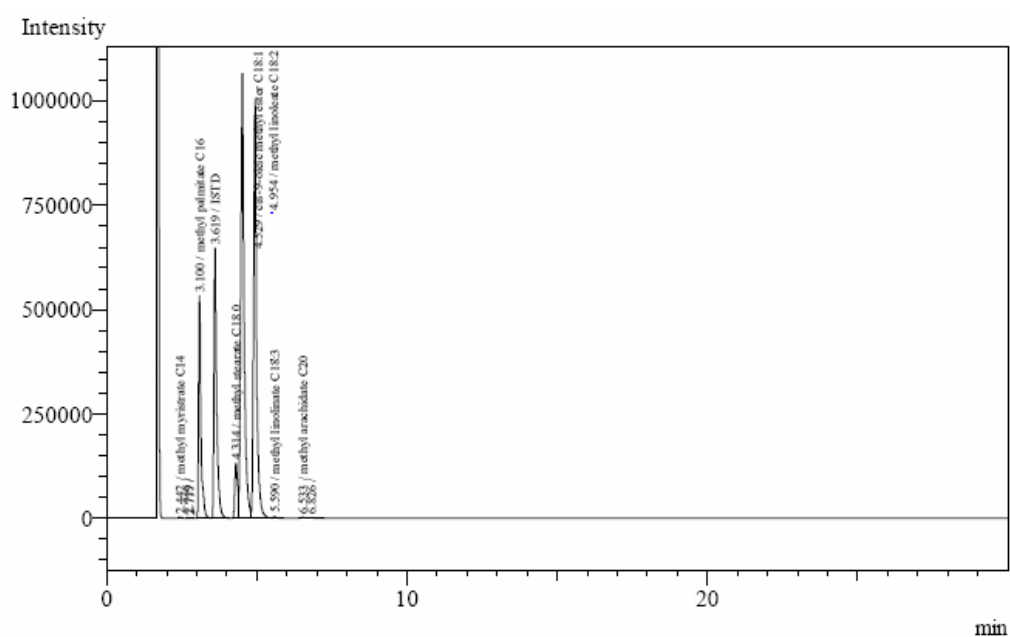
$$\text{เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์} = \frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{M} \times 100$$

โดย

$\sum A$	=	ผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟตั้งแต่ C14:0 ถึง C24:0
A_{EI}	=	พื้นที่ใต้กราฟของ C17:0
C_{EI}	=	ความเข้มข้นของ C17:0 ที่ใช้ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
V_{EI}	=	ปริมาตร C17:0 ที่ใช้ (มิลลิลิตร)
M	=	น้ำหนักไบโอดีเซลที่ใช้ (มิลลิกรัม)

วิธีการคำนวณ

ในการทดลองที่ทำการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ใช้ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาความเข้มข้นเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมันสนุดำ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำเท่ากับ 6:1 ระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 20 นาที และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส และขั้นตอนที่สองใช้ความเข้มข้นของ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ คือ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุดำเท่ากับ 7.36:1 ระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วย GC ผลการวิเคราะห์แสดงดัง ภาพผนวกที่ ค1



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	2.442	7312	2165	0.032	%		4	methyl myristate C
2	2.719	2550	711	0.011				
3	2.777	1455	404	0.006		V		
4	3.100	2777463	533827	12.187	%		5	methyl palmitate C1
5	3.619	3936525	648480	17.273	%	V	15	ISTD
6	4.314	863877	131355	3.791	%		7	methyl stearate C18
7	4.529	8174177	1065821	35.867	%	V	8	cis-9-oleic methyl es
8	4.954	6964085	1003452	30.558	%	SV	9	methyl linoleate C18
9	5.590	23231	3709	0.102	%	T	10	methyl linoleate C1
10	6.533	23976	2320	0.105	%		11	methyl arachidate C
11	6.826	15429	1209	0.068		V		
Total		22790080	3393453					

ภาพผนวกที่ ๑1 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของผลิตภัณฑ์จากการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน

จากกราฟสามารถนำมาคำนวณได้ดังนี้

$$\sum A = 2790080$$

$$A_{EI} = 3936529$$

$$C_{EI} = 10.013 \text{ มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร}$$

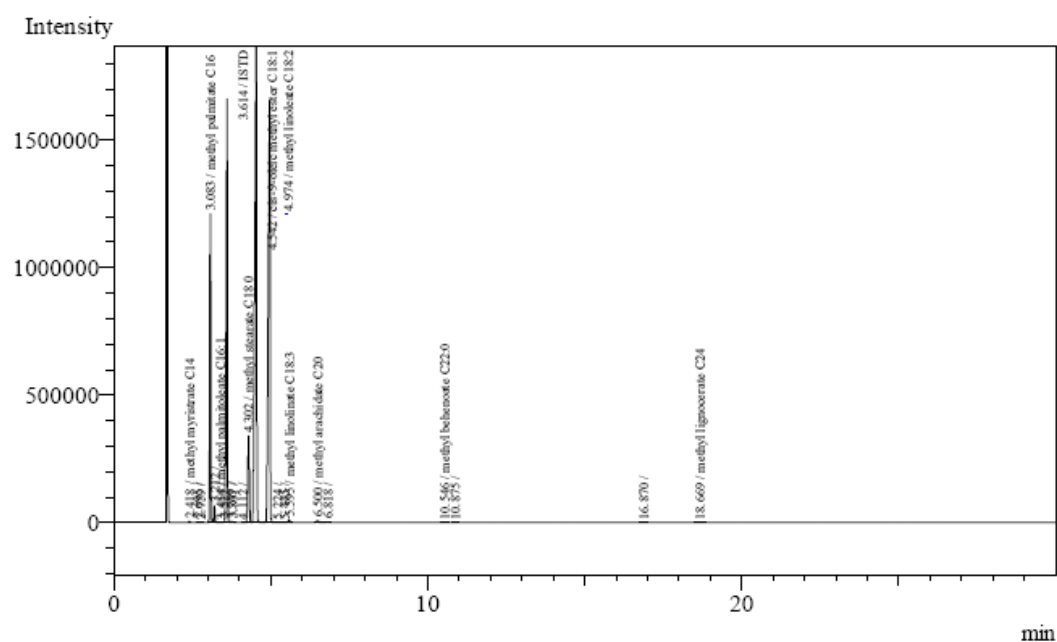
$$V_{EI} = 1 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$M = 50 \text{ มิลลิกรัม}$$

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์} &= \left(\frac{22790080 - 3936525}{3936525} \right) \times \left(\frac{10.013 \times 1}{50} \right) \times 100 \\ &= 97.7 \% \end{aligned}$$

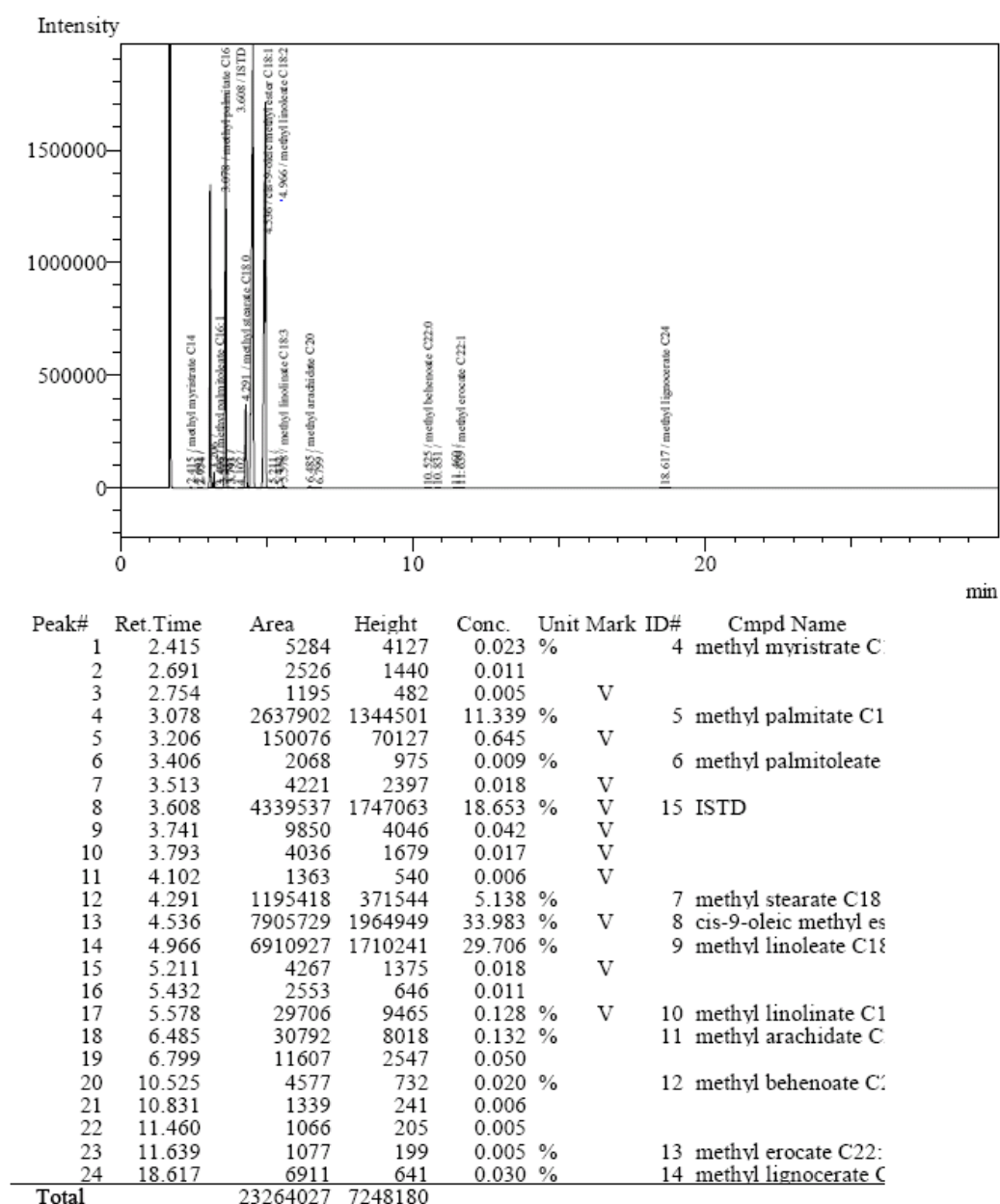
ภาคผนวก ง

โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม

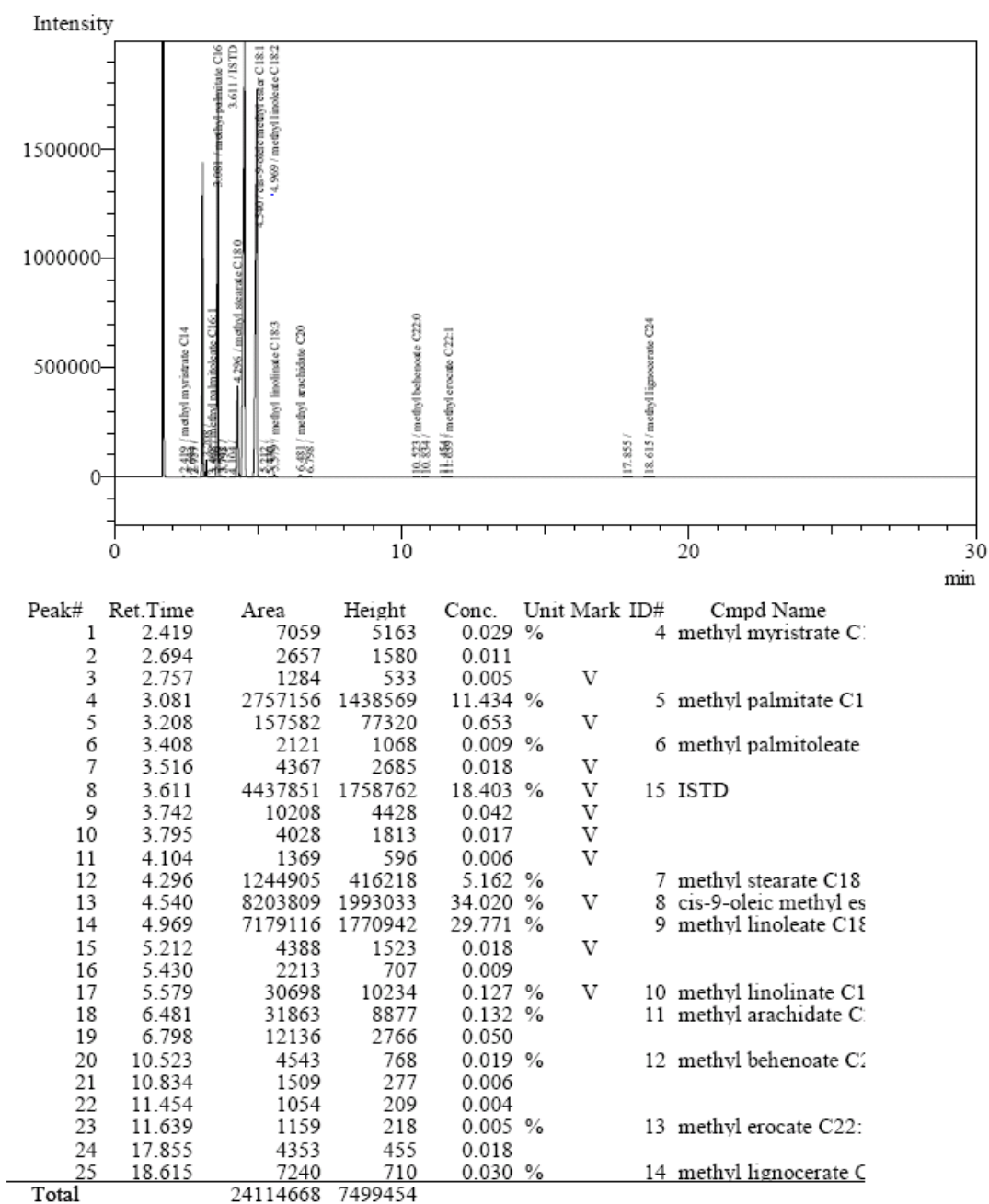


Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	2.418	6247	4393	0.028	%		4	methyl myristate C
2	2.695	3115	1672	0.014				
3	2.759	1362	459	0.006		V		
4	3.083	2501707	1212381	11.296	%		5	methyl palmitate C1
5	3.212	144075	64169	0.651		V		
6	3.414	2061	907	0.009	%	V	6	methyl palmitoleate
7	3.522	3593	2222	0.016		V		
8	3.614	4223524	1659731	19.070	%	V	15	ISTD
9	3.749	9741	3806	0.044		V		
10	3.801	3712	1547	0.017		V		
11	4.112	1325	503	0.006		V		
12	4.302	1131840	339484	5.111	%		7	methyl stearate C18
13	4.542	7481111	1881616	33.779	%	V	8	cis-9-oleic methyl es
14	4.974	6545329	1656307	29.554	%	S	9	methyl linoleate C18
15	5.224	2297	768	0.010		T		
16	5.445	2125	615	0.010				
17	5.595	28720	9027	0.130	%	V	10	methyl linolate C1
18	6.500	29827	7819	0.135	%		11	methyl arachidate C
19	6.818	11273	2483	0.051				
20	10.546	4136	648	0.019	%		12	methyl behenoate C
21	10.875	1386	257	0.006				
22	16.870	2270	292	0.010				
23	18.669	6345	601	0.029	%		14	methyl lignocerate C
Total		22147121	6851707					

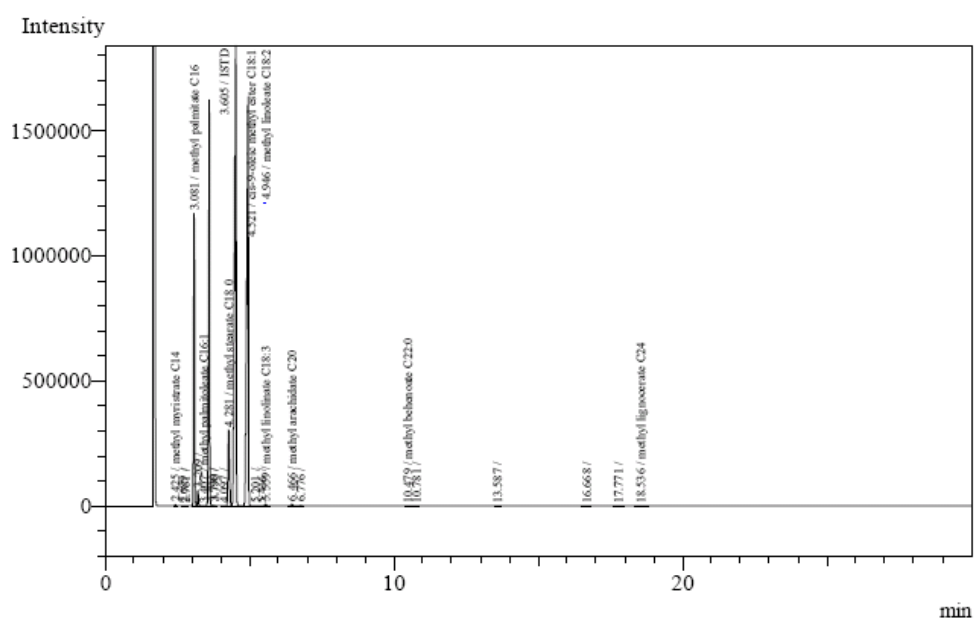
ภาพผนวกที่ ๑1 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบูดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที



ภาพผนวกที่ ๖2 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสด 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที



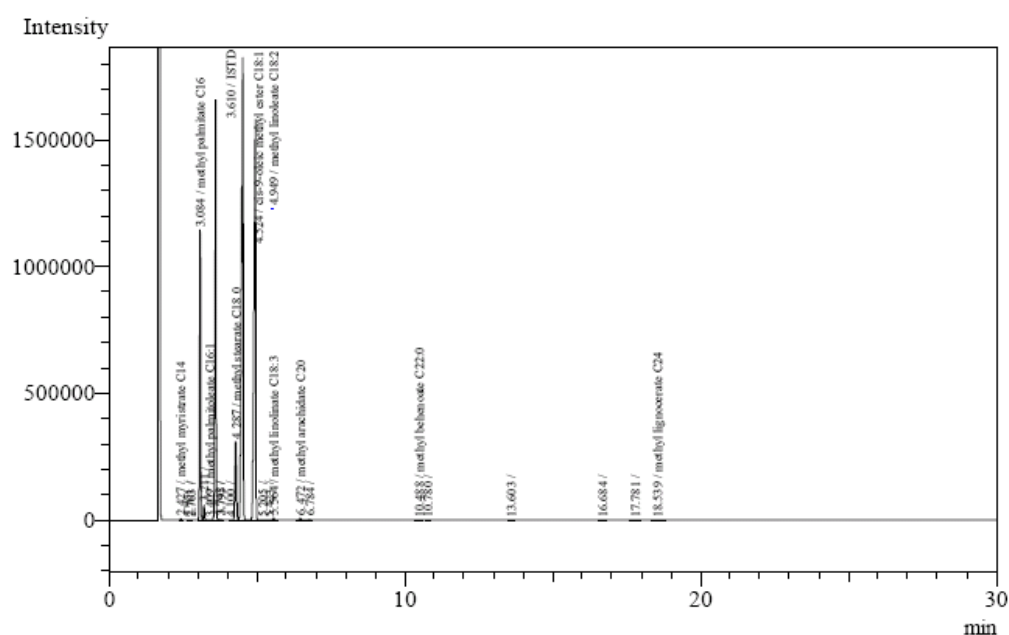
ภาพผนวกที่ 33 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสด 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.425	7645	4519	0.035	%	S	methyl myristate C14
2	2.699	2646	1262	0.012			
3	2.761	1181	448	0.005		V	
4	3.081	2493651	1169074	11.516	%		methyl palmitate C16
5	3.209	141090	61213	0.652		V	
6	3.407	1968	851	0.009	%		methyl palmitoleate C16:1
7	3.605	4149268	1621640	19.162	%	V	ISTD
8	3.739	9473	3518	0.044		V	
9	3.790	3595	1467	0.017		V	
10	4.097	1290	464	0.006		V	
11	4.281	1087578	303907	5.023	%		methyl stearate C18:0
12	4.521	7290787	1839922	33.671	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
13	4.946	6372791	1635312	29.431	%	S	methyl linoleate C18:2
14	5.201	3672	1111	0.017		T	
15	5.416	2279	529	0.011			
16	5.559	27130	7845	0.125	%	V	methyl linolate C18:3
17	6.466	27413	6301	0.127	%		methyl arachidate C20
18	6.776	10185	2061	0.047			
19	10.479	4165	634	0.019		V	methyl behenoate C22:0
20	10.781	1125	182	0.005			
21	13.587	1153	156	0.005		V	
22	16.668	2254	272	0.010			
23	17.771	4120	362	0.019			
24	18.536	6674	540	0.031	%	S	methyl lignocerate C24
Total		21653133	6663590				

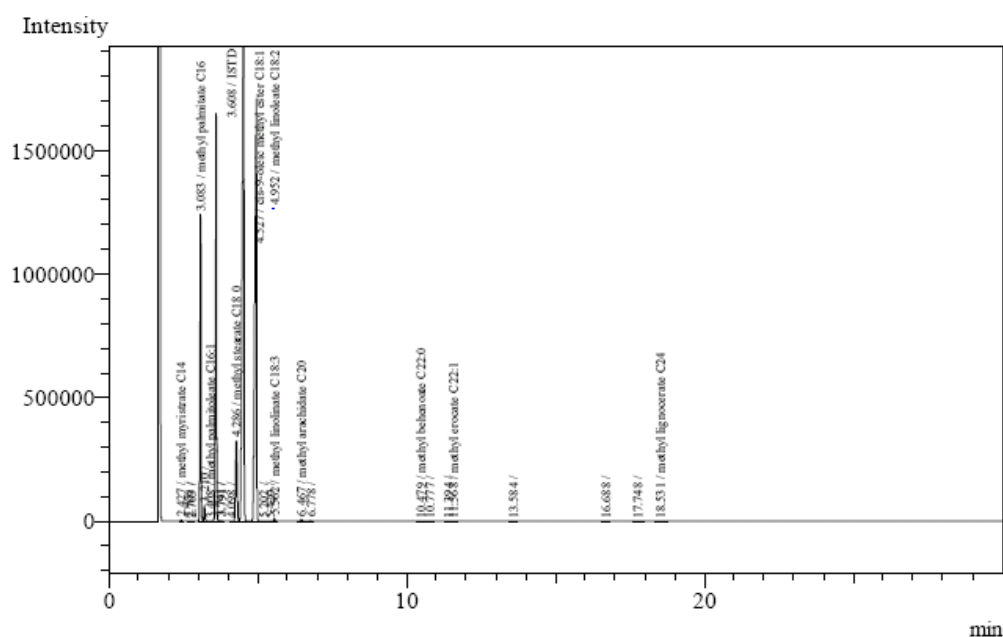
ภาพผนวกที่ 4 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรท 2 เปอร์เซนต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 เปอร์เซนต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญดำ 6:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.427	7764	4527	0.037	%	S	methyl myristate C14
2	2.701	2445	1257	0.012		V	
3	2.763	1204	446	0.006		V	
4	3.084	2414021	1143034	11.406	%		methyl palmitate C16
5	3.211	136185	59479	0.643		V	
6	3.409	1865	821	0.009	%		methyl palmitoleate C16:1
7	3.610	4240996	1656111	20.039	%	V	ISTD
8	3.742	9047	3437	0.043		V	
9	3.795	3755	1491	0.018		V	
10	4.100	1212	454	0.006		V	
11	4.287	1054378	307661	4.982	%		methyl stearate C18:0
12	4.524	7046296	1822034	33.294	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
13	4.949	6155575	1580798	29.085	%		methyl linoleate C18:2
14	5.205	4003	1190	0.019		V	
15	5.423	2171	529	0.010			
16	5.564	26088	7694	0.123	%	V	methyl linolenate C18:3
17	6.472	26606	6467	0.126	%		methyl arachidate C20
18	6.784	9934	2076	0.047			
19	10.488	4256	667	0.020	%		methyl behenoate C22:0
20	10.780	1023	163	0.005		V	
21	13.603	1146	162	0.005			
22	16.684	2328	285	0.011		V	
23	17.781	4059	383	0.019			
24	18.539	7496	632	0.035	%	S	methyl lignocerate C24
Total		21163853	6601798				

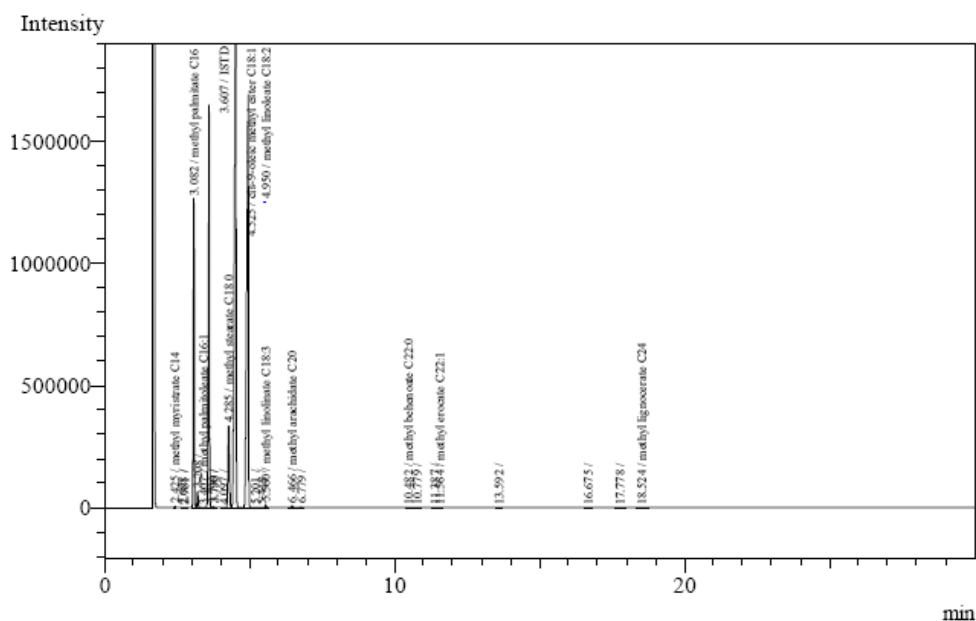
ภาพผนวกที่ 5 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญุดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญุดำ 3:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.427	8060	4657	0.035	%	S	methyl myristate C14
2	2.700	2771	1299	0.012			
3	2.763	1272	465	0.006		V	
4	3.083	2658123	1240180	11.526	%	V	methyl palmitate C16
5	3.210	149528	64606	0.648		V	
6	3.408	2180	887	0.009	%	V	methyl palmitoleate C16:1
7	3.608	4261167	1648993	18.476	%	V	ISTD
8	3.741	10172	3759	0.044		V	
9	3.791	3906	1562	0.017		V	
10	4.098	1421	485	0.006		V	
11	4.286	1182242	325149	5.126	%	V	methyl stearate C18:0
12	4.527	7856346	1951104	34.065	%	SV	cis-9-oleic methyl ester C18:1
13	4.952	6825357	1708561	29.595	%	V	methyl linoleate C18:2
14	5.202	4189	1257	0.018		V	
15	5.420	2408	587	0.010			
16	5.562	28656	8496	0.124	%	V	methyl linolenate C18:3
17	6.467	30095	7410	0.130	%		methyl arachidate C20
18	6.778	11180	2351	0.048			
19	10.479	4690	747	0.020	%	SV	methyl behenoate C22:0
20	10.777	1265	193	0.005		S	
21	11.394	1022	177	0.004			
22	11.568	1074	171	0.005	%	V	methyl erocate C22:1
23	13.584	1488	192	0.006			
24	16.688	2108	256	0.009			
25	17.748	4821	453	0.021			
26	18.531	7266	633	0.032	%		methyl lignocerate C24
Total		23062807	6974630				

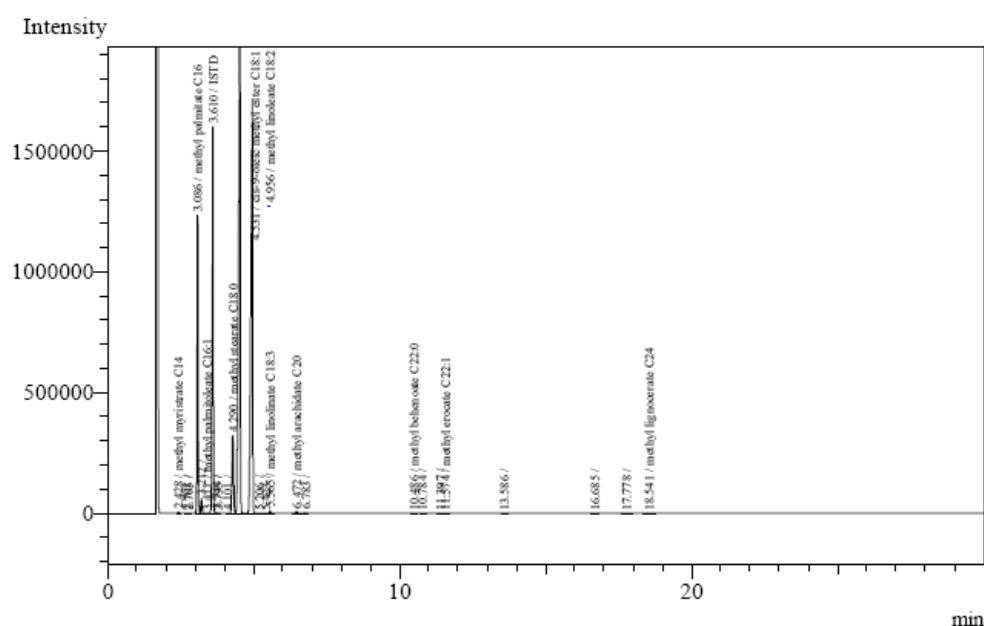
ภาพผนวกที่ 6 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรท 2 เปอร์เซนต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซนต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญดำ 9:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.425	7205	4706	0.032	%		methyl myristate C14
2	2.698	2606	1354	0.011		V	
3	2.761	1250	469	0.005		V	
4	3.082	2645049	1267873	11.592	%		methyl palmitate C16
5	3.208	149182	65713	0.654		V	
6	3.407	2063	898	0.009	%	V	methyl palmitoleate C16:1
7	3.607	4242754	1649519	18.593	%	V	ISTD
8	3.739	9902	3774	0.043		V	
9	3.790	3733	1525	0.016		V	
10	4.097	1328	497	0.006		V	
11	4.285	1163818	333451	5.100	%		methyl stearate C18:0
12	4.525	7746604	1912749	33.948	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
13	4.950	6743941	1688982	29.554	%	S	methyl linoleate C18:2
14	5.201	3757	1206	0.016		T	
15	5.418	2350	592	0.010			
16	5.560	28275	8552	0.124	%	V	methyl linolate C18:3
17	6.466	29379	7267	0.129	%		methyl arachidate C20
18	6.779	11450	2391	0.050			
19	10.482	4983	819	0.022	%		methyl behenoate C22:0
20	10.779	1201	195	0.005			
21	11.387	1122	188	0.005			
22	11.564	1128	188	0.005	%	V	methyl erocate C22:1
23	13.592	1344	182	0.006			
24	16.675	2212	269	0.010			
25	17.778	4786	441	0.021			
26	18.524	7334	637	0.032	%		methyl lignocerate C24
Total		22818756	6954437				

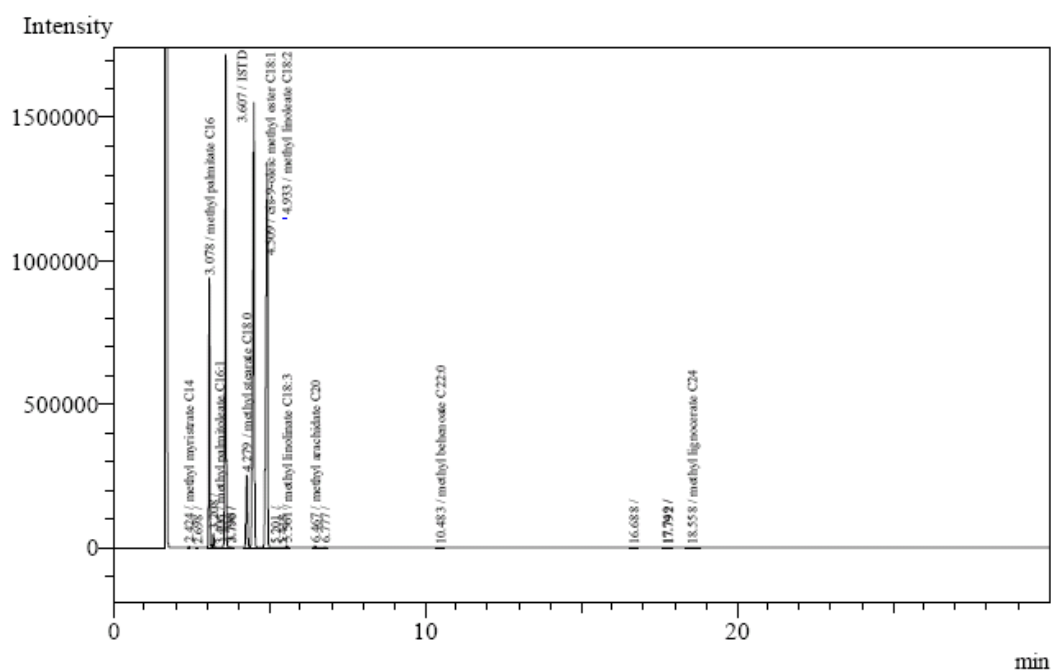
ภาพผนวกที่ ๗ โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรท 2 เปอร์เซนต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซนต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.428	8397	4789	0.036	%	S	methyl myristate C14
2	2.702	2756	1302	0.012			
3	2.765	1257	464	0.005		V	
4	3.086	2722063	1234835	11.613	%		methyl palmitate C16
5	3.212	152503	63953	0.651		V	
6	3.411	2061	864	0.009	%	V	methyl palmitoleate C16:1
7	3.610	4241907	1602489	18.097	%	V	ISTD
8	3.744	10149	3719	0.043		V	
9	3.795	3656	1467	0.016		V	
10	4.101	1385	480	0.006		V	
11	4.290	1206786	322699	5.149	%		methyl stearate C18:0
12	4.531	8025167	1958997	34.238	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
13	4.956	6958197	1717530	29.686	%	V	methyl linoleate C18:2
14	5.206	4347	1245	0.019		SV	
15	5.423	2545	601	0.011			
16	5.565	29164	8558	0.124	%	V	methyl linolenate C18:3
17	6.472	30766	7339	0.131	%		methyl arachidate C20
18	6.783	11965	2376	0.051			
19	10.486	4829	769	0.021	%		methyl behenoate C22:0
20	10.784	1168	209	0.005			
21	11.397	1243	194	0.005			
22	11.574	1270	205	0.005	%	V	methyl erocate C22:1
23	13.586	1461	193	0.006			
24	16.685	2036	252	0.009		V	
25	17.778	4821	445	0.021		V	
26	18.541	7298	630	0.031	%		methyl lignocerate C24
Total		23439197	6936604				

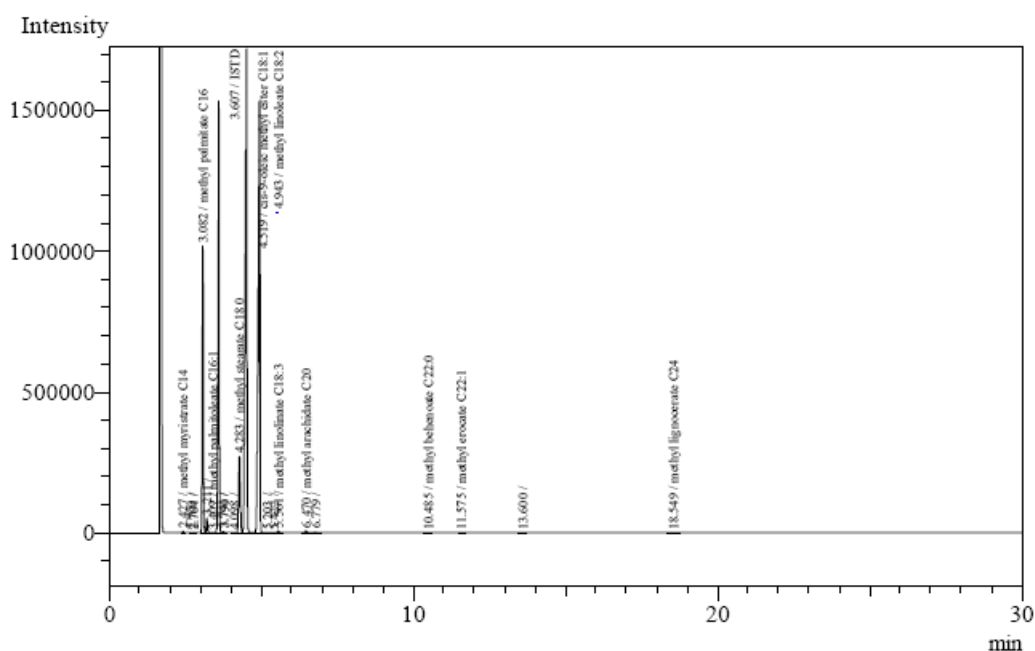
ภาพผนวกที่ ๖8 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรท 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญดำ 9:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.424	5532	3662	0.031	%		methyl myristate C14
2	2.698	2070	1105	0.012		V	
3	3.078	1920601	939780	10.878	%		methyl palmitate C16
4	3.208	107552	47790	0.609		V	
5	3.406	1478	678	0.008	%		methyl palmitoleate C16:1
6	3.607	4351617	1716457	24.648	%	SV	ISTD
7	3.738	4080	2004	0.023		T	
8	3.790	2310	1064	0.013		TV	
9	4.279	827057	253018	4.684	%		methyl stearate C18:0
10	4.509	5534594	1549806	31.348	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
11	4.933	4828030	1343313	27.346	%	S	methyl linoleate C18:2
12	5.201	3640	1124	0.021		T	
13	5.418	1683	407	0.010			
14	5.561	20502	6148	0.116	%	V	methyl linolate C18:3
15	6.467	20820	4978	0.118	%	V	methyl arachidate C20
16	6.777	7691	1578	0.044			
17	10.483	3843	593	0.022	%		methyl behenoate C22:0
18	16.688	2019	245	0.011			
19	17.749	1075	245	0.006			
20	17.792	1851	279	0.010		V	
21	18.558	7195	559	0.041	%	SV	methyl lignocerate C24
Total		17655240	5874833				

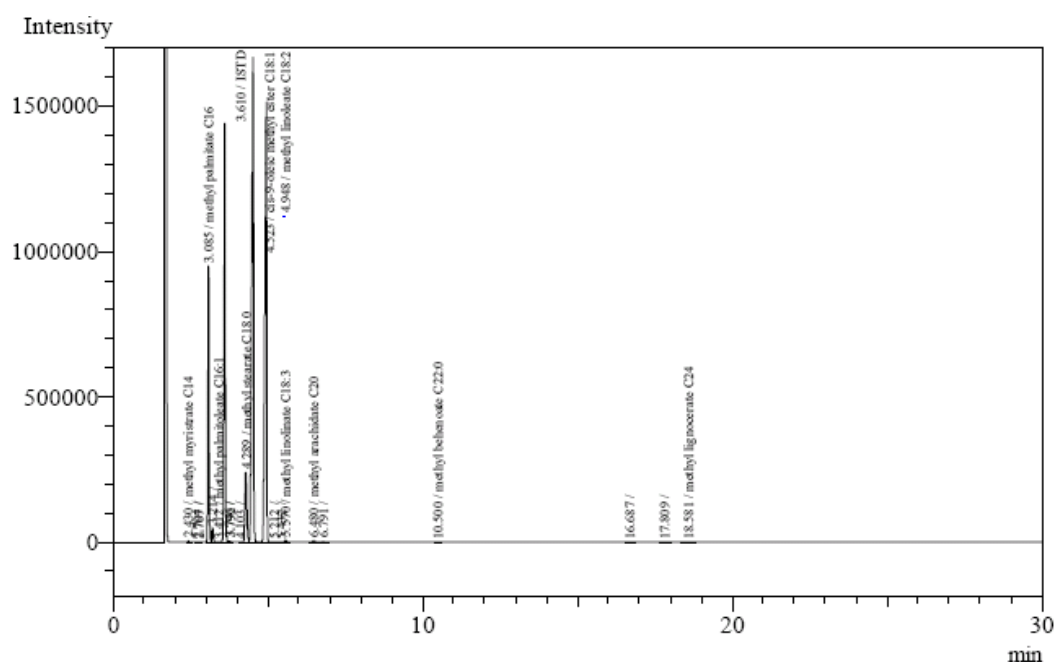
ภาพผนวกที่ ๑๙ โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญดำ 3:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.427	7059	3926	0.035	%	S	methyl myristate C14
2	2.700	2477	1102	0.012			
3	2.764	1111	409	0.005		V	
4	3.082	2298059	1018349	11.348	%		methyl palmitate C16
5	3.211	128935	52243	0.637		V	
6	3.409	1843	755	0.009	%	V	methyl palmitoleate C16:1
7	3.607	4100124	1533415	20.246	%	V	ISTD
8	3.741	8927	3107	0.044		V	
9	3.790	3582	1426	0.018		V	
10	4.098	1228	402	0.006		V	
11	4.283	1004295	270310	4.959	%		methyl stearate C18:0
12	4.519	6737096	1719004	33.268	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
13	4.943	5877279	1534961	29.022	%		methyl linoleate C18:2
14	5.203	3864	1050	0.019		V	
15	5.422	2026	459	0.010			
16	5.561	24940	6832	0.123	%	V	methyl linolate C18:3
17	6.470	25564	5586	0.126	%		methyl arachidate C20
18	6.779	10034	1819	0.050		S	
19	10.485	4048	601	0.020	%		methyl behenoate C22:0
20	11.575	1110	164	0.005	%	V	methyl erocate C22:1
21	13.600	1190	140	0.006			
22	18.549	6245	520	0.031	%		methyl lignocerate C24
Total		20251036	6156580				

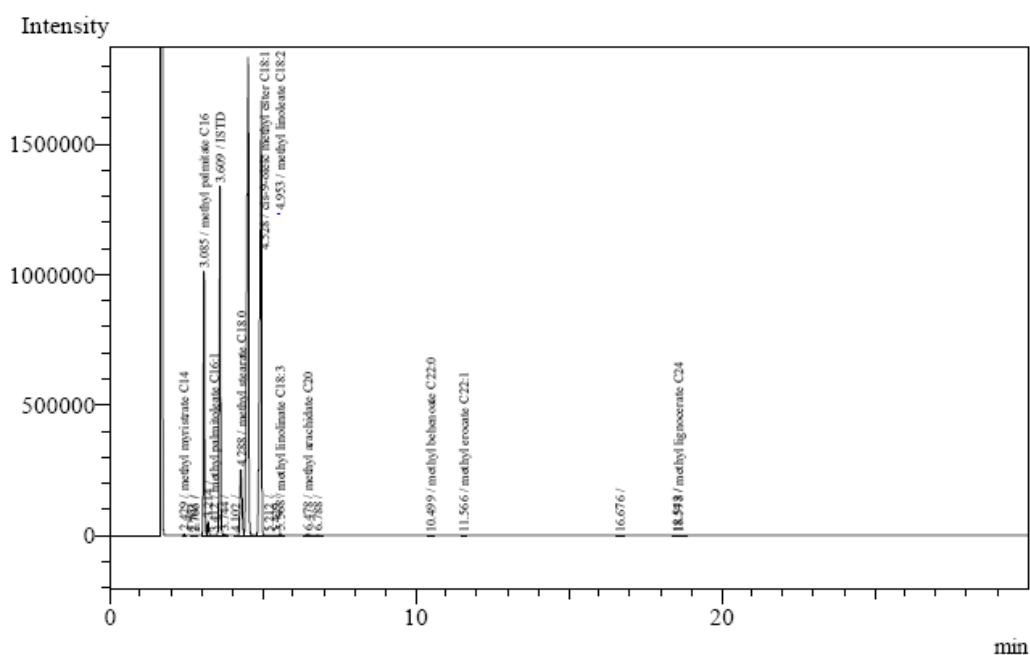
ภาพผนวกที่ 10 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสุญุดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญุดำ 3:1 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.430	7753	3922	0.038	%		methyl myristate C14
2	2.704	2262	1062	0.011		V	
3	2.767	1130	390	0.006		V	
4	3.085	2285942	949420	11.338	%		methyl palmitate C16
5	3.214	128585	49453	0.638		SV	
6	3.412	1579	666	0.008	%	T	methyl palmitoleate C16:1
7	3.610	4110903	1439429	20.390	%	SV	ISTD
8	3.746	3573	1629	0.018		T	
9	3.792	1231	556	0.006		TV	
10	4.103	1134	363	0.006		V	
11	4.289	991036	240212	4.916	%		methyl stearate C18:0
12	4.523	6701414	1666705	33.240	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
13	4.948	5844568	1512248	28.990	%	SV	methyl linoleate C18:2
14	5.212	3514	911	0.017		T	
15	5.432	1900	418	0.009			
16	5.570	24761	6451	0.123	%	V	methyl linolenate C18:3
17	6.480	25411	4876	0.126	%		methyl arachidate C20
18	6.791	10009	1673	0.050		V	
19	10.500	3433	500	0.017	%		methyl behenoate C22:0
20	16.687	2053	232	0.010			
21	17.809	3121	258	0.015			
22	18.581	5634	425	0.028	%		methyl lignocerate C24
Total		20160946	5881799				

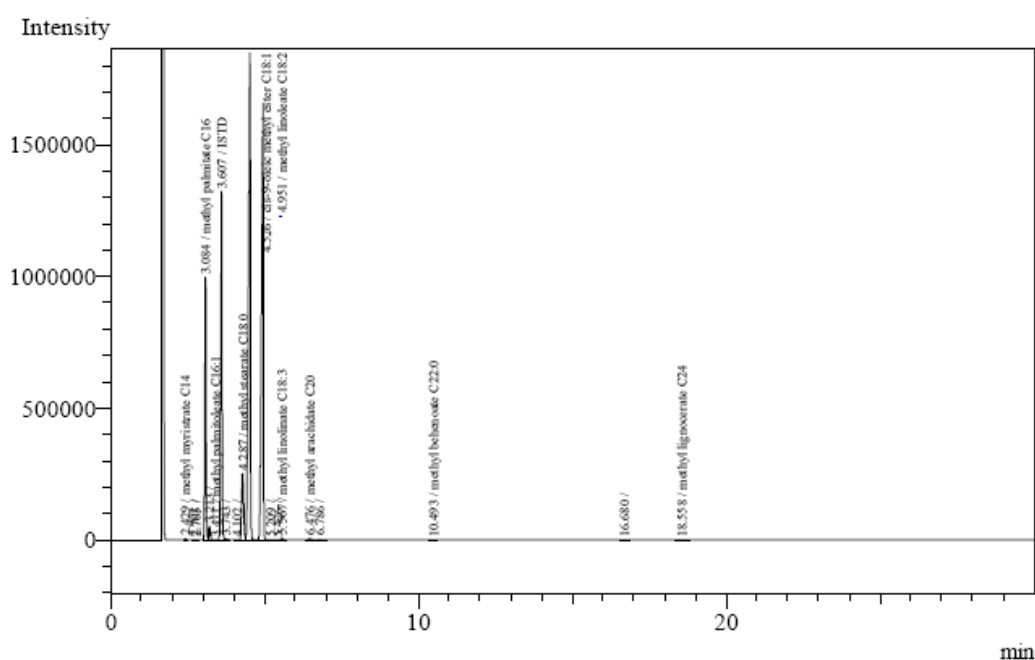
ภาพผนวกที่ 11 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสุญดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญดำ 3:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.429	7834	3954	0.035	%		methyl myristate C14
2	2.703	2625	1085	0.012			
3	2.766	1232	414	0.005		V	
4	3.085	2614242	1011602	11.532	%		methyl palmitate C16
5	3.214	146344	53349	0.646		V	
6	3.412	1998	732	0.009	%	V	methyl palmitoleate C16:1
7	3.609	4097364	1339095	18.074	%	SV	ISTD
8	3.744	5040	1700	0.022		T	
9	4.102	1256	387	0.006		V	
10	4.288	1149948	250913	5.073	%		methyl stearate C18:0
11	4.528	7787900	1833659	34.354	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
12	4.953	6764112	1665170	29.837	%	V	methyl linoleate C18:2
13	5.212	4015	991	0.018		V	
14	5.429	2201	475	0.010			
15	5.568	28572	7202	0.126	%	V	methyl linolate C18:3
16	6.478	29813	5494	0.132	%		methyl arachidate C20
17	6.788	11964	1879	0.053		V	
18	10.499	4055	575	0.018	%		methyl behenoate C22:0
19	11.566	1053	159	0.005	%	V	methyl erocate C22:1
20	16.676	1970	227	0.009			
21	18.543	2129	412	0.009			
22	18.578	4181	444	0.018	%	SV	methyl lignocerate C24
Total		22669848	6179918				

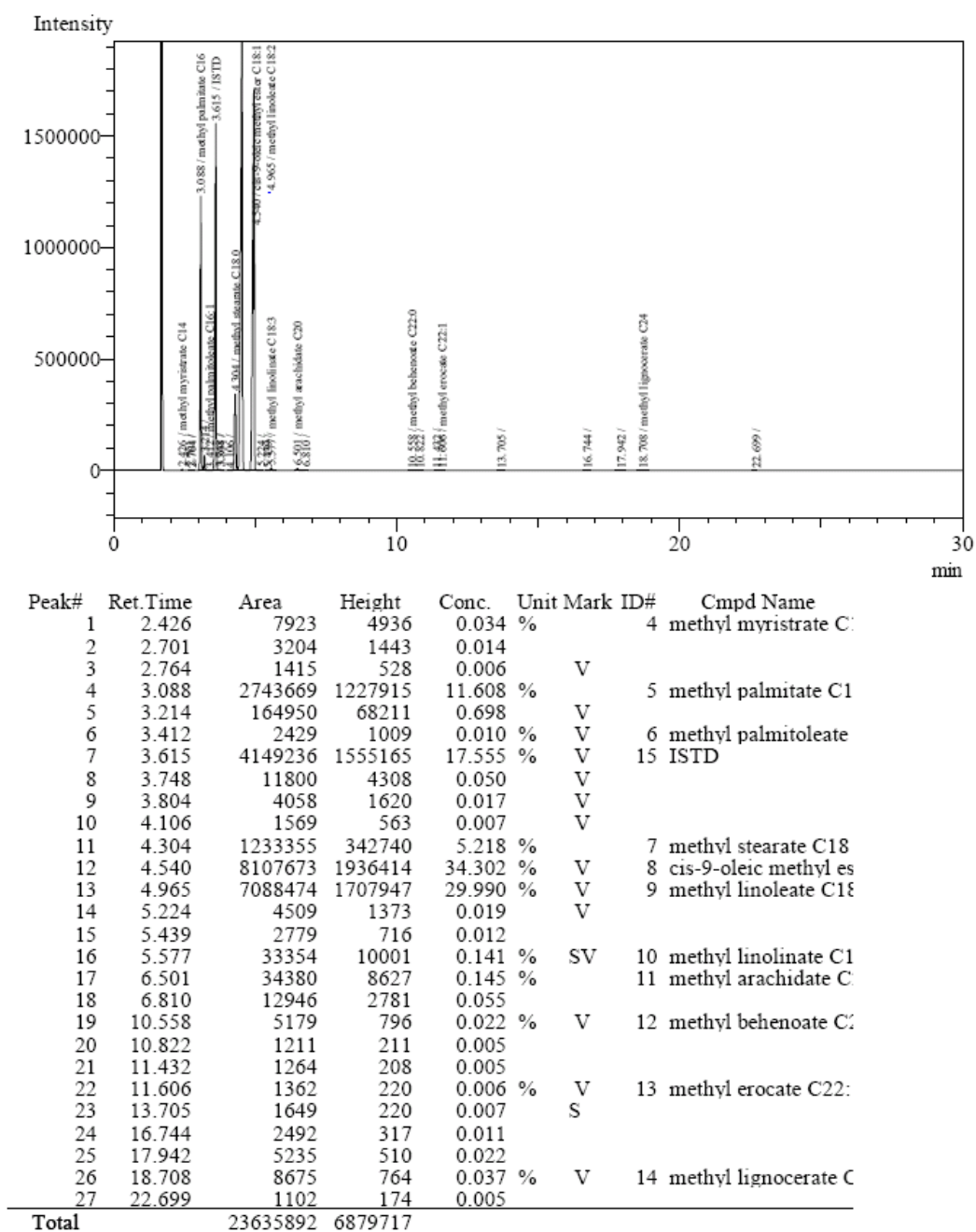
ภาพผนวกที่ 12 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสดำ 6:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



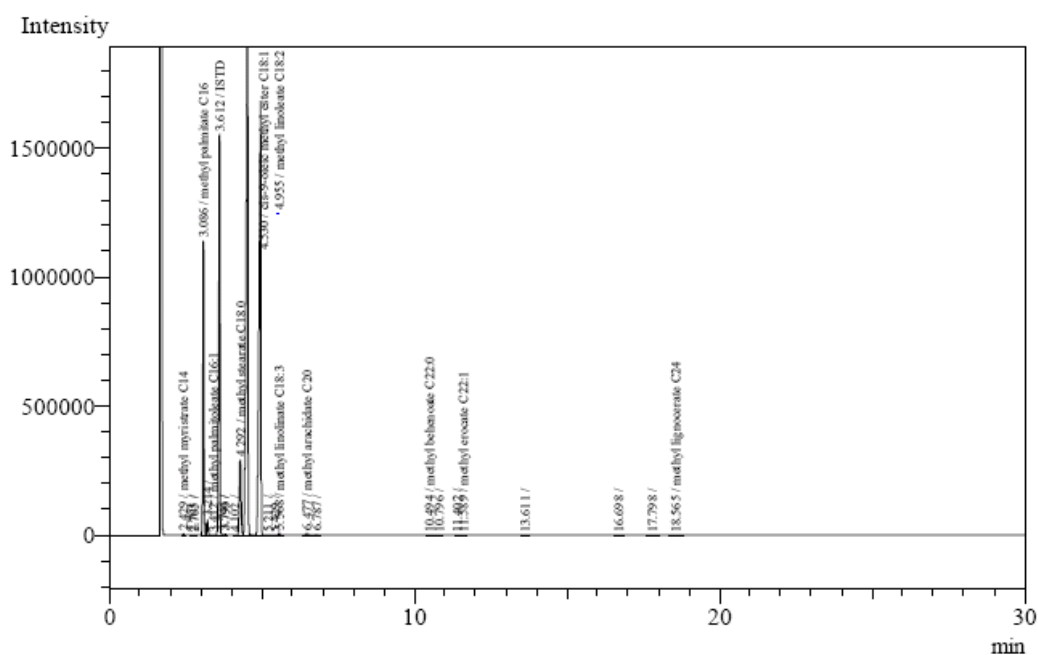
Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.429	7748	3852	0.034	%		methyl myristate C14
2	2.702	2730	1072	0.012			
3	2.765	1202	409	0.005		V	
4	3.084	2627769	996411	11.559	%		methyl palmitate C16
5	3.213	147424	52686	0.649		V	
6	3.411	1975	720	0.009	%	V	methyl palmitoleate C16:1
7	3.607	4105722	1322162	18.061	%	SV	ISTD
8	3.743	5036	1688	0.022		T	
9	4.102	1298	380	0.006		V	
10	4.287	1149847	250927	5.058	%	V	methyl stearate C18:0
11	4.526	7802336	1847027	34.322	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
12	4.951	6790664	1657685	29.871	%	V	methyl linoleate C18:2
13	5.209	3917	953	0.017		V	
14	5.426	2187	468	0.010			
15	5.567	28647	7097	0.126	%	V	methyl linolate C18:3
16	6.476	29600	5340	0.130	%		methyl arachidate C20
17	6.786	11933	1858	0.052		V	
18	10.493	4168	572	0.018	%		methyl behenoate C22:0
19	16.680	2785	290	0.012			
20	18.558	5957	451	0.026	%	S	methyl lignocerate C24
Total		22732945	6152048				

ภาพผนวกที่ 13 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญุดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญุดำ 6:1 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



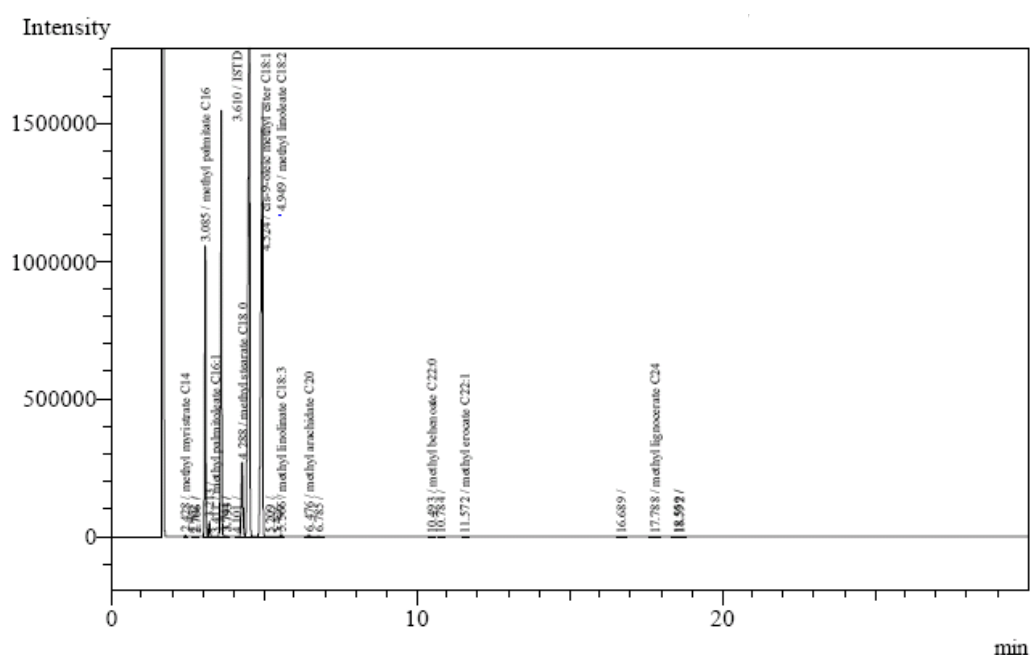
ภาพผนวกที่ 14 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสุญุดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญุดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.429	8449	4555	0.037	%	S	methyl myristate C14
2	2.703	2715	1216	0.012			
3	2.765	1228	430	0.005		V	
4	3.086	2638585	1137396	11.548	%		methyl palmitate C16
5	3.214	148086	59345	0.648		V	
6	3.412	2087	816	0.009	%	V	methyl palmitoleate C16:1
7	3.612	4258867	1552203	18.639	%	V	ISTD
8	3.746	10271	3491	0.045		V	
9	3.793	3567	1488	0.016		V	
10	4.102	1312	431	0.006		V	
11	4.292	1158371	291888	5.070	%		methyl stearate C18:0
12	4.530	7768416	1898104	33.998	%	SV	cis-9-oleic methyl ester C18:1
13	4.955	6748364	1681135	29.534	%	V	methyl linoleate C18:2
14	5.211	4110	1127	0.018		V	
15	5.429	2324	524	0.010			
16	5.568	28466	7735	0.125	%	V	methyl linolenate C18:3
17	6.477	29467	6402	0.129	%		methyl arachidate C20
18	6.787	10906	2108	0.048			
19	10.494	5091	781	0.022	%		methyl behenoate C22:0
20	10.796	1226	179	0.005			
21	11.402	1095	176	0.005		V	
22	11.589	1168	184	0.005	%	V	methyl erocate C22:1
23	13.611	1362	166	0.006			
24	16.698	2683	288	0.012			
25	17.798	4570	397	0.020			
26	18.565	6713	534	0.029	%		methyl lignocerate C24
Total		22849499	6653099				

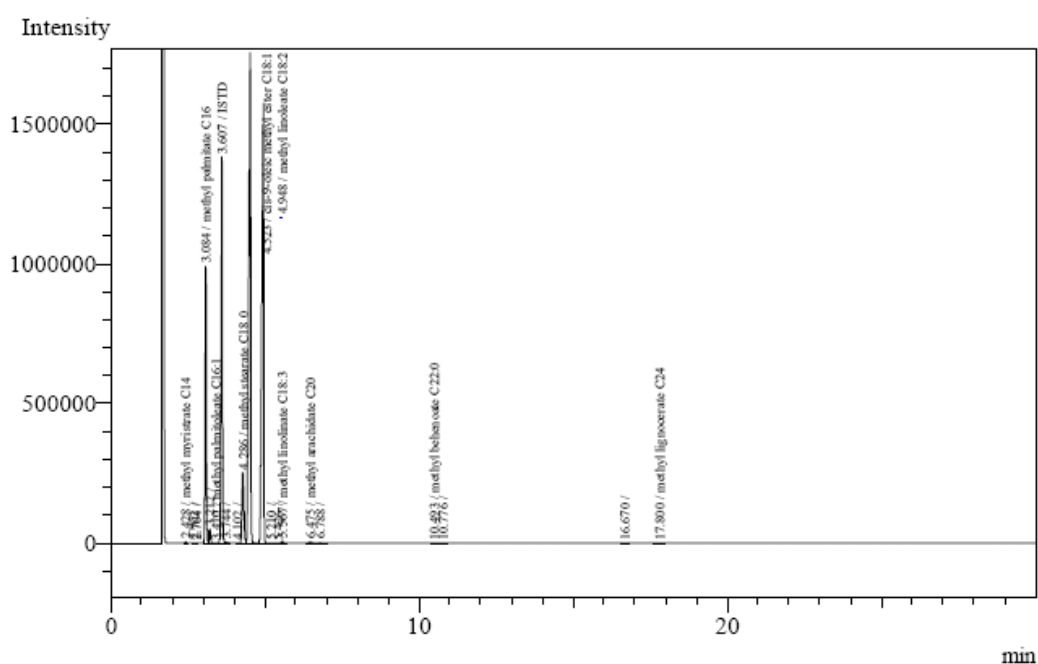
ภาพผนวกที่ 15 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสุญุดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญุดำ 9:1 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.428	7503	4183	0.035	%	S	methyl myristate C14
2	2.702	2598	1155	0.012			
3	2.766	1176	423	0.006		V	
4	3.085	2434693	1055740	11.399	%	V	methyl palmitate C16
5	3.213	137463	55564	0.644		V	
6	3.411	1923	775	0.009	%	V	methyl palmitoleate C16:1
7	3.610	4223844	1545330	19.776	%	V	ISTD
8	3.744	9419	3230	0.044		V	
9	3.793	3513	1402	0.016		V	
10	4.101	1211	412	0.006		V	
11	4.288	1057738	269057	4.952	%		methyl stearate C18:0
12	4.524	7139524	1777804	33.428	%	SV	cis-9-oleic methyl ester C18:1
13	4.949	6248253	1576479	29.255	%	V	methyl linoleate C18:2
14	5.209	4072	1087	0.019		SV	
15	5.426	2130	488	0.010			
16	5.566	26390	7357	0.124	%	V	methyl linolate C18:3
17	6.476	26748	5852	0.125	%		methyl arachidate C20
18	6.785	10747	1947	0.050		S	
19	10.493	3950	594	0.018	%		methyl behenoate C22:0
20	10.784	1029	179	0.005			
21	11.572	1200	172	0.006	%	V	methyl erocate C22:1
22	16.689	2273	270	0.011			
23	17.788	4020	340	0.019	%		methyl lignocerate C24
24	18.559	3850	521	0.018			
25	18.592	2665	498	0.012		V	
Total		21357932	6310859				

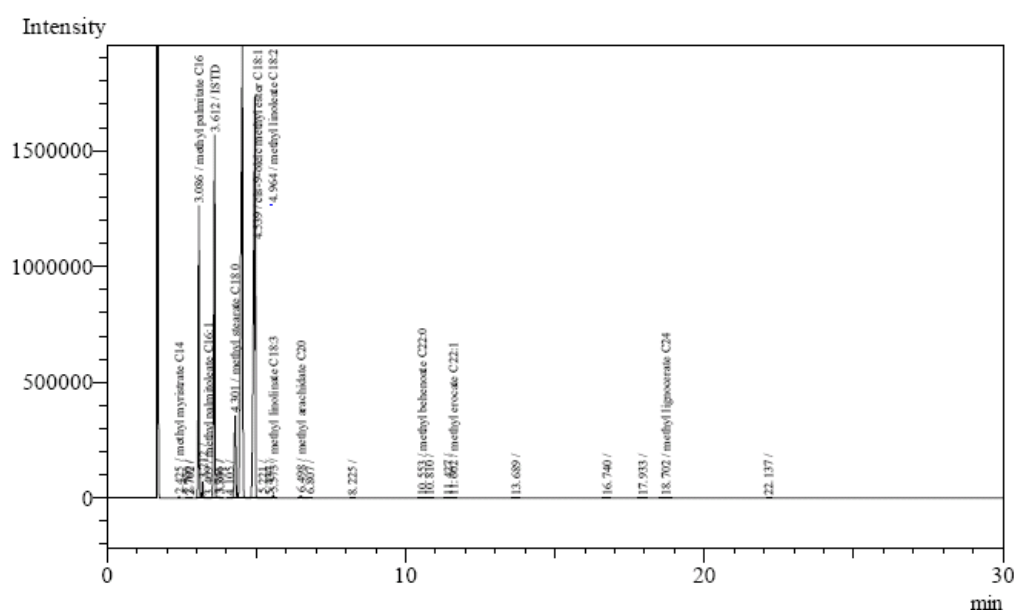
ภาพผนวกที่ 16 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสุญดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดย โมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญดำ 6:1 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.428	7274	3860	0.034	%		methyl myristate C14
2	2.702	2588	1077	0.012			
3	2.764	1160	407	0.005		V	
4	3.084	2466083	990609	11.476	%		methyl palmitate C16
5	3.212	138678	51937	0.645		V	
6	3.410	1893	730	0.009	%	V	methyl palmitoleate C16:1
7	3.607	4071396	1383148	18.946	%	SV	ISTD
8	3.744	5043	1710	0.023		T	
9	4.102	1202	384	0.006		V	
10	4.286	1073610	251083	4.996	%		methyl stearate C18:0
11	4.523	7287741	1753153	33.912	%	SV	cis-9-oleic methyl ester C18:1
12	4.948	6351167	1573102	29.554	%	SV	methyl linoleate C18:2
13	5.210	3472	898	0.016		T	
14	5.426	2143	465	0.010			
15	5.567	26957	7003	0.125	%	SV	methyl linolate C18:3
16	6.475	27736	5316	0.129	%		methyl arachidate C20
17	6.788	11312	1819	0.053		V	
18	10.493	4322	616	0.020	%		methyl behenoate C22:0
19	10.776	1043	162	0.005		V	
20	16.670	1854	221	0.009			
21	17.800	3278	285	0.015	%	V	methyl lignocerate C24
Total		21489952	6027985				

ภาพผนวกที่ 17 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ ไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันสุญดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสุญดำ 9:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit Mark	ID#	Cmpd Name
1	2.425	7772	4939	0.032	%	4	methyl myristate C
2	2.700	3030	1484	0.013	V		
3	2.762	1448	540	0.006	V		
4	3.086	2790509	1262574	11.631	%	5	methyl palmitate C1
5	3.212	167834	70160	0.700	V		
6	3.409	2479	1051	0.010	%	6	methyl palmitoleate
7	3.612	4167373	1566868	17.369	%	15	ISTD
8	3.746	11987	4444	0.050	V		
9	3.801	4073	1643	0.017	V		
10	4.105	1518	570	0.006	V		
11	4.301	1256588	355087	5.237	%	7	methyl stearate C18
12	4.539	8248527	1953892	34.379	%	8	cis-9-oleic methyl es
13	4.964	7209581	1735585	30.049	%	9	methyl linoleate C18
14	5.221	4218	1403	0.018	T		
15	5.437	2696	736	0.011			
16	5.573	34029	10138	0.142	%	V	10 methyl linolate C1
17	6.498	35067	9017	0.146	%		11 methyl arachidate C
18	6.807	13165	2888	0.055			
19	8.225	1044	213	0.004			
20	10.553	5332	826	0.022	%		12 methyl behenoate C
21	10.810	1395	233	0.006			
22	11.427	1517	244	0.006			
23	11.602	1568	238	0.007	%	V	13 methyl erocate C22:
24	13.689	1932	237	0.008			
25	16.740	2539	315	0.011			
26	17.933	5220	544	0.022	%	V	
27	18.702	8819	771	0.037	%	V	14 methyl lignocerate C
28	22.137	1587	243	0.007	%	V	
Total		23992847	6986883				

ภาพผนวกที่ 18 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของไอออน (III) ซัลเฟต เพนทาไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุ่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสนุ่ดำ 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายธีรยุทธ ธรรมวิจิตร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 12 ตุลาคม 2526
สถานที่เกิด	เพชรบุรี
ประวัติการศึกษา	ระดับอุดมศึกษา วศ.บ. (วิศวกรรมศาสตร์) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล (พ.ศ. 2548)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนจากโครงการบัณฑิตวิทยาลัยและวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์