



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญ

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค

Biodiesel Synthesis by Used Lard Oil in a Micro-channel Reactor

นามผู้วิจัย นายอภิชาติ เข้มทรัพย์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถศักดิ์ จาริย์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชนินทร์ ปัญจพรผล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อภิญา ดวงจันทร์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ. _____

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค

Biodiesel Synthesis by Used Lard Oil in a Micro-channel Reactor

โดย

นายอภิชาติ เข้มทรัพย์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อภิชาติ เข้มทรัพย์ 2555: การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถศักดิ์ จารีย์, Ph.D. 102 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูโดยใช้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค ทำการพิจารณาผลกระทบของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 55 ถึง 65 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 ถึง 20 วินาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 4.5 ต่อ 1 ถึง 9 ต่อ 1 และความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 0.7 ถึง 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยจัดทำการศึกษาทดลองแบบเต็มรูปแบบ ผลการทดลองทั้งหมดที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม MINITAB ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์สร้างสมการถดถอยเพื่อใช้พยากรณ์ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีค่าน้อยจะให้ผลของเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่สูงเนื่องจากการถ่ายโอนมวลที่ดีกว่า สังเกตได้จากใช้กลี้องจุลทรรศน์ส่องขนาดของหยดวิภาคของสารที่เข้าทำปฏิกิริยากัน จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอดีเซลคือ ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาคือ 65 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคือ 1.3 เปอร์เซ็นต์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาคือ 5 วินาที พบว่าที่สภาวะดังกล่าวได้ผลเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เป็น 95.41 เปอร์เซ็นต์

Apichat Yamsub 2012: Biodiesel Synthesis by Used Lard Oil in a Micro-channel Reactor. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Attasak Jaree, Ph.D. 102 pages.

Biodiesel synthesis from pork lard via transesterification was performed using a microchannel reactor. In order to investigate the effects of operating parameters including reaction temperature ($55 - 65^{\circ}\text{C}$), residence time ($5 - 20$ s), methanol – to – oil molar ratio ($4.5:1$ to $9:1$), and catalyst concentration ($0.7 - 1.3$ wt.%), a series of full factorial experiments with a complete replicate was conducted. Results were statistically analyzed using MINITAB with the significance level of 95%. A quadratic model was proposed for the prediction of %FAME from the specified operating conditions. High %FAME was obtained at low residence time due to the small size of droplets in the microchannel reactor. Evidence of droplets supported the presence of mass transfer limitation in this system. The optimal operating conditions provided %FAME of 95.41% were as follows: methanol – to – oil ratio of 6:1, temperature of 65°C , residence time of 5 s, and KOH concentration of 1.3%w/w.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จขึ้นได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. อรรถศักดิ์ จารีย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้คำปรึกษา ดูแล สนับสนุนและเอาใจใส่ในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. ชรินทร์ ปัญงพรผล กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณ ดร. อัญชลี สุวรรณมณี ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก และ ดร. ปวีณา สุริยะธนาภาส ประธานการสอบที่ได้สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการในการสอบพร้อมทั้งให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณศิริลักษณ์ พิงษ์ชัยชาญ และ คุณยุทธพงษ์ ธนวรรณพงษ์ ที่คอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค

ขอขอบคุณ คุณวาทัญญู ศิริไพโรจน์ สำหรับคำปรึกษาด้านการคำนวณทางสถิติ การใช้โปรแกรม MINITAB และคำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณรัชฎาภรณ์ แก้วพิลึก สำหรับกำลังใจ คำแนะนำและความช่วยเหลือที่มอบให้เสมอมา คุณชิน ภูมิวาณิช สำหรับคำแนะนำเกี่ยวกับความรู้ด้านวิศวกรรมเคมี

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัว ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

อภิชาติ เข้มทรัพย์

สิงหาคม 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	29
ผลการทดลองและวิจารณ์	35
สรุปและข้อเสนอแนะ	53
สรุป	53
ข้อเสนอแนะ	55
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	56
ภาคผนวก	61
ภาคผนวก ก ผลการทดลองไบโอดีเซลจากเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค	62
ภาคผนวก ข การคำนวณค่าต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย	75
ภาคผนวก ค วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติไบโอดีเซล	82
ภาคผนวก ง ตัวอย่างโครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	85
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	102

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1	สูตร โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมัน	6
2	ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	11
3	ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลชุมชนสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน)	14
4	ปริมาณและชนิดของกรดไขมันของน้ำมันหมู	36
5	ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	38
6	เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองในการสร้างสมการถดถอย	45
7	วิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสมการถดถอย	46
8	เปรียบเทียบน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคกับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	48
9	อัตราการไหลของน้ำมันและเมทานอลที่ความยาวท่อปฏิกรณ์แตกต่างกัน	49
10	คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้เทียบกับค่ามาตรฐาน	52
ตารางผนวกที่		
ก1	สภาวะการทดลองและค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทดลองผลิตไบโอดีเซลแบบช่องจุลภาค	64
ข1	ปริมาณและชนิดของกรดไขมันของน้ำมันหมู	76
ข2	ตัวอย่างค่าจากโครมาโทแกรมของตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์	79

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์	6
2 โครงสร้างโมเลกุล 1,2 ไตรกลีเซอไรด์	7
3 โครงสร้างโมเลกุล 1,3 ไตรกลีเซอไรด์	7
4 โครงสร้างโมเลกุล 1 โมโนกลีเซอไรด์	8
5 โครงสร้างโมเลกุล 2 โมโนกลีเซอไรด์	8
6 กระบวนการแตกสลายทางความร้อน	16
7 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน	17
8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน	19
9 ตัวช่วยในการผสมชนิด T (a) ตัวช่วยในการผสมชนิด Y (b)	21
10 ตัวช่วยการผสมแบบ multilamination ชนิดการไหลสวนทาง	21
11 ตัวช่วยการผสมแบบไฮโดรไดนามิกส์	22
12 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลโดยเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค	31
13 ชุดอุปกรณ์ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	33
14 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ (Normal probability plot) ของค่าความผิดพลาดของการทดลอง	37
15 ความสัมพันธ์ของค่าผิดพลาด (residual plot)	37
16 Contour plot แสดงอิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์	40
17 Contour plot แสดงอิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์	41
18 Contour plot แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์	42
19 Contour plot แสดงอิทธิพลของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์	43
20 Contour plot แสดงอิทธิพลของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
21 ขนาดหยดอนุภาคที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกัน (i) 5 วินาที (ii) 10 วินาที (iii) 20 วินาที	45
22 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทดลองกับสมการถดถอย	47
23 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ความยาวท่อปฏิกิริยาแตกต่างกัน	49
24 ขนาดอนุภาคที่ความยาวท่อปฏิกิริยาแตกต่างกัน อัตราการไหลเท่ากัน ความยาวท่อปฏิกิริยา 240 เซนติเมตร (ก) ความยาวท่อปฏิกิริยา 120 เซนติเมตร (ข)	50
25 เปรียบเทียบความดันที่ความยาวท่อปฏิกิริยาต่างกัน	50
ภาพผนวกที่	
ข1 โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์	77
ข2 ตัวอย่างโครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์	78
ค1 หลอดวัดความหนืด (viscometer)	83
ค2 เครื่อง Pensky – Martens Closed Flash Tester	83
ง1 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.3% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที	86
ง2 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.3% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที	86
ง3 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.3% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที	87
ง4 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง5 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที	88
ง6 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที	88
ง7 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที	89
ง8 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.3% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที	89
ง9 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.3% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที	90
ง10 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที	90
ง11 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที	91
ง12 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที	91

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง13 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที	92
ง14 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที	92
ง15 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที	93
ง16 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที	93
ง17 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที	94
ง18 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที	94
ง19 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที	95
ง20 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.3% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที	95

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง30 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที	100
ง31 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที	101
ง32 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที	101

การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค

Biodiesel Synthesis by Used Lard Oil in a Micro-channel Reactor

คำนำ

ในปัจจุบันน้ำมันเชื้อเพลิงส่วนใหญ่มาจากแหล่งที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียมซึ่งกำลังมีปริมาณน้อยลง ส่งผลให้ราคาของน้ำมันเชื้อเพลิงในท้องตลาดมีค่าสูงมากขึ้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหาแหล่งพลังงานใหม่เพื่อนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงแบบเก่า ไบโอดีเซลถือเป็นพลังงานทางเลือกใหม่ที่สามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมได้ เพราะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ไบโอดีเซลมีค่าเลขซีเทนและจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันทั่วไปโดยที่มีการให้พลังงานความร้อนไม่ต่างกัน (Kouzu *et al.*, 2008) และไบโอดีเซลมีปริมาณอะโรมาติกและซัลเฟอร์เจือปนน้อยกว่าน้ำมันดีเซล (Nas *et al.*, 2007) สารตั้งต้นที่นำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลส่วนใหญ่ได้มาจากธรรมชาติซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากและวงจรชีวิตในการให้น้ำมันไม่ใช้เวลานานเท่ากับน้ำมันที่ได้จากปิโตรเลียม ด้วยเหตุนี้ไบโอดีเซลจึงถือเป็นพลังงานทดแทนทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมในปัจจุบัน

ไบโอดีเซลโดยทั่วไปแบ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ซึ่งสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้เลย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไบโอดีเซลแบบนี้จะพบปัญหาเรื่องความหนืดที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลทำให้เกิดความเสียหายในหัวฉีดและกระบอกสูบของเครื่องยนต์ แบบที่ 2 คือไบโอดีเซลที่ได้จากการนำน้ำมันพืชหรือสัตว์มาผสมกับน้ำมันดีเซลก่อนนำไปใช้ และแบบที่ 3 ซึ่งถือเป็นแบบที่นิยมมากที่สุด คือไบโอดีเซลที่ได้จากการนำน้ำมันพืชหรือสัตว์มาผ่านกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันซึ่งเป็นกระบวนการผลิตโดยมีสารตั้งต้นเป็น ไขมันทำปฏิกิริยากับเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล โดยสามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบส กรด หรือเอนไซม์ การใช้เบสหรือกรดในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลจะใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่าและต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่ง (Dorado *et al.*, 2004) ในปัจจุบันกระบวนการผลิตไบโอดีเซลส่วนใหญ่จะทำการผลิตในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ เพื่อให้ได้ fatty acid methyl ester (FAME) ในปริมาณสูง ซึ่งจะมีข้อเสียคือการใช้เวลาในการผลิตนานหลายชั่วโมง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการผลิตไบโอดีเซลแบบใหม่เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการผลิตไบโอดีเซล โดยจะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคในการผลิตไบโอดีเซล โดยหลักการพื้นฐานของเครื่องปฏิกรณ์แบบ

ช่องจุลภาคคืออาศัยหลักการการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารที่เข้าทำปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนของมวลและความร้อนได้ดีขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น (Kobayashi *et al.*, 2006) นอกจากนี้ข้อดีอีกอย่างหนึ่งก็คือตัวเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคยังใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยเมื่อเทียบการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ซึ่งถือเป็นข้อได้เปรียบหากสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจริง

เนื่องจากในปัจจุบันนี้การผลิตไบโอดีเซลได้นำน้ำมันพืชมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิต ซึ่งราคาวัตถุดิบมักจะมีมูลค่าสูงส่งผลให้ไบโอดีเซลมีมูลค่าสูงตามไปด้วย และบางช่วงเวลาพืชบางชนิดก็ประสบภาวะขาดแคลน เช่น ปาล์มน้ำมัน ทำให้หาวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลยากขึ้น งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะใช้น้ำมันหมูเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการผลิตไบโอดีเซลเพราะในปัจจุบันน้ำมันหมูไม่ได้รับความนิยมในการนำมาประกอบอาหารเนื่องจากน้ำมันหมูเป็นสาเหตุใหญ่ของโรคหลอดเลือดและโรคหัวใจ จึงทำให้น้ำมันหมูมีมูลค่าเริ่มต้นถูกกว่าน้ำมันพืช แต่ข้อเสียของน้ำมันหมูคือคุณภาพของน้ำมันหมูเริ่มต้นจะไม่ดีเท่ากับน้ำมันพืชและมีสถานะเป็นของแข็งกึ่งของเหลวที่อุณหภูมิห้อง จึงต้องปรับปรุงกระบวนการในการผลิตไบโอดีเซลโดยจะต้องมีการให้ความร้อนน้ำมันให้อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องก่อนที่จะนำไปทำปฏิกิริยา ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้กระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคเพื่อศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์ FAME ที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน และหาค่าเวลาน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยา โดยจะใช้การวิเคราะห์ทางสถิติหาค่าความแปรปรวนของข้อมูลเพื่อศึกษาผลกระทบร่วมของปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ FAME รวมถึงทำการศึกษาผลกระทบของความยาวของท่อปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ FAME ซึ่งจะเป็นข้อมูลสำคัญในการพัฒนาวิธีการผลิตไบโอดีเซลให้ดีขึ้นในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมัน เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Residence time) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิ ที่มีผลในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันซึ่งส่งผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (FAME) ค่าความหนืด และค่าความเป็นกรด (Acid value) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค
2. ใช้หลักการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการถดถอยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆเพื่อหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์จากเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค
3. ใช้หลักการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยร่วมที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์
4. ศึกษาผลกระทบของขนาดความยาวท่อปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทดสอบหาปริมาณ FAME จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคโดยศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันในช่วงระหว่าง 4.5:1 และ 9:1
2. ทดสอบหาปริมาณ FAME จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคโดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาในช่วงระหว่าง 55 – 65 องศาเซลเซียส
3. ทดสอบหาปริมาณ FAME จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคโดยศึกษาผลกระทบระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เวลา 5, 10 และ 20 วินาที
4. ทดสอบหาปริมาณ FAME จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคโดยศึกษาผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณร้อยละ 0.7 - 1.3
5. ทดสอบคุณสมบัติของเมทิลเอสเทอร์ทางด้านเชื้อเพลิงได้แก่ ความหนืด (Viscosity) ค่าความเป็นกรด (Acid value) จุดหมอกควัน (Cloud point) จุดไหลเท (Pour point) และ จุดวาบไฟ (Flash point)
6. ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ วิเคราะห์หาสมการถดถอย เพื่อสร้างสมการเพื่อใช้ทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค
7. ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้ (ANOVA) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยแต่ละปัจจัย (interaction) ที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์
8. ทดสอบหาปริมาณ FAME จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคโดยศึกษาผลกระทบของขนาดความยาวของท่อปฏิกรณ์

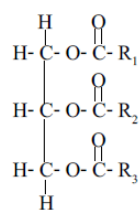
การตรวจเอกสาร

1. ไขมันและน้ำมัน

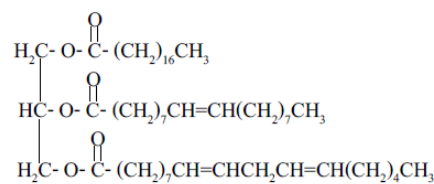
ไขมันและน้ำมันเป็นสารชนิดเดียวกัน เพียงแต่สมบัติทางกายภาพมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยถ้าอยู่ในสถานะของเหลวเรียกว่าน้ำมัน แต่ถ้าอยู่ในสถานะของแข็งจะเรียกว่าไขมัน กรดไขมันเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนพื้นฐานของไขมัน กรดไขมันประกอบด้วยโครงสร้างโมเลกุลของธาตุองค์ประกอบ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน คุณภาพของน้ำมันแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับชนิดกรดไขมันที่ประกอบขึ้นมา

กรดไขมันเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีคาร์บอน 4 ถึง 36 ตัว พันธะระหว่างคาร์บอนอาจเป็นพันธะเดี่ยวทั้งหมดเรียกว่ากรดไขมันอิ่มตัว แต่ถ้ามีพันธะคู่อยู่จะเรียกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว จุดหลอมเหลวของกรดไขมันขึ้นอยู่กับจำนวนคาร์บอนและจำนวนพันธะคู่ ตัวอย่างของกรดไขมันและโครงสร้างทางเคมีได้แสดงดังตารางที่ 1 โดยการรวมตัวของกรดไขมันสามโมเลกุลกับกลีเซอรอลจะได้ไตรกลีเซอไรด์ (Agarwal, 2007)

ไตรกลีเซอไรด์เป็นเอซิลกลีเซอรอลที่พบมากที่สุด ส่วนใหญ่จะพบในรูปเอซิลกลีเซอรอลซึ่งเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันสามโมเลกุลและกลีเซอรอลหนึ่งโมเลกุล โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์แสดงได้ดังภาพที่ 1 กรดไขมันที่พบในน้ำมันพืชส่วนใหญ่คือกรดไขมันไม่อิ่มตัวทำให้น้ำมันพืชมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ส่วนไขมันสัตว์จะประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวสูงและเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง (Fangrui and Milford, 1999)



ไตรกลีเซอไรด์



ตัวอย่างโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์

ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์

ที่มา : Srivastana and Prasad (2000)

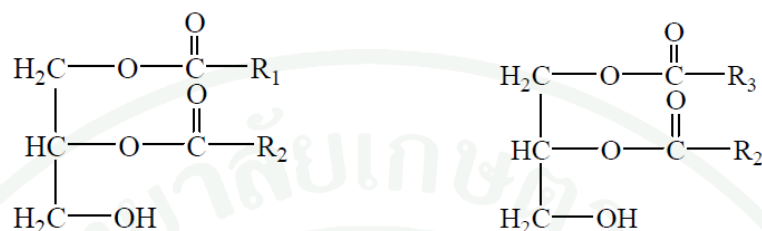
ตารางที่ 1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของกรดไขมัน

Fatty acid	Systematic name	Structure	Formula
Lauric	Dodecanoic	12:00	$\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_2$
Myristic	Tetradecanoic	14:00	$\text{C}_{14}\text{H}_{28}\text{O}_2$
Palmitic	Hexadecanoic	16:00	$\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$
Stearic	Octadecanoic	18:00	$\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$
Arachidic	Eicosanoic	20:00	$\text{C}_{20}\text{H}_{40}\text{O}_2$
Behenic	Docosanoic	22:00	$\text{C}_{22}\text{H}_{44}\text{O}_2$
Lignoceric	Tetracosanoic	24:00:00	$\text{C}_{24}\text{H}_{48}\text{O}_2$
Oleic	cis-9-Octadecenoic	18:01	$\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$
Linoleic	cis-9,cis-12-Octadecadienoic	18:02	$\text{C}_{18}\text{H}_{32}\text{O}_2$
Linolenic	cis-9,cis-12,cis-15-Octadecatrienoic	18:03	$\text{C}_{18}\text{H}_{30}\text{O}_2$
Erucic	cis-13-Docosenoic	22:01	$\text{C}_{22}\text{H}_{42}\text{O}_2$

ที่มา: Srivastana and Prasad (2000)

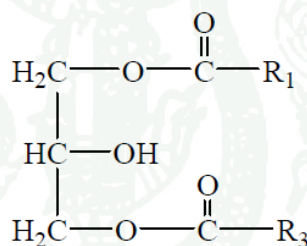
ไตรกลีเซอไรด์เป็นเอสเทอร์ของกลีเซอรอลกับกรดไขมันสองหมู่และมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเหลืออยู่ 1 หมู่ จะพบในไขมันที่เกิดการไฮโดรไลซิสไม่สมบูรณ์ ไตรกลีเซอไรด์มี 2 ไอโซเมอร์

ได้แก่ 1,2 ไคกลีเซอไรด์ มีหมู่เอซิลเกาะอยู่บนกลีเซอรอลคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 2 ส่วนอีกไอโซเมอร์คือ 1,3 ไคกลีเซอไรด์ มีหมู่เอซิลเกาะอยู่บนกลีเซอรอลคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 3 แสดงได้ดังภาพที่ 2 และ 3



ภาพที่ 2 โครงสร้างโมเลกุล 1,2 ไคกลีเซอไรด์

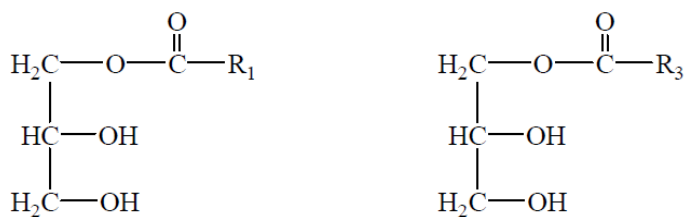
ที่มา : Christie (1992)



ภาพที่ 3 โครงสร้างโมเลกุล 1,3 ไคกลีเซอไรด์

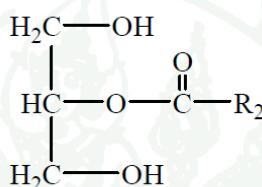
ที่มา : Christie (1992)

โมโนกลีเซอไรด์เป็นเอสเทอร์ของกลีเซอรอลกับกรดไขมันหนึ่งหมู่และมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเหลืออยู่ 2 หมู่ ซึ่งโมโนกลีเซอไรด์จะมีไอโซเมอร์ 2 ไอโซเมอร์ ได้แก่ 1 โมโนกลีเซอไรด์ มีหมู่เอซิลเกาะอยู่บนกลีเซอรอลคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 2 โมโนกลีเซอไรด์ มีหมู่เอซิลเกาะอยู่บนกลีเซอรอลคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 4 และ 5



ภาพที่ 4 โครงสร้างโมเลกุล 1 โมโนกลีเซอไรด์

ที่มา : Christie (1992)



ภาพที่ 5 โครงสร้างโมเลกุล 2 โมโนกลีเซอไรด์

ที่มา : Christie (1992)

2. ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล คือ น้ำมันที่ผลิตได้จากน้ำมันพืช น้ำมันสัตว์หรือน้ำมันใช้แล้ว ผ่านกระบวนการทางเคมีโดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้เป็นน้ำมันชนิดใหม่ในรูปของเอสเทอร์ คุณสมบัติของไบโอดีเซลนั้นจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของกรดไขมันและจำนวนพันธะคู่ที่ไม่เท่ากัน (บริษัท พาราไซแอนติฟิค จำกัด, 2551) ไบโอดีเซลช่วยลดมลภาวะของอากาศ ช่วยลดมลพิษและบรรเทาภาวะโลกร้อน โดยไบโอดีเซลนับเป็นเชื้อเพลิงไม่ก่ษนิตที่สามารถทำงานร่วมกับดีเซลธรรมดาได้ (กระทรวงพลังงาน, 2547)

ไบโอดีเซลได้ถูกนำมาใช้กับเครื่องยนต์เป็นผลสำเร็จครั้งแรกในโลกเมื่อวันที่ 10 สิงหาคม ค.ศ. 1893 โดย Rudolf C. Diesel วิศวกรชาวเยอรมัน ได้นำเครื่องยนต์ลูกสูบเดี่ยวที่ทำจากเหล็กยาว 3 เมตร มีดัดเพื่อติดอยู่ที่ฐาน มาทดลองใช้กับน้ำมันไบโอดีเซล ที่เมืองอัคร์สเบิร์ก ประเทศเยอรมนี

ซึ่งความสำเร็จในครั้งนั้นถือเป็นจุดเริ่มต้นของการนำน้ำมันไบโอดีเซลมาใช้ในเครื่องยนต์ และได้กำหนดให้วันที่ 10 สิงหาคม เป็นวันไบโอดีเซลระหว่างประเทศ

น้ำมันไบโอดีเซลมีคุณสมบัติในการเผาไหม้ได้ดีไม่ต่างจากน้ำมันจากปิโตรเลียม แต่มีข้อดีกว่าหลายอย่างคือ ปลอดภัยกว่าพิษที่เป็นอันตรายต่อโลกน้อยกว่า นอกจากนี้ยังให้ค่าออกเทนที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลปกติด้วย ทำให้เครื่องยนต์เผาไหม้ได้ดีกว่าและช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ได้มากขึ้น (อาภาณี, 2549)

ประเทศไทยเริ่มมีการวิจัยโครงการไบโอดีเซลตั้งแต่ปี 2524 โดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วท.) ได้ทำการศึกษาโดยใช้ไขมันถั่วเหลืองมาเป็นพลังงานทดแทน พบว่าไขมันถั่วเหลืองมีความหนืดสูงก่อให้เกิดปัญหาในเครื่องยนต์เพราะทำให้เกิดการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์และมีตะกอนเกิดขึ้น หลังจากนั้นได้มีการทดลองนำเอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม (FAME) มาทดลองใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล โดยลักษณะน้ำมันที่ได้มีความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล หลังจากนั้นในช่วงปี 2543 เกิดภาวะวิกฤติพลังงาน จึงทำให้เกิดการผลิตไบโอดีเซลด้วยมะพร้าวโดยกลุ่มชาวบ้านอำเภอทับสะแก และได้เปิดเป็นสถานีจำหน่ายน้ำมันไบโอดีเซลแห่งแรกขึ้นในประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2544

เนื่องจากไบโอดีเซลเป็นการนำไขมันเชื้อเพลิง หรือน้ำมันสัตว์ รวมทั้งไขมันใช้แล้วจากการปรุงอาหารมาทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแอลกอฮอล์ เพื่อให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลโดยในกระบวนการผลิตยังได้ กลีเซอรอล เป็นผลพลอยได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์ได้อีกด้วย

คุณค่าของไบโอดีเซล ต่อการใช้งาน สิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ

1. ช่วยเพิ่มการหล่อลื่นให้เครื่องยนต์ได้ดีกว่ามากเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลทั่วไป
2. เพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ช่วยลดมลพิษทางอากาศ ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse effect) เพราะผลิตจากพืช
3. การผลิตไบโอดีเซล B5 (น้ำมันผสมระหว่างน้ำมันดีเซล 95 เปอร์เซ็นต์ กับไบโอดีเซล 5 เปอร์เซ็นต์) จากน้ำมันพืชใช้แล้ว ช่วยลดการนำไปประกอบอาหารซ้ำ เพราะน้ำมันพืชใช้แล้วมีสารก่อมะเร็งและก่อมลพิษทางน้ำ
4. ช่วยสร้างรายได้ให้เกษตรกรเพราะผลิตจากพืชเกษตร

5. ลดการนำเข้าน้ำมันได้ส่วนหนึ่ง รวมทั้งทดแทนการนำเข้าของสารหล่อลื่นจากต่างประเทศ

กรมธุรกิจพลังงานยังได้กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลเพื่อใช้เป็นมาตรฐาน โดยทั่วกันดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งน้ำมันไบโอดีเซลที่จะนำมาใช้กับเครื่องยนต์ควรมีคุณสมบัติ ดังตารางที่ได้แสดงไว้ เมื่อพิจารณาข้อกำหนดและมาตรฐานในการทดสอบดังตารางที่ 2 สามารถ แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน

1. การตรวจสอบคุณสมบัติทั่วไปที่เป็นข้อกำหนดคุณภาพที่ดีของน้ำมัน ได้แก่ ค่าความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ ปริมาณกำมะถัน ปริมาณกากถ่าน จำนวนซีเทน ปริมาณเถ้าซัลเฟต ปริมาณน้ำ สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด การกัดกร่อนแผ่นทองแดง ค่าความเป็นกรด ปริมาณโลหะกลุ่มที่1 (โซเดียมและโปแตสเซียม) และปริมาณโลหะกลุ่มที่2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) ที่ปนเปื้อน

2. การตรวจสอบคุณสมบัติเฉพาะของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ ได้แก่

2.1 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์และกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์(สัดส่วนของปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันทั้งหมด) ซึ่งจะแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของน้ำมันเริ่มต้นที่ใช้ในการผลิต

2.2 ปริมาณเมทานอล โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมดเป็นปริมาณสารที่บ่งบอกถึงความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำมันกับเมทานอลและมีกระบวนการแยกกลีเซอรินที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกไปได้เป็นอย่างดี โดยกำหนดเกณฑ์ให้มีปริมาณสารเหล่านี้อยู่ในปริมาณที่มีค่าน้อย

2.3 ทดสอบการมีเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และค่าไอโอดีน เนื่องจากไบโอดีเซลผลิตจากน้ำมันพืชหรือสัตว์จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวกับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพการเก็บ

ตารางที่ 2 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ
1	เมทิลเอสเตอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methyl Ester, % wt.)	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส (Density at 15 °C, kg/m ³)	ไม่ต่ำกว่า 860 และไม่สูงกว่า 900	ASTMD1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เซนติสโตกส์ (Viscosity at 40 °C, cSt)	ไม่ต่ำกว่า 3.5 และไม่สูงกว่า 5	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส (Flash Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
5	กำมะถัน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur, %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.001	ASTMD2622
6	กากถ่าน ร้อยละโดยน้ำหนัก (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (Carbon Residue , on 10 % distillation residue, %wt)	ไม่สูงกว่า 0.3	ASTMD4530
7	จำนวนซีเทน (Cetane Number)	ไม่ต่ำกว่า 51	ASTM D 613
8	เถ้าซัลเฟต ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphated Ash, %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D 874
9	น้ำ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Water, %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.05	ENISO12937
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก (Total Contaminate, %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.0024	EN 12662

ตารางที่ 2 (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า หมายเลข 1	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยา ชั่วโมง ออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (Oxidation Stability at 100 °C, hours)	ไม่ต่ำกว่า 6	EN 14112
13	ค่าความเป็นกรด มิลลิกรัม โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม (Acid Value , mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า 0.5	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน กรัมไอโอดีน/ 100 กรัม (Iodine Value , g Iodine / 100 g)	ไม่สูงกว่า 120	EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Linolenic Acid Methyl Ester , %wt.)	ไม่สูงกว่า 12	EN 14103
16	เมทานอล ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methanol, %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.2	EN 14110
17	โมนอกลิเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Monoglyceride %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.8	EN 14105
18	ไดกลีเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Diglyceride , %wt)	ไม่สูงกว่า 0.2	EN 14105
19	ไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Triglyceride , %wt)	ไม่สูงกว่า 0.2	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Free glycerin , %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.02	EN 14105

ตารางที่ 2 (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด	วิธีทดสอบ
21	กลีเซอรินทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก (Total glycerin, %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโปแตสเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group I metals (Na+K), mg/kg)	ไม่สูงกว่า 5	EN14108และ EN 14109
23	โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group II metals (Ca+Mg), mg/kg)	ไม่สูงกว่า 5	pr EN 14538
24	ฟอสฟอรัส ร้อยละโดยน้ำหนัก (Phosphorus, %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.001	ASTMD4951

ที่มา : กรมธุรกิจพลังงาน (2550)

นอกจากนี้กรมธุรกิจพลังงานยังได้ออกประกาศเกี่ยวกับการกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลชุมชนสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ในปี 2549 ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งน้ำมันไบโอดีเซลที่จะนำมาใช้กับเครื่องยนต์ทางการเกษตรควรมีคุณสมบัติดังตารางที่แสดงไว้

ตารางที่ 3 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลชุมชนสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร(ไบโอดีเซลชุมชน)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ
1	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 ⁰ C (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	860 – 900	ASTM D1298
2	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 ⁰ C (เซนติสโตกส์)	1.9 – 8	ASTM D 445
3	จุดวาบไฟ (°C)	120 min.	ASTM D 93
4	กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.0015 max.	ASTM D2622
5	จำนวนซีเทน	47 min.	ASTM D 613
6	น้ำและตะกอน (ร้อยละโดยปริมาตร)	0.02 max.	ASTM D2709
7	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	หมายเลข 3 max.	ASTM D 130
8	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 ⁰ C (ชั่วโมง)	6 min.	EN 14112
9	ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)	0.8 max.	ASTM D 664
10	กลีเซอรินอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.02 max.	EN 6584
11	กลีเซอรินทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1.5 max.	EN 6584
12	สี	ม่วง	พิจารณาด้วยสายตา

ที่มา : กรมธุรกิจพลังงาน (2549)

กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

1. การใช้โดยตรงและการผสม เป็นการใช้น้ำมันพืชโดยตรงเช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลืองไปใช้โดยตรงกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่มีการเติมสารเคมีเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมัน ส่วนแบบการผสมคือการนำน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ไปผสมกับน้ำมันดีเซล

ในอัตราส่วนต่างๆกัน เนื่องจากน้ำมันพืชโดยปกติจะมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล ดังนั้นการนำมาผสมกันจะช่วยลดความหนืดของน้ำมันพืชลง แต่ถ้าผสมในอัตราส่วนที่ไม่ดีจะทำให้มีปัญหาในการนำไปใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล เช่น อาจเกิดยางเหนียวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันอิสระระหว่างการเก็บรักษา หรือเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในขั้นตอนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ (Agarwal, 2007)

2. ไมโครอิมัลชัน เป็นคอลลอยด์ที่อยู่ในสถานะสมดุลของระบบที่ใช้ไขมันลิฟอเอร์เป็นตัวประสานของสารสองชนิดที่ไม่ละลายกันให้กลายเป็นเนื้อเดียวกันได้ โดยมีอนุภาคในคอลลอยด์ส่วนมากอยู่ในช่วง 1 – 150 นาโนเมตร เป็นวิธีที่ช่วยแก้ปัญหาความหนืดสูงของน้ำมันพืช ซึ่งน้ำมันที่ผลิตจากวิธีนี้จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงน้ำมันดีเซล แต่จะมีค่าซีเทนและค่าความร้อนต่ำกว่า (Srivastava and Prasad, 2000) นอกจากนี้เมื่อนำมาใช้กับเครื่องยนต์จะเกิดการสะสมของคราบซึ่งเป็นสารประกอบคาร์บอน สะสมบนวาล์วและหัวฉีดของเครื่องยนต์ (Ma and Hanna, 1999)

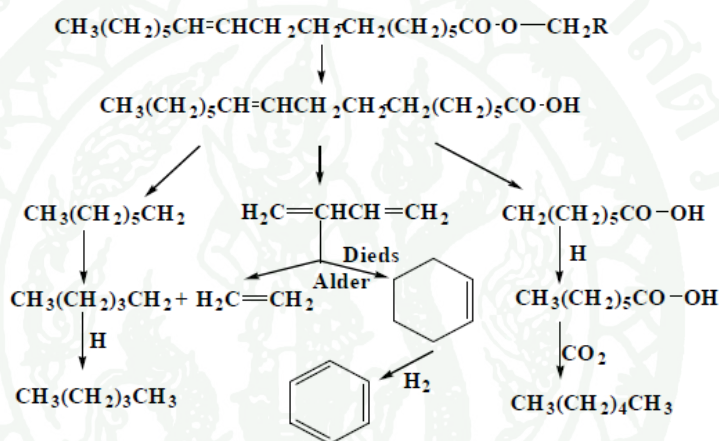
3. กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน เป็นการเปลี่ยนสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงโดยใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว หรืออาจใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 550 – 850 องศาเซลเซียส โดยจะต้องมีการจำกัดปริมาณอากาศหรือออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการด้วยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ วัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการแตกสลายทางความร้อนได้แก่ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรดไขมันธรรมชาติ และเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้มีได้หลายแบบ เช่น แอลเคน แอลคีน อะโรมาติกและกรดคาร์บอกซิลิก เป็นต้น โดยพบว่าน้ำมันที่ได้จะมีค่าความหนืดต่ำและค่าซีเทนสูง แต่ข้อเสียของการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีนี้คือ เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตมีราคาแพงและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวมีปริมาณน้อย (Fukuda *et al*, 2001) กลไกการเกิดกระบวนการการแตกสลายด้วยความร้อนแสดงดังภาพที่ 6

4. การทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสถานะเหนือวิกฤติ เป็นการผลิตไบโอดีเซลโดยไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นการนำน้ำมันพืชหรือสัตว์มาทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสถานะเหนือวิกฤติ โดยจะต้องใช้อุณหภูมิและความดันในระบบค่อนข้างสูงเพื่อให้เมทานอลอยู่ในสถานะเหนือวิกฤติ

5. กระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน เป็นการผลิตไบโอดีเซลหรือสารประกอบเอสเทอร์โดยการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ (Triglyceride) มาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์และมีตัวเร่งในการ

เกิดปฏิกิริยา โดยมีสัดส่วนโดยโมลของปริมาณแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็น 3 ต่อ 1 ได้ผลิตภัณฑ์เป็น เอสเทอร์ 3 โมลและกลีเซอรอล 1 โมล (Vincente *et al.*, 2004)

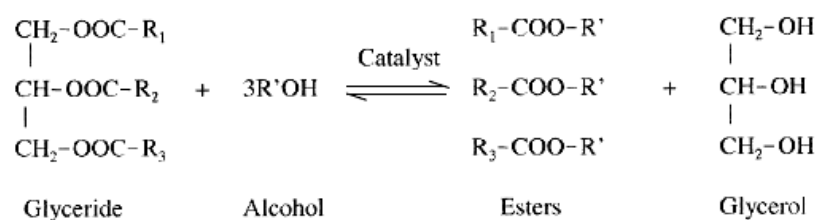
ในกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันส่วนใหญ่จะใช้แอลกอฮอล์ชนิดเมทานอลและเอทานอลซึ่งบางครั้งสามารถใช้โพรพานอล บิวทานอล หรือ เอมีลแอลกอฮอล์ได้ เนื่องจากแอลกอฮอล์ดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมด มีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่ดีคือ ความเป็นขี้และสายโซ่ของแอลกอฮอล์ที่สั้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีและทำปฏิกิริยาได้เร็ว (Doell *et al.*, 2008) และสมการการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นดังภาพที่ 7



ภาพที่ 6 กระบวนการแตกสลายทางความร้อน

ที่มา: Srivastava and Prasad (2000)

ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน ขั้นตอนแรก เมื่อไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นไดกลีเซอไรด์ จากนั้นไดกลีเซอไรด์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นโมโนกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นกลีเซอรอล โดยในแต่ละขั้นตอนจะผลิตเอสเทอร์ 1 โมเลกุล (Fukuda *et al.*, 2001)



ภาพที่ 7 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

ที่มา: Ma and Hanna (1999)

ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นเพื่อให้ปฏิกิริยาเดินไปข้างหน้าจึงต้องใช้แอลกอฮอล์ในปฏิกิริยาให้มากเกินไป โดยแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ เมทานอล เพราะราคาถูกและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย อีกทั้งโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายสั้นจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่า

การนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน จะช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีขึ้น โดยชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้ดังนี้ (Marchetti *et al.*, 2005)

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส โดยทั่วไปนิยมใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสนี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังให้ปริมาณไบโอดีเซลที่สูงมากกว่า (Ma and Hanna, 1999) แต่มีข้อเสียคือ ถ้าน้ำมันตั้งต้นมีปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) เกือบอยู่มาก จะทำให้เกิดสบู่แทนที่จะเกิดเป็นไบโอดีเซล (Agarwal, 2007)

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด โดยทั่วไปนิยมใช้กรดซัลฟิวริก การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะช่วยให้ได้ผลผลิตของไบโอดีเซลมากสามารถใช้กับวัตถุดิบที่เป็นน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระปนอยู่ในปริมาณสูงได้ แต่มีข้อเสียคือปฏิกิริยาจะเกิดได้ช้า บางครั้งใช้เวลามากกว่า 1 วันในการเกิดปฏิกิริยา (Fukuda *et al.*, 2001)

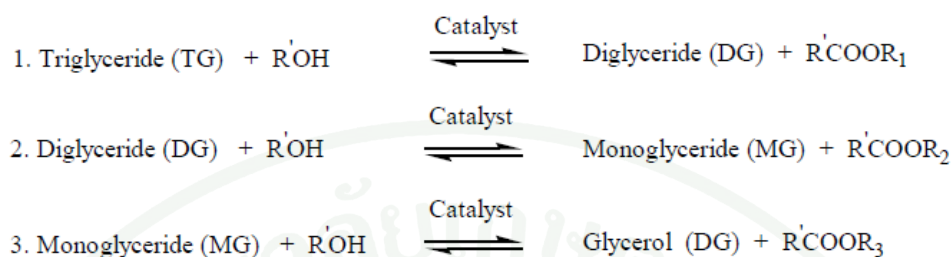
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้เอนไซม์ กระบวนการผลิตไบโอดีเซลสามารถใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เช่นเอนไซม์ไลเปส ข้อดีของการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคือ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก แต่มีข้อเสียคือราคาแพง (Fukuda *et al.*, 2001)

4. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ โดยปกติการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสและกรดจะมีความยุ่งยากในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับระบบ เช่น ZrO_2 , ZnO , KNO_3/KL เป็นต้น จะช่วยแก้ปัญหานี้ได้ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์จะช่วยแก้ปัญหาการเกิดสบู่ในปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์สามารถสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีการก่อก้อนน้อย และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Doissin *et al.*, 2006)

5. การผลิตแบบ 2 ขั้นตอน (2 steps reaction) เป็นกระบวนการผลิตที่รวมปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันแบบใช้กรดและเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ด้วยกัน เพื่อให้การผลิตไบโอดีเซลที่ผลิตจากสารตั้งต้นที่มีกรดไขมันอิสระปริมาณสูงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และลดเวลาในกระบวนการผลิตให้น้อยลงกว่ากระบวนการผลิตที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว โดยจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสภาพเป็นกรดในขั้นที่ 1 ก่อนเพื่อลดปริมาณกรดในสารตั้งต้น หลังจากนั้นเปลี่ยนมาใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น และลดการเกิดสบู่ในปฏิกิริยา แต่ข้อเสียคือผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องผ่านกระบวนการล้างด้วยน้ำเพื่อให้มีฤทธิ์เป็นกลาง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสีย กระบวนการนี้เสียค่าใช้จ่ายสูงในกระบวนการผลิตและกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันกับแอลกอฮอล์ โดยแอลกอฮอล์ที่นำมาใช้ได้แก่ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล เป็นต้น เมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่นิยมนำมาใช้มากที่สุด เพราะราคาถูก เป็นโมเลกุลขนาดเล็ก มีขั้ว ทำให้เมทานอลสามารถทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้อย่างรวดเร็ว ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้เร็ว ตามปริมาณสารสัมพันธ์อัตราส่วนในการทำปฏิกิริยาระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 3 ต่อ 1 แต่ในความเป็นจริงต้องใช้มากกว่านั้น เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดจะได้ของผสมของเอสเทอร์ กลีเซอรอล แอลกอฮอล์ ตัวเร่งปฏิกิริยา ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ถ้าไบโอดีเซลมีส่วนผสมของโมโนกลีเซอไรด์จะทำให้ไบโอดีเซลเกิดการแข็งตัวง่าย สิ่งเจือปนในไบโอดีเซลจะส่งผลให้ค่าจุดหมอกควัน (Cloud point) และ และจุดไหลเท (Pour point)

มีค่าสูงขึ้น (Ma and Hanna, 1999) ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันประกอบด้วย 3 ขั้นตอนย่อย แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

ที่มา: Fukuda *et al.*, (2001)

3. เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค

การย่อขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ทางกระบวนการเคมีได้เป็นการปฏิรูปที่สำคัญสำหรับการปรับปรุงอุปกรณ์เพื่อให้เกิดกระบวนการที่มีความเหมาะสมและคุ้มค่าที่สุด เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคสามารถใช้ได้กับกระบวนการผลิตหลายประเภท เช่น การผลิตเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells) โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการแพทย์เพื่อใช้ทดสอบและสังเคราะห์ยาชนิดต่างๆ เพราะอุตสาหกรรมการผลิตยานั้นไม่ได้ใช้กระบวนการที่ต้องใช้สารเคมีในปริมาณมากๆ การใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคในกระบวนการผลิตเป็นสิ่งที่น่าสนใจ สะดวกในการเคลื่อนย้าย เพราะมีขนาดเล็ก ลดปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสียน้อย มีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายโอนความร้อนเนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคได้ถูกออกแบบให้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาตรสูง เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคสามารถใช้กับปฏิกิริยาเคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปเกี่ยวข้องกับสารเคมีที่ผสมเข้าด้วยกันไม่ได้ เช่น ปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายกับของเหลวอินทรีย์ที่ผสมเข้าด้วยกันไม่ได้ (Immiscible aqueous – organic liquid) ปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับของเหลว ปฏิกิริยาระหว่างแก๊ส ของเหลว ของแข็ง เป็นต้น ในปฏิกิริยาเหล่านี้ ต้องการแรงบางอย่างเพื่อที่จะผลักดันให้สารตั้งต้นตัวหนึ่งสามารถผสมด้วยเข้ากันได้กับสารตั้งต้นที่เหลือ โดยจะเกิดขึ้นที่รอยต่อของเฟสของสารที่ต่างชนิดกัน ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของเหลวที่ผสมกันไม่ได้ เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคจะช่วยให้เกิดการแพร่ที่ดีขึ้นระหว่างเฟสที่ติดกัน

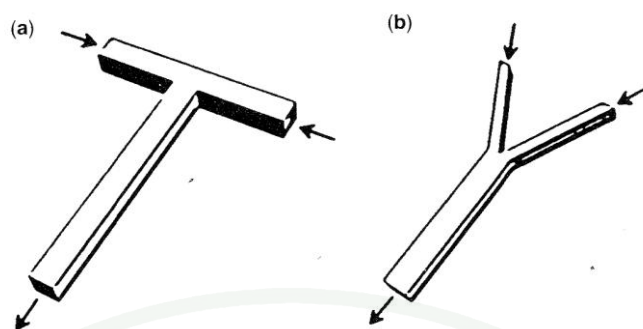
(Doku *et al.*, 2005) ดังนั้นจึงสามารถนำมาประยุกต์เพื่อใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันสำหรับผลิตไบโอดีเซลเพื่อลดระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

3.1 ตัวช่วยการผสมแบบไมโคร (micro mixers)

การผสมกันของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาต่างๆ ปัจจัยหนึ่งที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาคือ ตัวช่วยในการผสม โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ Passive mixers กับ Active mixers ข้อแตกต่างระหว่างตัวช่วยในการผสม 2 ประเภทนี้คือ ตัวช่วยการผสมแบบ Passive mixers อาศัยการออกแบบรูปร่างทางเรขาคณิตเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสม เช่นตัวช่วยในการผสมชนิด Y ตัวช่วยการผสมชนิด T เป็นต้น ส่วนตัวช่วยการผสมแบบ Active mixers อาศัยแหล่งพลังงานจากภายนอกเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสม เช่น การใช้การสั่นสะเทือนของคลื่นอัลตราซาวนด์ เป็นต้น แม้ว่าตัวช่วยในการผสมทั้ง 2 ชนิดนี้จะมีลักษณะที่แตกต่างกัน แต่วัตถุประสงค์หลักของตัวช่วยในการผสมทั้ง 2 ชนิดเหมือนกันคือ ตัวช่วยในการผสมจะทำหน้าที่เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารที่เข้าทำปฏิกิริยาเพื่อให้การทำปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสเกิดการแพร่ที่ดีขึ้น

3.2 ตัวช่วยการผสมแบบชนิด Y และชนิด T

ตัวช่วยการผสมชนิดนี้เป็นตัวช่วยการผสมที่ง่ายที่สุดและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมได้ดี โดยเฉพาะในระบบที่เป็นช่องจุลภาคเมื่อใช้ตัวช่วยการผสมแบบนี้ในระบบจะช่วยเพิ่มการผสมได้ดีขึ้นเพราะช่วยให้เกิดการแพร่ของโมเลกุลเร็วขึ้นในระบบที่มีขนาดเล็ก แต่ถ้าจะใช้ตัวช่วยการผสมชนิดนี้ในระบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะต้องเพิ่มอัตราการไหลของสารที่จะทำปฏิกิริยาเพื่อที่จะทำให้การผสมดีขึ้น ตัวช่วยการผสมชนิด Y และ ชนิด T แสดงดังภาพที่ 9

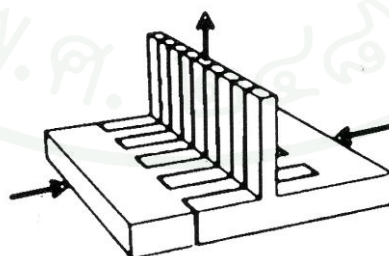


ภาพที่ 9 ตัวช่วยในการผสม a) ชนิด T b) ชนิด Y

ที่มา: Dietrich (2009)

3.3 ตัวช่วยการผสมแบบ Multilamination

ตัวช่วยการผสมชนิดนี้เป็นแบบที่นิยมใช้ในระบบการผลิตขนาดใหญ่ ระดับโรงงานอุตสาหกรรม หลักการทำงานคือจะใช้การไหลของสารที่ทำปฏิกิริยาให้มาสัมผัสในทิศทางที่แตกต่างกันจะเป็นการไหลทางเดียว (Cocurrent) หรือการไหลสวนทางก็ได้ (Countercurrent) โดยระยะเวลาในการผสมในแต่ละส่วนสัมผัสขึ้นอยู่กับความกว้างของชั้นของไหล ดังนั้นในการออกแบบทางเรขาคณิตของตัวช่วยในการผสมชนิดนี้ต้องพิจารณาถึงความกว้างของสายการไหลของของไหล โดยต้องมีขนาดมากกว่า 100 ไมโครเมตร ตัวช่วยการผสมแบบ multilamination ชนิดการไหลสวนทางแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ตัวช่วยการผสมแบบ multilamination ชนิดการไหลสวนทาง

ที่มา: Dietrich (2009)

3.4 ตัวช่วยการผสมแบบไฮโดรไดนามิกส์

ตัวช่วยการผสมชนิดนี้ดัดแปลงมาจากชนิด multilamination โดยอาศัยการลดขนาดความกว้างของช่องจุลภาค เพื่อให้ชั้นการไหลของของไหลไหลผ่านช่องที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กๆ ส่งผลต่อการลดระยะทางในการแพร่และทำให้การผสมดีขึ้น ลักษณะของตัวช่วยการผสมแบบไฮโดรไดนามิกส์แสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ตัวช่วยการผสมแบบไฮโดรไดนามิกส์

ที่มา: Dietrich (2009)

4. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

4.1 การวิเคราะห์การถดถอยบนพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Regression Analysis)

การวิเคราะห์แบบถดถอยเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ประเภท คือ ตัวแปรตาม และตัวแปรอิสระ โดยจะพยากรณ์ด้วยค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ ซึ่งเรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยหลังจากที่ได้สร้างหรือกำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ (Model) (ศิริชัย, 2548) ในการออกแบบ Response Surface Methodology มีรูปแบบของแบบจำลองอยู่ 4 แบบ คือ Linear Model, Linear + interaction model, Linear + square model และ Full quadratic model

การพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลอง ในการพิจารณาถึงรูปแบบแบบจำลองที่มีความเหมาะสมจะพิจารณาจาก ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error: SE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) โดยถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่าน้อยแสดงว่าตัวแบบจำลองที่นำมาใช้มีความเหมาะสมค่อนข้างมาก แต่ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่ามากแสดงว่าตัวแบบจำลองที่นำมาใช้มีความเหมาะสมน้อยมาก ในการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 ตัวแบบจำลองที่ดีควรจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจใกล้เคียง 1 หรือเท่ากับ 1 ซึ่งแสดงว่าตัวแปรอิสระที่อยู่ในตัวแบบจำลองสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้ดี

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการถดถอยแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. R^2 คือค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ เป็นค่าที่บ่งบอกว่าข้อมูลดิบของการวิเคราะห์นั้นเหมาะสมหรือไม่ จะมีค่าระหว่าง 0 – 1 ยิ่งค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าข้อมูลดิบที่ใช้วิเคราะห์มีความเหมาะสมมาก โดยทั่วไปควรมีค่า 0.6 ขึ้นไป

2. R^2_{adj} คือค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว เป็นค่าที่บ่งบอกว่า R^2 ที่ได้นั้นเหมาะสมจริงหรือไม่ หากมีค่าต่ำกว่า R^2 มากผิดปกติ จะถือว่า R^2 มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลง มีโอกาสที่แบบจำลองจะผิดพลาดสูง ค่า R^2_{adj} ที่เหมาะสมต้องมีค่าต่ำกว่า R^2 เพียงเล็กน้อย จึงจะถือว่าการทดลองนี้เก็บข้อมูลมาดี

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย เป็นการตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัวสามารถนำมาใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้หรือไม่ โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_j) จะพิจารณาทดสอบดังนี้

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_j) ของตัวแปรอิสระทุกๆตัวพร้อมกัน จะมีการกำหนดสมมติฐานดังนี้

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0$ ตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีผลต่อตัวแปรตาม

$H_1: \beta_1 \neq 0$ ตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวมีผลต่อตัวแปรตาม

ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบสามารถดูจากค่า p value ได้ โดยจะต้องมีการกำหนดระดับนัยสำคัญ (significance level, α) มาก่อน ถ้าค่า p value มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญแสดงว่ายอมรับสมมติฐาน

H_0 ตัวแปรอิสระทุกตัวไม่สามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้ แต่ถ้าค่า p value มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญแสดงว่ายอมรับสมมติฐาน H_1 แต่ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวสามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้

4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์การแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองโดยพิจารณาวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนอง หรือผลลัพธ์ (output) ของกระบวนการ ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะทำได้เมื่อทดสอบข้อสมมติฐาน 4 ข้อ โดยข้อสมมติฐานได้แก่ (ประไพศรีและพงษ์ชนัน, 2551)

1. ข้อมูล หรือ ค่าผิดพลาดมีการแจกแจงปกติ
2. ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 0
3. ความแปรปรวนของค่าผิดพลาดคงที่
4. ค่าความผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน

ในการตรวจสอบสมมติฐานข้อที่ 1 จะใช้กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ (normal probability plot) โดยค่าผิดพลาดจะมีการแจกแจงปกติเมื่อกราฟที่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ในการตรวจสอบสมมติฐานข้อที่ 2 3 และ 4 จะใช้กราฟของค่าผิดพลาด (residual plot) โดยการตรวจสอบจะผ่านได้เมื่อกราฟมีการกระจายของค่าความผิดพลาดรอบเส้นศูนย์และกราฟระหว่างค่าผิดพลาดกับตัวแปรไม่มีรูปแบบเป็นอิสระต่อกัน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Rashid and Anwar (2008) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ คือ ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ไบโอดีเซลที่ได้จากสภาวะการทดลองนี้มีค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 96 เปอร์เซ็นต์

Zullaikah *et al.* (2005) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันรำข้าวที่มีกรดไขมันอิสระเจือปนตั้งแต่ 6.6-7 เปอร์เซ็นต์ โดยมีสภาวะการทดลองทำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วน โดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 10 ต่อ 1 โดยในการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดซัลฟิวริก โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ 2 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 8 ชั่วโมง พบว่าไบโอดีเซลที่ได้มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 96 เปอร์เซ็นต์

El-Mashad *et al.* (2008) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปลาเซลมอน ที่มีกรดไขมันอิสระ 12 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการผลิตแบบ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดซัลฟิวริกที่ 1 เปอร์เซ็นต์ ในการทำปฏิกิริยาเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระ ทำให้กรดไขมันอิสระลดลงจาก 12 เป็น 3 mgKOH/g ส่วนในขั้นตอนที่ 2 ทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 52 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9.2:1 พบว่าไบโอดีเซลที่ได้มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์

Veljkovic *et al.* (2006) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันจากเมล็ดยาสูบ เนื่องจากน้ำมันจากเมล็ดยาสูบมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง ดังนั้นต้องใช้กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 18 ต่อ 1 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที หลังจากนั้นทำปฏิกิริยาต่อในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ไบโอดีเซลที่ได้มีเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 91 เปอร์เซ็นต์

Avellaneda and Salvado (2011) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้น้ำมันที่ผ่านกระบวนการทอดแล้วในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดท่อแบบขด โดยน้ำมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการได้ผ่านกระบวนการปรับค่ากรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยลงจนเหมาะสมสำหรับที่จะใช้ผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเพียงขั้นตอนเดียว โดยการทดลองนี้ได้ออกแบบให้ตัวเครื่องปฏิกรณ์มีลักษณะขดเป็นเกลียวแล้วจุ่มอยู่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งได้ทำการควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของชนิดตัวเชื่อมช่วยในการผสมแบบชนิด T device กับชนิด Static micromixer โดยมีการศึกษาผลกระทบของการสั่นสะเทือนจากคลื่นน้ำในอ่างควบคุมอุณหภูมิว่ามีผลกระทบต่ค่าเปอร์เซ็นต์ FAME พบว่าการออกแบบชุดอุปกรณ์ที่ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ FAME มีค่าดีที่สุดคือใช้ตัวเชื่อมช่วยในการผสมชนิด T-device เพียงอย่างเดียวโดยไม่ต้องมีการเพิ่มการสั่นของคลื่นน้ำในอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยทำปฏิกิริยาในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันที่อัตราส่วน 6 ต่อ 1 และใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 0.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพียง 13 นาที และได้เปอร์เซ็นต์ FAME 89 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีค่าเท่ากับกรณีที่ทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ แต่ถ้าใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาถึง 75 นาที

Wen *et al.* (2009) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอลโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตเป็นรูปฟันปลา (Zigzag microchannel reactor) โดยใช้อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9 ต่อ 1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส ได้เปอร์เซ็นต์ FAME ของผลิตภัณฑ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 28 วินาที

Sun *et al.* (2010) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากสารตั้งต้นที่เป็นกรดไขมันในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดช่องจุลภาค (microstructured reactor) โดยได้ออกแบบปฏิกิริยาให้เป็นการทำปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง 2 ขั้น ขั้นตอนแรกเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันกับเมทานอลโดยในขั้นตอนแรกได้ใช้อัตราส่วนในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเมทานอลกับกรดไขมันเป็น 30 ต่อ 1 และใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาที่ 100 องศาเซลเซียสและใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับขั้นตอนแรก 7 นาที ขั้นตอนที่สองเป็นการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนแรกมาทำปฏิกิริยาต่อโดยอัตราส่วนในการทำปฏิกิริยาของเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์อยู่ที่อัตราส่วน 20 ต่อ 1 โดยยังคงใช้ความเข้มข้น

ของกรดซัลฟิวริกที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เพิ่มอุณหภูมิเป็น 120 องศาเซลเซียสและใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับขั้นตอนที่สอง 5 นาที ผลการทดลองน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้หลังจากผ่านการทำปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน มีค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ 99.5 เปอร์เซ็นต์

Guan *et al.* (2009) ศึกษาปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันทานตะวันกับเมทานอลโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดห้องจุลภาค โดยใช้อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 23.9 ต่อ 1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 4.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น 0.8 มิลลิเมตรและความยาวของท่อของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดห้องจุลภาค 300 มิลลิเมตร พบว่าได้เปอร์เซ็นต์ FAME ของผลิตภัณฑ์ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 100 วินาที

Sun *et al.* (2010) ศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดห้องจุลภาค (microstructured reactor) โดยใช้น้ำมันที่สกัดจากเมล็ดฝ้ายเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาและใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยได้ทำการเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อมีการใช้ตัวช่วยในการผสมที่แตกต่างกัน ได้แก่ แบบ RIMM, SIMM-V2, T-device และ J – mixer พบว่าตัวช่วยการผสมสองชนิดแรกจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมดีกว่าสองชนิดหลัง เพราะค่าเปอร์เซ็นต์ FAME ที่ได้จากกรณีที่ใช้ตัวช่วยในการผสมสองชนิดแรกอยู่ที่ 50% ส่วนสองชนิดหลังอยู่ที่ 30% ซึ่งกระบวนการทั้งหมดกระทำที่สภาวะแวดล้อมเดียวกัน นอกจากนี้ยังได้ทดลองเปรียบเทียบขนาดท่อที่ใช้ในส่วนของการหน่วงเวลา โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ท่อสเตนเลส ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.6 มิลลิเมตรกับท่อที่ทำจากพอลิเอทเธอร์ฟลูออไรด์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 มิลลิเมตรและภายในบรรจุคิกซอนริง (Dixon rings) เป็นส่วนของการหน่วงเวลา พบว่าที่สภาวะแวดล้อมเดียวกัน คือทำการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 8 ต่อ 1 ค่าเปอร์เซ็นต์ FAME ที่ได้จากการทดลองที่ใช้ท่อที่ทำจากพอลิเอทเธอร์ฟลูออไรด์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 3 มิลลิเมตรเป็นส่วนของการหน่วงเวลา จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ FAME สูงถึง 99.5% โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 17 วินาที ส่วนการทดลองที่ใช้ท่อสเตนเลส ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็น 0.6 มิลลิเมตร จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ FAME 94.8% โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 44 วินาที

Zhang *et al.* (2008) ศึกษาการลดค่า acid value ในน้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูงเพื่อที่จะสามารถนำน้ำมันนั้นมาผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ได้มีการวิจัยโดยนำน้ำมันของเมล็ด *Zanthoxylum bungeanum* ซึ่งมีค่ากรดไขมันอิสระสูงมาทำการลดค่า acid value

เพื่อที่จะใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อไป ซึ่งวิธีการทดลองนี้ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 24 ต่อ 1 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 80 นาที พบว่าสามารถลดค่า acid value จาก 45.51 mg KOH/g เหลือ 1.16 mg KOH/g

Berchmans *et al.* (2008) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันของเมล็ดสบู่ดำซึ่งมีค่ากรดไขมันอิสระสูง จะต้องมีการลดค่ากรดไขมันอิสระให้มีค่าต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ก่อน ดังนั้นวิธีที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลของน้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูงคือต้องใช้กระบวนการสองขั้นตอน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยในขั้นตอนแรกได้ใช้อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเป็น 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นได้ดำเนินการในขั้นตอนที่ 2 โดยได้ใช้อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 24 ต่อ 1 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.4 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเป็น 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ไบโอดีเซลที่ได้สุดท้ายมีค่าเปอร์เซ็นต์ FAME 90 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยารวม 2 ชั่วโมง

อุปกรณ์และวิธีการ

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. ท่อปฏิกรณ์ขนาดเล็กทำจาก PTFE เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.508 มิลลิเมตร ผลิตโดยบริษัท CHROMTECH, U.S.A
2. ตัวช่วยในการผสมขนาดเล็ก (T device) ผลิตโดยบริษัท CHROMTECH, U.S.A
3. ปั๊มป้อนสารชนิดความดันสูง Alltech รุ่น 426 HPLC Pump
4. ตู้อบไฟฟ้า (Oven)
5. เครื่องซั่งน้ำหนัความละเอียดถึงตำแหน่งที่ 3 AND GF 300
6. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) Yamato Model BL - 31
7. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (thermocouple)
8. กรวยแยก (Separators funnel) Classo ขนาด 250 ml
9. ปั๊มป้อนสายน้ำร้อน น้ำเย็น Masterflex Model 77200 - 60
10. อุปกรณ์วัดความหนืด (Viscometer) Cannon – Fenske Routine Viscometer Serial number T 289 size 75
11. อ่างควบคุมอุณหภูมิใช้คู่กับ Viscometer
12. นาฬิกาจับเวลา
13. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี model GC-2010, Shimadzu Japan คอลัมน์ DB-Wax ขนาด 30 เมตร × 0.32 มิลลิเมตร
14. ขวด Vial ขนาด 10 มิลลิลิตร
15. กระดาษกรองเบอร์ 1 (Grade 1 Circles, 110 mm) จาก Whatman
16. กล้องจุลทรรศน์ LCD Digital Microscope ของ CELESTRON Model 44340

2. วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เมทานอล (CH_3OH) AR Grade จาก Merck
2. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) AR grade จาก Quality Reagent Chemical Product
3. น้ำมันหมู
4. อะซีโตน Commercial Grade จาก Zen point
5. ฟีนอล์ฟทาลิน AR Grade จาก Laboratory Chemical

6. 2-Propanol AR Grade จาก Merck
7. น้ำ DI
8. N-Heptane ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ Analysis Grade จาก Fluka
9. Methyl heptadecanoate C 17:0 ความบริสุทธิ์ 95%

3. ขั้นตอนการทดลอง

3.1 การเตรียมน้ำมันหมู

นำน้ำมันหมูมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 เพื่อกำจัดตะกอนสิ่งสกปรกก่อนนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.2 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง (เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค)

1. ติดตั้งท่อสำหรับนำสารเข้าทำปฏิกิริยาทั้งสองสาย (สายหนึ่งสำหรับเมทานอลอีกสายหนึ่งสำหรับน้ำมัน) โดยนำปลายท่อแต่ละด้านของแต่ละสายต่อกับเครื่องปั๊มแรงดันสูงทั้ง 2 เครื่อง โดยใช้ท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.508 มิลลิเมตร

2. นำตัวช่วยในการผสม (T device) มาต่อที่ปลายท่อด้านที่เหลือทั้ง 2 ท่อจากข้อที่ 1 เพื่อให้เกิดการผสมกันก่อนของเมทานอลและน้ำมัน โดยมีสายของท่อขาออกหนึ่งสายที่ปลายอีกด้านหนึ่งของตัวช่วยในการผสม ซึ่งจะเป็นท่อสายผลิตภัณฑ์

3. ส่วนของท่อด้านที่ออกจากตัวช่วยในการผสมซึ่งเป็นส่วนเกิดปฏิกิริยาจะควบคุมอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาไว้ที่อุณหภูมิ 55, 60 และ 65 องศาเซลเซียส

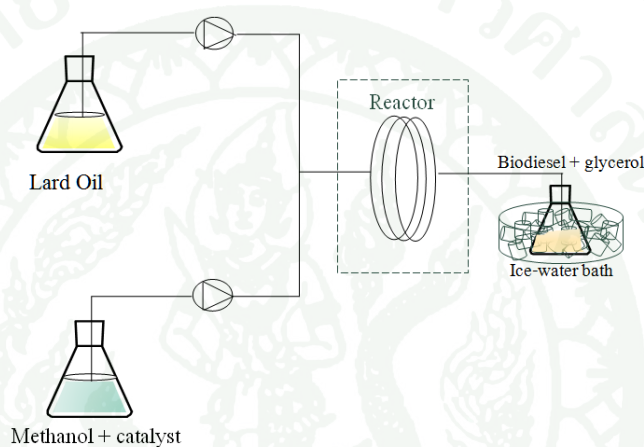
4. ท่อส่วนที่เหลือส่วนสุดท้ายจะถูกควบคุมอุณหภูมิให้เย็นเพื่อทำการหยุดปฏิกิริยา ส่วนปลายท่อสายผลิตภัณฑ์จะต่อเข้ากับภาชนะที่ใช้เก็บผลิตภัณฑ์เพื่อทำการเก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้และนำไปแยกต่อไป ดังนั้นจะได้ชุดอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในภาพที่ 12

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค

1. เตรียมสารเคมีที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยละลายผสมในเมทานอลที่อัตราส่วน 1% โดยน้ำหนัก

2. ป้อนน้ำมันที่ได้จากขั้นตอนแรกโดยใช้ปั๊มแรงดันสูงป้อนสารเข้าไปที่ตัวช่วยในการผสมพร้อมกับป้อนเมทานอลที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาผสมอยู่เข้าไปที่ตัวช่วยในการผสมเช่นกัน โดยควบคุมอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5 ต่อ 1 และควบคุมอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 60 องศาเซลเซียส โดยควบคุมให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาในส่วนควบคุมอุณหภูมิเป็น 10 วินาที



ภาพที่ 12 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลโดยเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค

3. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำการแยกและวิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์ FAME เพื่อทำการเปรียบเทียบ

4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 ถึง 3 แต่ทำการเปลี่ยนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 0.7 และ 1.3 % โดยน้ำหนัก

5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 ถึง 3 แต่ทำการเปลี่ยนปริมาณอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 และ 9 ต่อ 1

6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 ถึง 3 แต่ทำการเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 55 และ 65 องศาเซลเซียส

7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 ถึง 3 แต่ทำการเปลี่ยนระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 5 และ 20 วินาที

8. การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรทั้ง 4 ชนิดมีทั้งหมด 81 การทดลองดังแสดงในตารางในภาคผนวก ก

9. เมื่อได้ผลิตภัณฑ์จากการทดลอง นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปเทลงในกรวยแยกทิ้งไว้ข้ามคืน แล้วไขแยกกลีเซอรอลที่อยู่ชั้นล่างออกให้เหลือเพียงเมทิลเอสเทอร์ในชั้นบน

10. ทำการล้างผลิตภัณฑ์ในกรวยแยกด้วยน้ำ deionized จนกระทั่งน้ำล้างที่ได้มี PH เป็นกลาง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความใสมากขึ้น

11. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปให้ความร้อนเพื่อกำจัดน้ำ โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 107 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

12. แต่ละสภาวะการทดลองจะทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง

3.4 การผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

1. ชั่งน้ำมันหมูตามปริมาณที่คำนวณได้ตามอัตราส่วนโดยโมล

2. เตรียมเมทานอลผสมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ตามปริมาณที่คำนวณได้ตามอัตราส่วนโดยโมล

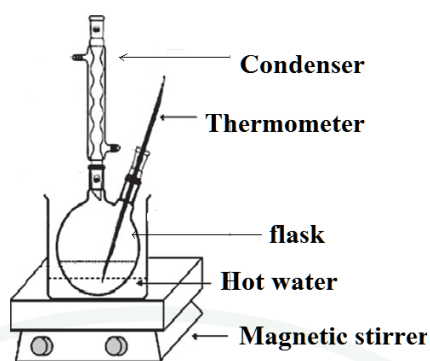
3. นำน้ำมันไปอุ่นจนได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ

4. ประกอบเครื่องมือดังภาพที่ 13 นำเมทานอลที่ผสมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เทลงในขวดก้นกลมซึ่งบรรจุน้ำมันที่อุ่นแล้ว ทำการควบคุมอุณหภูมิและรอบการกวนที่ 200 รอบต่อนาทีทิ้งไว้ให้ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5. เมื่อทำปฏิกิริยาจนครบกำหนดเวลาที่ตั้งไว้ นำขวดก้นกลมไปจุ่มน้ำแข็งเพื่อหยุดปฏิกิริยา หลังจากนั้นนำไปเทในกรวยแยก ทิ้งไว้ข้ามคืนแล้วไขแยกกลีเซอรอลที่อยู่ชั้นล่างออกให้เหลือเพียงเมทิลเอสเทอร์ในชั้นบน

6. ทำการล้างผลิตภัณฑ์ในกรวยแยกด้วยน้ำ deionized จนกระทั่งน้ำล้างที่ได้มี PH เป็นกลาง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความใสมากขึ้น

7. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปให้ความร้อนเพื่อกำจัดน้ำ โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 107 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพที่ 13 ชุดอุปกรณ์ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

4. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

- 4.1 ชั่งน้ำมันที่ต้องการทดสอบจำนวน 5 g ลงในขวดรูปชมพู่
- 4.2 เติม 2 โพรพานอลปริมาณ 30 ml
- 4.3 หยดอินดิเคเตอร์ฟีนอล์ฟทาเลอินปริมาณ 2 – 3 หยด
- 4.4 นำสารละลายที่ได้มาทำการไทเทรตกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เมื่อถึงจุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู
- 4.5 นำปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ไปทำการคำนวณหาค่าความเป็นกรด ตามสมการที่ 1

$$\text{Acid value} = \frac{V \times 56.1 \times 0.1}{g} \quad (1)$$

โดยที่ V = ปริมาตรของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ (ml)

g = น้ำหนักของน้ำมันตัวอย่าง (g)

5. การวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีรุ่น GC 2010 โดยใช้ Methyl heptadecanoate C17:0 ความบริสุทธิ์ 95% เป็นสารมาตรฐานภายใน ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน EN14103 โดยสามารถคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ได้จากสมการที่ 2

$$\%FAME = \frac{(\sum A) - A_{us}}{A_{us}} \times \frac{c_s v_s}{w} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ $\sum A$ = ผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟตั้งแต่ C14:0 ถึง C24:1

A_{us} = พื้นที่ใต้กราฟของ C₁₇

C_s = ความเข้มข้นของ C₁₇ (mg/ml)

V_s = ปริมาณของ C₁₇ ที่ถูกใช้ไป (μl)

W = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ (mg)

6. การวัดขนาดหยดวิภูภาค

ขนาดหยดวิภูภาคของเมทานอลในน้ำมันที่ทำปฏิกิริยาสามารถทำการวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ โดยมีวิธีการดังนี้

1. หยดของเหลวผสมระหว่างเมทานอลกับน้ำมันที่ทางออกของเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคลงบนแผ่นกระจก
2. นำแผ่นกระจกอีกแผ่นปิดทับหยดของเหลวและนำของเหลวไปวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยปรับกำลังขยายให้ได้ภาพขนาดหยดที่ชัดที่สุด
3. บันทึกรูปภาพที่ได้แล้วนำรูปภาพที่ได้ไปเปรียบเทียบที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ผลการศึกษาสมบัติและองค์ประกอบเบื้องต้นของน้ำมันหมู

เมื่อนำน้ำมันหมูไปกรองแยกตะกอนออกแล้วนำไปวัดค่าความหนืด พบว่าน้ำมันหมูเริ่มต้นมีค่าความหนืด 39.18 เซนติสโตกส์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 831.39 g/cm^3 และมีค่าความเป็นกรด (acid value) เท่ากับ $0.9958 \text{ mg KOH/g oil}$ จึงสามารถนำไปทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันได้โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการลดค่าความเป็นกรด เนื่องจากมีค่าความเป็นกรดต่ำกว่า 4 mg KOH/g oil (Ramadhas *et al.*, 2005)

2. ผลการศึกษาปริมาณและชนิดของกรดไขมันในน้ำมันหมูเริ่มต้น

จากการวิเคราะห์ปริมาณและชนิดของกรดไขมันในน้ำมันหมูเริ่มต้นด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4 พบว่าส่วนประกอบหลักของน้ำมันหมูคือ กรดโอเลอิก (Oleic acid) 41.46 เปอร์เซ็นต์ กรดปาล์มมิก (Palmitic acid) 22.29 เปอร์เซ็นต์ และกรดไลโนเลอิก (Linoleic acid) 15.69 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันหมูได้มีค่าเท่ากับ 823.225 กรัมต่อโมล

3. ผลการทดลองปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะการทดลองต่างๆ

จากการศึกษาผลกระทบของปัจจัย 4 ชนิดที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน อุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา มีชุดการทดลองทั้งหมด 81 การทดลองโดยแต่ละสภาวะการทดลองทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง แสดงในตารางภาคผนวก ที่ ก1 จากตารางพบว่าสภาวะการทดลองที่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงที่สุดคือที่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1.3 เปอร์เซ็นต์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 5 วินาที โดยที่สภาวะการทดลองนี้ให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เป็น 95.41

ตารางที่ 4 ปริมาณและชนิดของกรดไขมันของน้ำมันหมู

กรดไขมัน		น้ำหนัก	ส่วนประกอบ ของกรดไขมันในน้ำมันหมู(เปอร์เซ็นต์)
ชื่อ	โครงสร้าง	โมเลกุล	
Octanoic	8:00	144.21	0.008
Decanoic	10:00	172.26	0.063
Lauric	12:00	200.32	0.102
Myristic	14:00	228.37	1.302
Palmitic	16:00	256.42	22.292
Palmitoleic	16:01	254.41	2.214
Stearic	18:00	284.48	11.341
Oleic	18:01	282.46	41.46
Linoleic	18:02	280.45	15.694
Linolenic	18:03	278.49	0.962
Arachidonic	20:00	304.47	0.852
Behenic	22:00	340.58	0.043
Erucic	22:01	338.58	0.019
Lignoceric	24:00:00	368.63	0.16
อื่นๆ			3.488

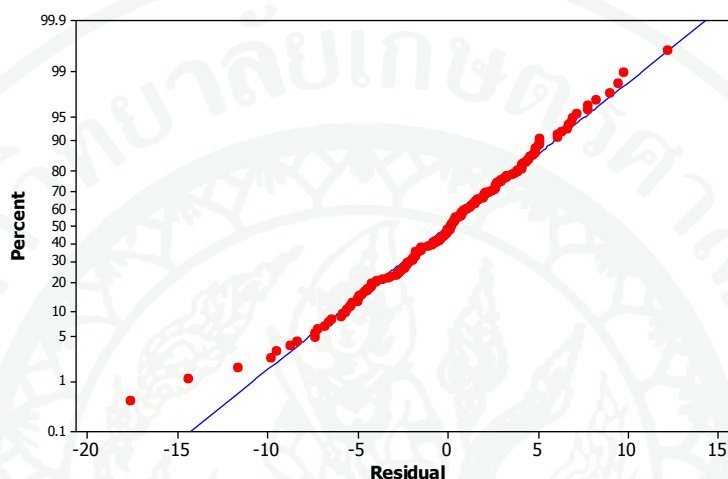
4. การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

4.1 ข้อสมมติฐานในการวิเคราะห์ความแปรปรวน

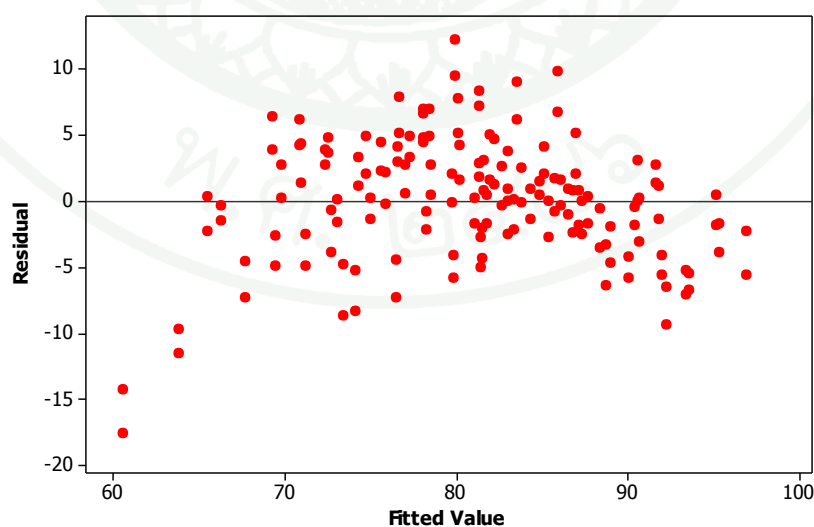
การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะสามารถทำได้เมื่อข้อมูลหรือค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดมีค่าเท่ากับศูนย์ ความแปรปรวนของค่าผิดพลาดมีค่าคงที่และค่าผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน

สมมติฐานดังกล่าวได้ถูกทำการตรวจสอบโดยการสร้างกราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ (Normal probability plot) ของค่าความผิดพลาดของการทดลองที่ได้ แสดงดังภาพที่

14พบว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงสามารถสรุปได้ว่าค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ ส่วนสมมติฐานในข้ออื่นๆจะใช้กราฟของค่าความผิดพลาด (residual plot) ในการตรวจสอบ แสดงดังภาพที่ 15 พบว่ากราฟมีการกระจายของค่าผิดพลาดโดยรอบเส้นศูนย์ กราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบ ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 0 และความแปรปรวนของค่าผิดพลาดคงที่ ดังนั้นสามารถทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้



ภาพที่ 14 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ (Normal probability plot) ของค่าความผิดพลาดของการทดลอง



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาด (residual plot)

4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

งานวิจัยนี้อาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้การทดลองแบบเต็มรูปแบบเพื่อ
ทำการศึกษาปัจจัยหลักและผลกระทบของปัจจัยร่วม โดยกำหนดสมมติฐานในการทดสอบคือ

$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ ปัจจัยที่ศึกษาไม่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

$H_1 : \mu_i \neq \mu_j, \exists_{ij}$ ปัจจัยที่ศึกษามีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

เมื่อใช้โปรแกรม MINITAB วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้ผล
ลัพธ์ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

Source (แหล่งที่มา)	d.f. (องศาเสรี)	SS (ผลบวกกำลังสอง)	MS (ค่าเฉลี่ย SS)	F-value (ค่าสถิติ)	Prob>F (p - value)
r	2	3829.70	1914.85	264.01	0.000
T	2	685.31	342.66	47.24	0.000
t	2	2361.58	1180.79	162.80	0.000
c	2	3355.00	1677.50	231.29	0.000
r*T	4	419.59	104.90	14.46	0.000
r*t	4	327.21	81.80	11.28	0.000
r*c	4	662.04	165.51	22.82	0.000
T*t	4	58.18	14.54	2.01	0.099
T*c	4	360.22	90.05	12.42	0.000
t*c	4	316.04	79.01	10.89	0.000
r*T*t	8	41.11	5.14	0.71	0.683
r*T*c	8	355.01	44.38	6.12	0.000
T*t*c	8	145.92	18.24	2.51	0.015
Error	105	761.55	7.25		
Total	161	13678.47			

ตารางที่ 5 (ต่อ)

หมายเหตุ	r	แสดงถึงอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน
	T	แสดงถึงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)
	t	แสดงถึงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (วินาที)
	c	แสดงถึงความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (%กรัม/กรัมน้ำมัน)
	Error	แสดงถึงค่าผิดพลาด
	Total	แสดงถึงค่าทั้งหมด

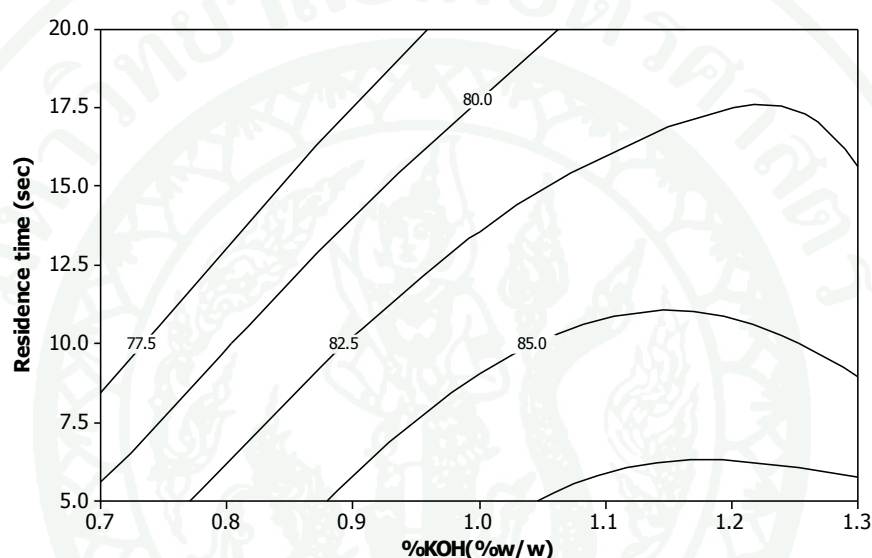
ข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลองแบบเต็มรูปแบบ (full factorial experiment) เมื่อนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนจะสามารถวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ และวิเคราะห์ผลกระทบร่วมของปัจจัยที่มีผลต่อค่าเมทิลเอสเทอร์ จากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ($T*t$) และผลกระทบร่วมระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันอุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ($r*T*t$) ซึ่งให้ค่า p -value 0.099 และ 0.683 ตามลำดับ ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้กำหนดนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นค่า p -value ของตัวใดมีค่ามากกว่า 0.05 จึงถือว่าไม่มีผลกระทบร่วมต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ ส่วนปัจจัยอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ต่างมีค่า p -value น้อยกว่า 0.05 จึงมีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ ดังนั้นสมมติฐานหลัก H_0 จึงถูกปฏิเสธ

4.3 การวิเคราะห์ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

4.3.1 อิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

จากภาพที่ 16 แสดงอิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ พบว่าในช่วงความเข้มข้นของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์น้อยกว่า 1% เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จะมีค่าสูงขึ้น เพราะปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นนั้นจะช่วยเร่งให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันดำเนินไปข้างหน้าได้เร็ว (Ma and Hanna, 1999) แต่เมื่อเพิ่ม

ความเข้มข้นของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 1% ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปในสภาวะการทดลองนี้ไปทำปฏิกิริยาสaponification กับกรดไขมันอิสระในน้ำมันหมู่มากเกินไปทำให้เกิดสบู่ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีค่าลดลง (Eevera *et al.*, 2009) ส่วนผลกระทบของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามีค่าน้อยลงค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากอัตราการไหลที่มากขึ้นที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยลงจึงทำให้เกิดการผสมกันระหว่างสารที่เข้าทำปฏิกิริยาคีขึ้น ผลกระทบนี้จะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อที่ 5

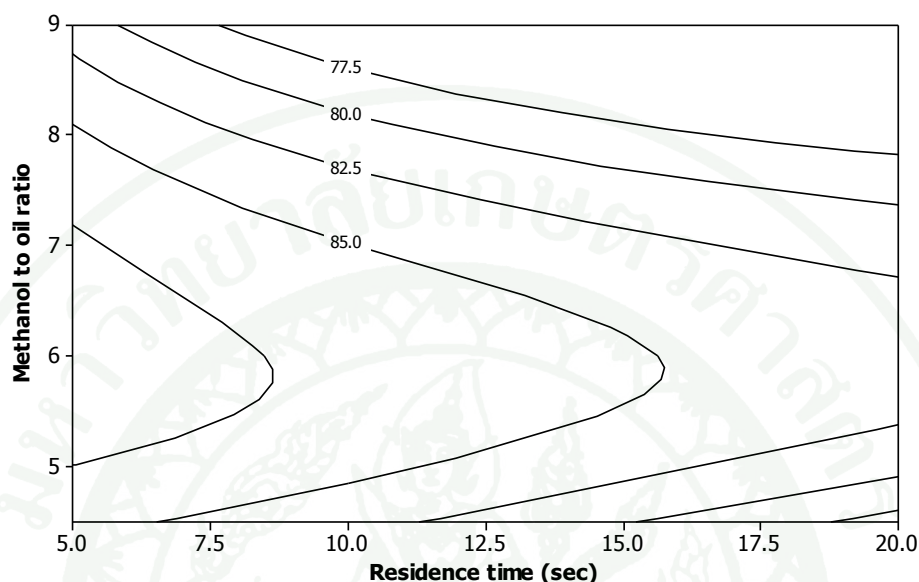


ภาพที่ 16 Contour plot แสดงอิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

4.3.2 อิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

อิทธิพลร่วมระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันแสดงในภาพที่ 17 พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันในช่วง 4.5 ต่อ 1 ถึง 6 ต่อ 1 การเพิ่มอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันจะช่วยทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นเมื่อเพิ่มเมทานอลให้มากขึ้นจะส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันในช่วงที่สูงกว่า 6 ต่อ 1 ปริมาณของเมทานอลที่มากเกินไปจะส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลง เนื่องจากเมทานอลไปทำหน้าที่เป็นอิมัลซิฟายเออร์ส่งผลให้เกิด

อิมัลชันดีขึ้นทำให้กลีเซอรอลไม่แยกออกมาจากไบโอดีเซลค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จึงมีค่าลดลง (Sun *et al.*, 2008)

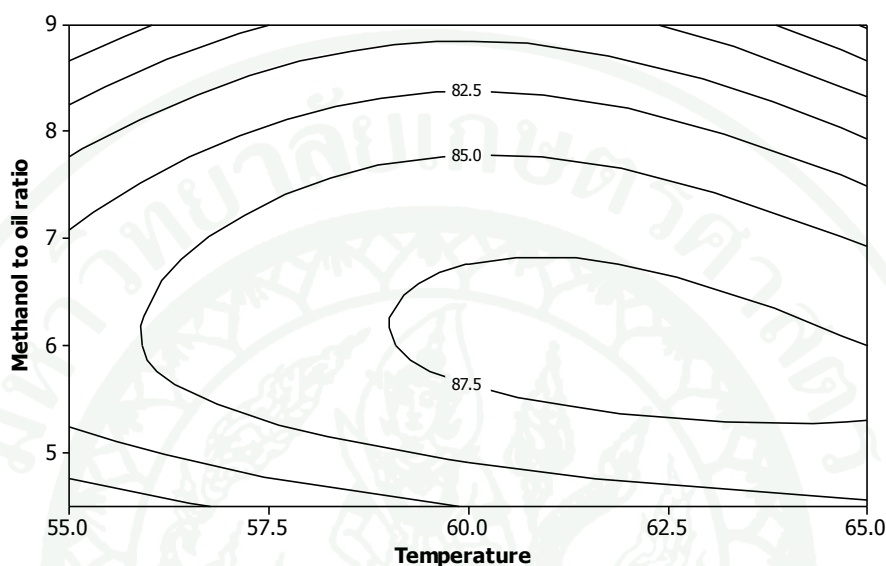


ภาพที่ 17 Contour plot แสดงอิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

4.3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและอัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

ภาพที่ 18 แสดงถึงผลกระทบร่วมระหว่างอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันกับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปอัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ เพราะการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะทำให้โมเลกุลของสารเคลื่อนที่เร็วขึ้นชนกันมากขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และความสามารถในการผสมกันระหว่างเมทานอลและน้ำมันจะเกิดได้ดี (Zheng *et al.*, 2006) แต่จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงกว่า 60 องศาเซลเซียสจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ต่ำลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาสaponification ควบคู่กับการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Agarwal and Das., 2001) เมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วง 60 ถึง 65 องศาเซลเซียส ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่อัตราส่วนมากกว่า 6 ต่อ

1 จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ต่ำลงซึ่งเป็นผลของการเกิดอิมัลชันดังได้อธิบายในหัวข้อที่ 4.3.2 การลดลงของเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์จะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันและอุณหภูมิสูงพร้อมกัน

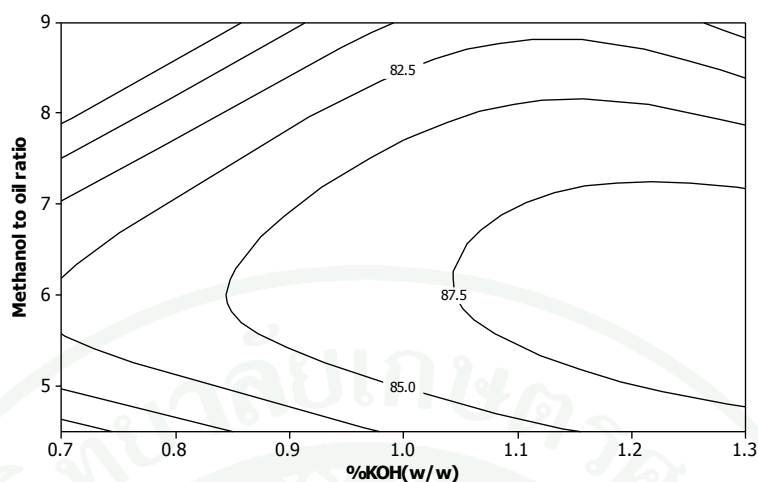


ภาพที่ 18 Contour plot แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

4.3.4 อิทธิพลของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ดังแสดงในภาพที่ 19 การใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันในอัตราส่วน 6 ต่อ 1 จะช่วยให้ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้มีค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูง แต่ถ้าใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่สูงกว่า 6 ต่อ 1 จะส่งผลให้เกิดการละลายของกลีเซอรอลในไบโอดีเซลมากขึ้นเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จึงมีค่าน้อยลง การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากเกินไป โดยเฉพาะที่สภาวะที่มีการใช้อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันสูงจะทำให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลงเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันดังได้อธิบายในหัวข้อ

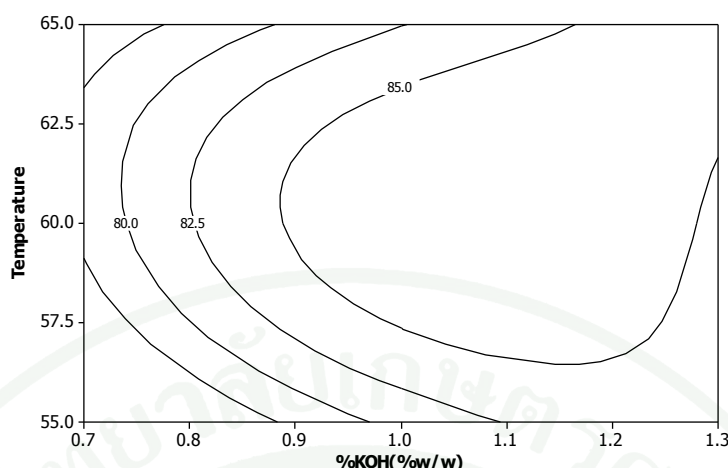
4.3.1



ภาพที่ 19 Contour plot แสดงอิทธิพลของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

4.3.5 อิทธิพลของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

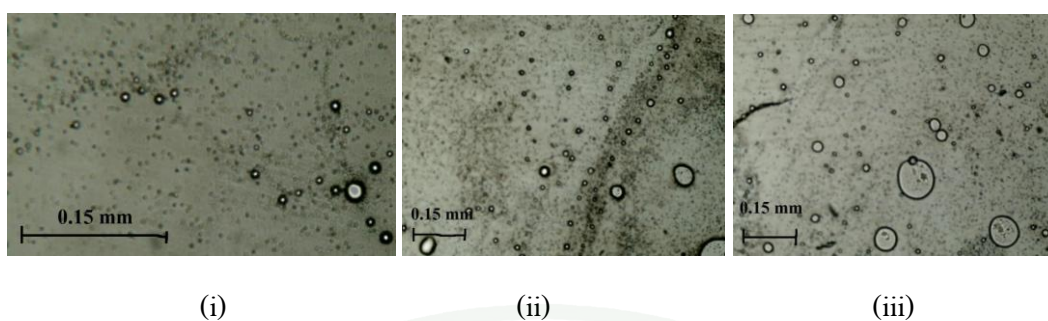
ภาพที่ 20 แสดงถึงผลกระทบของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นจะทำให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์มีค่ามากขึ้นเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนช่วยให้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันดำเนินไปข้างหน้าได้เร็วขึ้น (Ma and Hanna, 1999)



ภาพที่ 20 Contour plot แสดงอิทธิพลของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

5. การวิเคราะห์ขนาดของหยดวัฏภาคโดยกล้องจุลทรรศน์

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ จากการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่น้อยกว่าที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาน้อย จึงได้ทำการใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูขนาดของหยดวัฏภาคของสารที่ออกจากปลายท่อปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 21 เพื่อเปรียบเทียบขนาดของหยดวัฏภาคที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 65 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าขนาดของหยดวัฏภาคของสารในระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที มีขนาดเล็กกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับขนาดหยดวัฏภาคที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 และ 20 วินาที เมื่อหยดวัฏภาคมีขนาดเล็กจะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ถ่ายโอนมวลได้ดีกว่าและเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ได้มีการเพิ่มอัตราการไหลเพื่อควบคุมเวลาในการเกิดปฏิกิริยาดังนั้นจึงทำให้ความดันที่ทางเข้าท่อปฏิกิริยามีการเปลี่ยนแปลง ความดันที่ทางเข้าท่อปฏิกิริยาที่ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 5 10 และ 20 วินาที คือ 130 100 และ 70 psi ตามลำดับ ในการทดลองนี้ค่าความดันที่สูงจะส่งผลให้ได้ขนาดของหยดวัฏภาคขนาดเล็ก



ภาพที่ 21 ขนาดหยดอนุภาคที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกัน (i) 5 วินาที (ii) 10 วินาที (iii) 20 วินาที

6. การวิเคราะห์สมการถดถอย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรปัจจัยกับตัวแปรตามโดยอาศัยการวิเคราะห์สมการถดถอย โดยข้อมูลถูกวิเคราะห์ด้วยการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial regression) ค่าความสัมพันธ์ของค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ต่ออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน (r) ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (c) อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (T) และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (t) ใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ โดยเริ่มต้นจะทำการวิเคราะห์ชนิดของแบบจำลองที่ให้ความเหมาะสมมากที่สุดที่จะสร้างสมการถดถอยโดยดูความเหมาะสมจากค่า R^2 และ R^2 adj ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองในการสร้างสมการถดถอย

แบบจำลอง	R^2 (%)	R^2 adj (%)
Linear model	55.9	54.8
Linear interaction model	61.9	59.4
Linear square model	74.8	73.5
Full quadratic model	94.8	92.4

จากตารางที่ 6 พบว่าแบบจำลองชนิด Full quadratic model ให้ค่า R^2 และ R^2 adj สูงที่สุด ดังนั้นแบบจำลองชนิดนี้จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาสร้างสมการถดถอย เมื่อใช้โปรแกรม Minitab จะได้สมการถดถอยดังสมการที่ 3

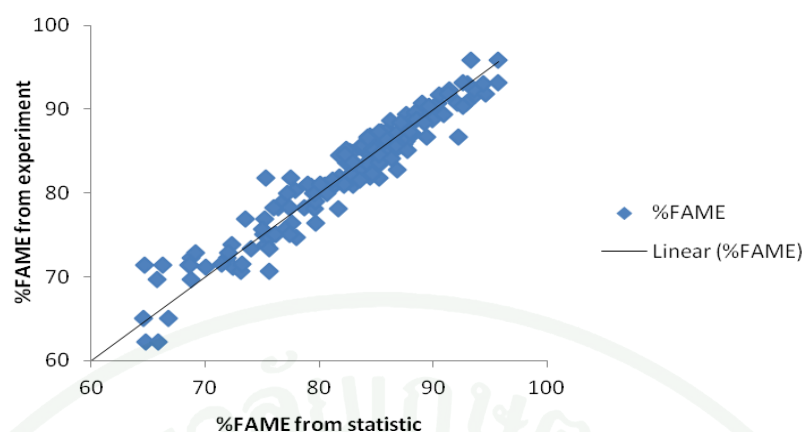
$$\begin{aligned}
\%FAME = & -12818 - 16.9t + 4374r + 409T + 9745c + 6.06tr - 27.2tc - 142rT - 4256rc - \\
& 301Tc + 0.184t^2 - 285r^2 - 3.27T^2 + 2349c^2 - 0.044t^2r - 0.26t^2c + 9.41r^2T + 227r^2c \\
& + 2.42T^2c + 50.3tc^2 + 1.17rT^2 + 90rc^2 - 82Tc^2 + 0.0063t^2r^2 - 0.255t^2c^2 - 0.0784r^2T^2 \\
& + 27.7r^2c^2 + 0.65T^2c^2 - 6.0trc + 1.17tcT + 142rTc + 0.0059t^2cT - 7.94r^2Tc + \\
& 0.846tr^2c - 1.48tc^2T - 1.21rT^2c + 0.66trc^2 - 0.0080tcT^2 - 5.8rtc^2 - 0.0060t^2r^2c + \\
& 0.00325t^2c^2T + 0.0710r^2T^2c - 0.269tr^2c^2 + 0.0108tc^2T^2 + 0.091rT^2c^2 + 0.0486t^2rc^2 \\
& - 0.000074t^2cT^2 - 0.534r^2Tc^2 - 0.646tr^2c \quad (3)
\end{aligned}$$

จากสมการพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์มากที่สุดเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์มีค่ามากที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาตามลำดับ เมื่อพิจารณาความแปรปรวนสำหรับสมการถดถอยเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของสมการได้ผลดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 วิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสมการถดถอย

Source (แหล่งที่มา)	d.f. (องศาเสรี)	SS (ผลบวกกำลังสอง)	MS (ค่าเฉลี่ย SS)	F-value (ค่าสถิติ)	Prob>F (p – value)
Regression	48	12944.36	269.67	41.51	0.000
Error	113	734.12	6.50		
Total	161	13678.47			

จากตารางที่ 7 พบว่าค่า p – value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ทำให้สรุปได้ว่าสามารถสร้างสมการถดถอยได้มีความเหมาะสมและมีนัยสำคัญทางสถิติ จากการวิเคราะห์ด้วย MINITAB ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (R^2 adj) เท่ากับ 92.4% สามารถใช้สมการถดถอยที่ได้มาพยากรณ์เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ได้แม่นยำ 92.4 % ภาพที่ 22 เป็นการนำสมการที่ได้มาใช้นำมาพยากรณ์เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เทียบกับผลการทดลอง พบว่าแนวโน้มของกราฟเป็นเส้นตรงนั้นคือเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการพยากรณ์ของสมการถดถอย จึงสามารถนำสมการถดถอยนี้ไปพยากรณ์เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ได้



ภาพที่ 22 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทดลองกับสมการถดถอย

7. การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลจากเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคและเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

จากผลการทดลองแบบเต็มรูปของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคพบว่าสภาวะที่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงที่สุดคือที่ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 5 วินาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 65 องศาเซลเซียส และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1.3 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงทำการทดลองผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะเพื่อเปรียบเทียบโดยใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 60 นาที ส่วนปัจจัยในการทดลองอื่นๆได้ควบคุมให้เท่ากับในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 8

จากตารางที่ 8 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ช่องจุลภาคมีค่ามากกว่าที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคช่วยในการถ่ายโอนมวลและความร้อนได้ดีกว่า นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงค่าความเป็นกรดและค่าความหนืดพบว่าค่าคุณสมบัติผ่านมาตรฐานไบโอดีเซล

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคกับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

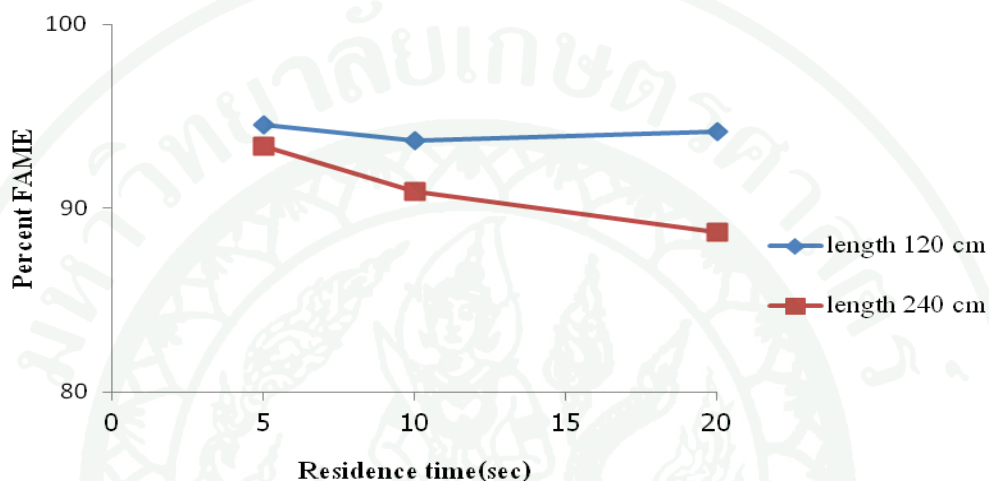
เครื่องปฏิกรณ์	เวลา (วินาที)	เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์	ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)	ความหนืด (cst)
ช่องจุลภาค	5	95.41	0.425	4.1976
แบบกะ	3600	71.97	0.4675	4.5065

8. ผลกระทบของความยาวท่อปฏิกรณ์ต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของความยาวท่อปฏิกรณ์ โดยได้ทำการศึกษาที่สภาวะการทดลองอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1.3 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการเปรียบเทียบความยาวระหว่าง 120 เซนติเมตร กับ 240 เซนติเมตร โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 23 เมื่อความยาวท่อปฏิกรณ์แตกต่างกันจะทำให้อัตราการไหลของสารแตกต่างกันเพื่อให้ระยะเวลาที่สารทำปฏิกิริยาในท่อเท่ากัน ข้อมูลของอัตราการไหลแสดงดังตารางที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการไหลเท่ากัน (ความยาวท่อปฏิกรณ์ 120 เซนติเมตร ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที กับ ความยาวท่อปฏิกรณ์ 240 เซนติเมตร ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที) พบว่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีมีค่าสูงกว่า 10 วินาที เนื่องจากมีการถ่ายโอนมวลและความร้อนที่ดีกว่า ปฏิกิริยาเกิดได้ดีกว่า ขนาดของหยดวฏภาคที่ได้มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับที่ระยะเวลา 10 วินาที เพราะที่ระยะเวลา 10 วินาทีสารได้อยู่ในท่อปฏิกรณ์นานขึ้นขนาดของหยดวฏภาคเกิดการรวมตัวกันทำให้ได้ขนาดหยดวฏภาคขนาดใหญ่ แสดงดังภาพที่ 24 เมื่อพิจารณาที่ความยาวท่อปฏิกรณ์ 120 เซนติเมตร ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที กับ ความยาวท่อปฏิกรณ์ 240 เซนติเมตร ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที ซึ่งมีอัตราการไหลเท่ากันแต่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของท่อปฏิกรณ์ที่ยาว 240 เมตรมีค่ามากกว่า ผลสรุปก็เป็นไปในทำนองเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบผลกระทบของความยาวท่อที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากัน ขนาดท่อที่ยาวกว่าจะให้อัตราการไหลที่สูงกว่า ส่งผลให้ความดันในท่อปฏิกรณ์ที่ยาวกว่ามีความดันมากกว่า ดังแสดงในภาพที่ 25 เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 5 วินาที ความดันจะมีค่า 120

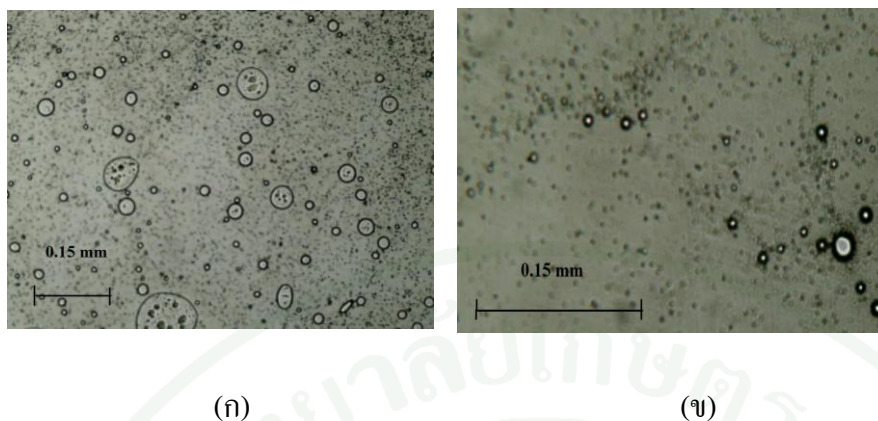
และ 220 psi สำหรับท่อปฏิกิริยาที่มีความยาว 120 เซนติเมตรและ 240 เซนติเมตร ตามลำดับ ความดันที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ขนาดหยดวิกฤตมีขนาดใหญ่ขึ้น เกิดการรวมตัวมากขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีค่าลดลงในท่อปฏิกิริยาที่มีขนาดยาวมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 10 และ 20 วินาที ผลของความดันที่เพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลงเช่นกัน



ภาพที่ 23 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ความยาวท่อปฏิกิริยาแตกต่างกัน

ตารางที่ 9 อัตราการไหลของน้ำมันและเมทานอลที่ความยาวท่อปฏิกิริยาแตกต่างกัน

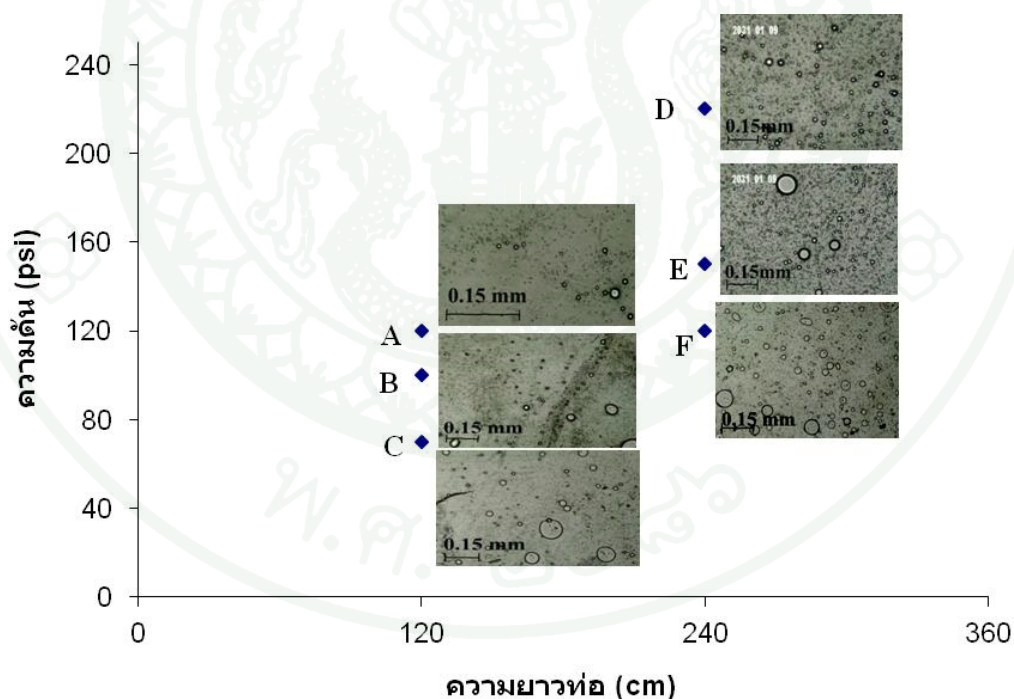
ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (sec)	ความยาวท่อปฏิกิริยา					
	120 เซนติเมตร			240 เซนติเมตร		
	5	10	20	5	10	20
เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์	95.41	93.68	94.19	93.36	90.93	88.69
อัตราการไหลน้ำมัน (ml/min)	2.32	1.16	0.58	4.64	2.32	1.16
อัตราการไหลเมทานอล (ml/min)	0.6	0.3	0.15	1.2	0.6	0.3



ภาพที่ 24 ขนาดของหยดอากาศที่ความยาวท่อปฏิกิริยาแตกต่างกัน อัตราการไหลเท่ากัน

(ก) ความยาวท่อปฏิกิริยา 240 เซนติเมตร

(ข) ความยาวท่อปฏิกิริยา 120 เซนติเมตร



ภาพที่ 25 เปรียบเทียบความดันที่ความยาวท่อปฏิกิริยาต่างกัน

A ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที ความยาวท่อปฏิกิริยา 120 เซนติเมตร

B ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที ความยาวท่อปฏิกิริยา 120 เซนติเมตร

C ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที ความยาวท่อปฏิกิริยา 120 เซนติเมตร

ภาพที่ 25 (ต่อ)

D ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที ความยาวท่อปฏิกิริยา 240 เซนติเมตร

E ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที ความยาวท่อปฏิกิริยา 240 เซนติเมตร

F ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที ความยาวท่อปฏิกิริยา 240 เซนติเมตร

9. คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล

การทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากสภาวะการทดลองปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 5 วินาที ซึ่งแสดงผลเปรียบเทียบกับน้ำมันไบโอดีเซลมาตรฐานตามเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM แสดงดังตารางที่ 10 พบว่า การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันหมูในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคมีเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เท่ากับ 95.41 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตามมาตรฐาน EN14013 จะต้องไม่ต่ำกว่า 96.5 เปอร์เซ็นต์ จึงจะสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ได้ แต่น้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้หากมีการนำไปตรวจสอบคุณสมบัติเพิ่มเติม เช่น จำนวนซีเทน กำมะถัน จะสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์การเกษตรได้ เพราะน้ำมันที่ผลิตได้ผ่านมาตรฐาน ASTM D 445 และมาตรฐาน ASTM D 664 ซึ่งระบุว่าไบโอดีเซลควรมีค่าความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส อยู่ในช่วง 3.5 ถึง 5 เซนติสโตกซ์ และค่าความเป็นกรดไม่ควรเกิน 0.5 mgKOH/g

ตารางที่ 10 คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้เทียบกับค่ามาตรฐาน

คุณสมบัติต่างๆ	ค่าของผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน	วิธีทดสอบ
เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์	95.41	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN14013
ความหนืดที่ 40 °C(cst)	4.1976	ไม่ต่ำกว่า 3.5 และไม่สูงกว่า 5	ASTM D 445
จุดไหลเท (°C)	5	ไม่ต่ำกว่า -15 และไม่สูงกว่า 10	ASTM D 6751
จุดหมอกควัน (°C)	7	ไม่ต่ำกว่า -3 และไม่สูงกว่า 12	ASTM D 6751
จุดวาบไฟ (°C)	166	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)	0.425	ไม่สูงกว่า 0.5	ASTM D 664
ความหนาแน่นที่ 15 °C (kg/m ³)	872	ไม่ต่ำกว่า 860 และไม่สูงกว่า 900	ASTM D 1298

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล โดยทำการทดลองแบบเต็มรูป (full factorial experiment) ค่าความเป็นกรดของน้ำมันเริ่มต้นมีค่าเป็น 0.9958 mgKOH/g ซึ่งมีค่าไม่เกิน 4 mg KOH/g จึงสามารถผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเพียงขั้นตอนเดียว ในงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม MINITAB เพื่อหาผลกระทบของปัจจัยร่วมที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างสมการถดถอยเพื่อใช้พยากรณ์ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ ทำการทดลองเปรียบเทียบสภาวะที่ใช้ผลิตไบโอดีเซลที่ได้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ดีที่สุดในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคกับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ และศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันเมื่อกำหนดให้อัตราการป้อนสารมีค่าเท่ากัน และนำไบโอดีเซลที่ได้จากสภาวะทดลองที่ดีที่สุดมาทดสอบคุณสมบัติต่างๆ จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล

จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค คือ ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 65 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 5 วินาที ได้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 95.41 เปอร์เซ็นต์

2. การศึกษาปัจจัยร่วมที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์จากการผลิตไบโอดีเซล

การวิเคราะห์ความแปรปรวนภายใต้ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงให้เห็นว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา มีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์อย่างมีนัยสำคัญ โดยผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และผลกระทบร่วมระหว่างอัตราส่วนโดยโม

ลของเมทานอลต่อน้ำมัน อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ให้ค่า p -value มากกว่า 0.05 จึงถือว่าไม่มีผลกระทบร่วมต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

เมื่อศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างในการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันพบว่าที่ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูง การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มถึงระดับหนึ่งค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์จะมีค่าลดลงซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาสaponนิฟิเคชัน การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจะช่วยให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มีค่าสูงขึ้น แต่ถ้าเพิ่มในปริมาณมากเกินไปจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มีค่าน้อยลงเนื่องจากเกิดอิมัลชันดีขึ้น กลีเซอรอลผสมกับไบโอดีเซลดีขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีค่าสูงขึ้น แต่การเพิ่มอุณหภูมิมากเกินไปจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลงเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาสaponนิฟิเคชัน

3. การวิเคราะห์สมการถดถอย

ข้อมูลจากการทดลองได้นำมาวิเคราะห์ด้วยการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial regression) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ต่ออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน (r) ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (c) อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (T) และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (t) แสดงดังสมการที่ 3

สมการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมสามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R^2 adj) เท่ากับ 92.4 เปอร์เซ็นต์

4. การเปรียบเทียบไบโอดีเซลที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคกับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

เมื่อทำการเปรียบเทียบไบโอดีเซลที่สภาวะการทดลองที่ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.3 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 โดยในเครื่องปฏิกรณ์ช่องจุลภาคใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที ส่วนในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที พบว่าได้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ 95.41 และ 71.91 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคให้ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลและความร้อนดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

5. ศึกษาผลกระทบของความยาวท่อปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

เมื่อทำการเปรียบเทียบที่อัตราการไหลของสารเท่ากันแต่ใช้ท่อที่มีขนาดความยาวต่างกัน ส่งผลให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน พบว่าที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่สูงขึ้นความยาวท่อที่ยาวขึ้นจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ต่ำกว่าเพราะมีการรวมตัวของขนาดหยดวฏภาคที่ใหญ่ขึ้น การถ่ายโอนมวลจึงต่ำลงปฏิกิริยาจึงเกิดได้น้อยลง

6. การทดสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงบางประการของผลิตภัณฑ์ พบว่า คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้ได้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 95.41 เปอร์เซ็นต์ ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียสเท่ากับ 4.1976 เซนติสโตกส์ ค่าความเป็นกรดเท่ากับ 0.425 mg KOH/g จุดไหลเท จุดหมอกควัน และจุดวาบไฟเท่ากับ 57 และ 166 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาต่อ ดังนี้

1. ควรมีการพัฒนาเทคนิคการล้างไบโอดีเซล เนื่องจากต้องใช้เวลาในการล้างผลิตภัณฑ์นาน ใช้น้ำล้างปริมาณมาก และยังทำให้สูญเสียไบโอดีเซลไปบางส่วนในขั้นตอนการล้าง
2. ควรทำการศึกษาในเรื่องการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน หากค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อที่จะได้เห็นพฤติกรรมในการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค
3. ควรพัฒนาคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลเพื่อให้สามารถใช้ในเครื่องยนต์ได้จริง โดยทำการเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ให้ผ่านค่ามาตรฐาน โดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันเริ่มต้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กระทรวงพลังงาน. 2547. ไบโอดีเซล น้ำมันเชื้อเพลิงจากพืช. แหล่งที่มา:

<http://www.energy.go.th/index.php?q=node/385>. 10 กันยายน 2554.

กรมธุรกิจพลังงาน. 2549. เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับ เครื่องยนต์

การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549. แหล่งที่มา: <http://elaw.doeb.go.th>.

15 สิงหาคม 2554.

_____. 2550. เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรด

ไขมัน พ.ศ. 2550. แหล่งที่มา: <http://www.pttplc.com>. 15 สิงหาคม 2554.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. การออกแบบและวิเคราะห์การ
ทดลอง. สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ.

ศิริชัย พงษ์วิชัย. 2548. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยคอมพิวเตอร์. พิมพ์ครั้งที่ 15. สำนักพิมพ์
แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย. 2549. ไบโอดีเซล. บทนำ. แหล่งที่มา:

<http://www.vcharkarn.com/varticle/409>. 10 กันยายน 2554.

Agarwal, A.K. 2007. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal
combustion engines. **Prog. Energy Combust. Sci.** 33: 233-271.

Agarwal, A.K. and L.M. Das. 2001. Biodiesel Development and Characterization for Use as a
Fuel in Compression Ignition Engines. **Journal of Engineering for Gas Turbine and
Power.** 123(2): 440-447.

Avellaneda, F. and J. Salvado. 2011. Continuous transesterification of biodiesel in a helicoidal
reactor using recycled oil. **Fuel Processing Technology.** 92:83-91.

- Berchmans, H.J. and S. Hirata. 2008. Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. **Bioresource Technology**. 99:1716–1721.
- Christie, W.W. 1992. **Lipid Analysis**. Pergamon Press. Oxford. 3-8.
- Dietrich, T.R. 2009. **Microchemical Engineering in Practice**. A John Wiley & Sons, INC., Publication.
- Doell, R., S.K. Konar and B. Boocock. 2008. Kinetic parameters of a homogeneous transesterification of soybean oil. **J.Am.Oil.Chem.Soc.** 85:271-276.
- Doku, G.N., W. Verboom., D.N. Reinhoudt and A.V. Berg. 2005. On – microchip multiphase chemistry – a review of microreactor design principles and reagent contacting modes. **Tetrahedron report number**. 708:2733 – 2742.
- Dorado, M.P., E. Ballesteros., F.J. Lopez and M. Mittelbach. 2004. Optimization of alkaline-catalyzed transesterification of Brassica carinata oil for biodiesel production. **Energy Fuels**. 18 : 77 – 83.
- Dossin, T. F., R. Marie-Francoise., J. B. Rob and B. M. Guy. 2006. Simulation of Heterogeneously MgO-catalyzed Transesterification for Fine-chemical and Biodiesel Industrial Production. **Applied Catalysis B: Environmental**. 67: 136-148.
- Eevera, T., K. Rajendran. and S. Saradha. 2009. Biodiesel production process optimization and characterization to assess the suitability of the product for varied environmental conditions. **Renewable Energy**. 34:762 – 765.
- 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.

- Fangrui, M. and A. H. Milford. 1999. Biodiesel production: a review. **Biores. Technol.** 70 :1-15.
- Fukuda, H., A. Kondo and H. Noda. 2001. Biodiesel fuel production by tranesterification of oils. **J.Biol Eng.** 92: 405-416.
- Guan, G., K. Kusakabe., K. Moriyama and N. Sakurai. 2009. Transesterification of Sunflower Oil with Methanol in a Microtube Reactor. **Ind. Eng. Chem. Res.** 48:1357-1363.
- Kobayashi, J., Y. Mori. and S. Kobayashi. 2006. Multiphase organic synthesis in microchannel reactors. **Chem Asian j.** 1: 22 – 35.
- Kouzu, M., T. Kasuno., M. Tajika., S. Yamanaka. and J. Hidaka. 2008. Active phase of calcium oxide used as solid catalyst for transesterification of soybean oil with refluxing methanol. **Appl. Catal. A** 334 : 357 – 365.
- Ma, F. and M.A. Hanna. 1999. Biodiesel production: a review. **Bioresource Technology.** 70: 1-15.
- Marchetti, J.M., V.U. Miguel. and A.F. Errazu. 2005. Possible methods for biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** 11:1300 - 1311.
- Nas, B. and A. Berkday. 2007. Energy potential of biodiesel generated from waste cooking oil: an environmental approach. **Energy Sources Part B.** 13:63 – 71.
- Ramadhas, A.S., S. Jayaraj. and C. Muraleecharan. 2005. Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. **Fuel.** 84: 335-340.
- Rashid, U. and F. Anwar. 2008. Production of Biodiesel Through Optimized AlkalinecatalyzedTranesterification of Rapeseed Oil. **Fuel.** 87:265-273.

- Srivastava, A. and R. Prasad. 2000. Triglycerides-based diesel fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 4(2000): 111 – 133.
- Sun, P., B. Wang., J. Yao., L. Zhang. and N. Xu. 2010. Fast Synthesis of Biodiesel at High Throughput in Microstructured Reactors. **Ind. Eng. Chem. Res.** 49: 1259-1264.
- Sun, J., J. Ju., L. Ji., L. Zhang. and N. Xu. 2008. Synthesis of Biodiesel in Capillary Microreactors. **Ind. Eng. Chem. Res.** 47:1398 – 1403.
- Sun, P., J. Sun., J. Yao., L. Zhang. and N. Xu. 2010. Continuous production of biodiesel from high acid value oils in microstructured reactor by acid-catalyzed reactions. **Chemical Engineering Journal**. 364 – 370.
- Veljkovic, B.V., S.H. Iakicevic., 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.
- Vincente, G., M. Martinez. and J. Aracil. 2004. Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems. **Bioresour Technol.** 92:297-305.
- Wen, Z., X. Yu., S. Tung., J. Yan. and E. Dahlquist. 2009. Intensification of biodiesel synthesis using zigzag micro-channel reactors. **Bioresour Technology**. 100:3054-3060.
- Zhang, J. and L. Jiang. 2008. Acid-catalyzed esterification of *Zanthoxylum bungeanum* seed oil with high free fatty acids for biodiesel production. **Bioresour Technology**. 99 :8995–8998.
- Zheng, S., M. Kates., M.A. Dube. and D.D. McLean. 2006. Acid-catalyzed production of biodiesel from waste frying oil. **Bioresour Technology**. 30: 267-272.

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**. 50: 648-650.







ภาคผนวก ก
ผลการทดลองไปโอดีเซลจากเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค

ผลการทดลองที่สภาวะการทดลองต่างๆของการผลิตไบโอดีเซล

จากการทำการทดลองผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค ที่สภาวะต่างกัน โดยทำการทดลองแบบเต็มรูปแบบ (full factorial experiment) ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางผนวกที่ ก1



ตารางผนวกที่ ก1 สภาวะการทดลองและค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทดลองผลิตไบโอดีเซลแบบช่องจุลภาค

สภาวะ	การทดลองที่							
การทดลองและ								
ค่าคุณสมบัติ	1	2	3	4	5	6	7	8
อัตราส่วนโดย								
โมลเมทานอล	4.5:1	6:1	9:1	4.5:1	4.5:1	4.5:1	4.5:1	4.5:1
ต่อน้ำมัน								
อุณหภูมิใน								
ในการเกิด	60	60	60	60	60	60	60	55
ปฏิกิริยา (°C)								
เวลาในการ	10	10	10	10	10	5	20	10
เกิดปฏิกิริยา (sec)								
%KOH (%)	1	1	1	0.7	1.3	1	1	1
อัตรา								
การไหลของ	1.223	1.16	1.052	1.223	1.223	2.446	0.612	1.223
น้ำมัน (ml/min)								
อัตรา								
การไหลของ	0.237	0.3	0.408	0.237	0.237	0.474	0.118	0.237
เมทานอล								
(ml/min)								
ความดัน (psi)	90	90	90	80	80	110	60	100
%FAME (%)	86.59	91.64	90.74	84.32	83.90	89.24	77.55	85.12
acid value	0.4488	0.4488	0.3927	0.4836	0.4692	0.4488	0.6171	0.4930
(mgKOH/g)								
ความหนืด (cst)	4.538	4.530	3.844	4.617	4.562	4.364	5.694	4.332

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

สภาวะ								
การทดลองและ	การทดลองที่							
ค่าคุณสมบัติ	9	10	11	12	13	14	15	16
อัตราส่วนโดย								
โมลเมทานอล	4.5:1	4.5:1	4.5:1	4.5:1	4.5:1	4.5:1	4.5:1	4.5:1
ต่อน้ำมัน								
อุณหภูมิใน								
ในการเกิด	65	60	60	60	60	55	55	55
ปฏิกิริยา (°C)								
เวลาในการ	10	5	5	20	20	10	10	5
เกิดปฏิกิริยา (sec)								
%KOH (%)	1	0.7	1.3	0.7	1.3	0.7	1.3	0.7
อัตรา								
การไหลของ	1.223	2.446	2.446	0.612	0.612	1.223	1.223	2.446
น้ำมัน (ml/min)								
อัตรา								
การไหลของ	0.237	0.474	0.474	0.118	0.118	0.237	0.237	0.474
เมทานอล								
(ml/min)								
ความดัน (psi)	100	130	110	40	40	90	100	140
%FAME (%)	84.02	85.25	84.29	70.33	81.73	66.63	84.97	78.63
acid value	0.4687	0.4687	0.4883	0.4665	0.4639	0.4923	0.4824	0.4551
(mgKOH/g)								
ความหนืด (cst)	4.546	4.673	4.712	4.633	4.839	5.489	4.712	4.522

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

สภาวะ	การทดลองที่							
การทดลองและ								
ค่าคุณสมบัติ	17	18	19	20	21	22	23	24
อัตราส่วนโดย								
โมลเมทานอล	4.5:1	4.5:1	4.5:1	4.5:1	4.5:1	4.5:1	4.5:1	4.5:1
ต่อน้ำมัน								
อุณหภูมิใน								
ในการเกิด	55	55	55	55	55	65	65	65
ปฏิกิริยา (°C)								
เวลาในการ	5	5	20	20	20	10	10	5
เกิดปฏิกิริยา (sec)								
%KOH (%)	1	1.3	0.7	1	1.3	0.7	1.3	0.7
อัตรา								
การไหลของ	2.446	2.446	0.612	0.612	0.612	1.223	1.223	2.446
น้ำมัน (ml/min)								
อัตรา								
การไหลของ	0.474	0.474	0.118	0.118	0.118	0.237	0.237	0.474
เมทานอล								
(ml/min)								
ความดัน (psi)	150	150	50	50	60	120	100	140
%FAME (%)	86.20	86.04	61.78	70.58	83.75	83.16	90.58	83.09
acid value	0.4639	0.4551	0.4488	0.4665	0.4687	0.4488	0.4675	0.4639
(mgKOH/g)								
ความหนืด (cst)	4.641	4.752	7.263	6.296	4.388	4.792	4.364	4.641

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

สภาวะ								
การทดลองและ	การทดลองที่							
ค่าคุณสมบัติ	25	26	27	28	29	30	31	32
อัตราส่วนโดย								
โมลเมทานอล	4.5:1	4.5:1	4.5:1	4.5:1	4.5:1	6:1	6:1	6:1
ต่อน้ำมัน								
อุณหภูมิใน								
ในการเกิด	65	65	65	65	65	60	60	60
ปฏิกิริยา ($^{\circ}\text{C}$)								
เวลาในการ	5	5	20	20	20	10	10	5
เกิดปฏิกิริยา (sec)								
%KOH (%)	1	1.3	0.7	1	1.3	0.7	1.3	0.7
อัตรา								
การไหลของ	2.446	2.446	0.612	0.612	0.612	1.16	1.16	2.32
น้ำมัน (ml/min)								
อัตรา								
การไหลของ	0.474	0.474	0.118	0.118	0.118	0.3	0.3	0.6
เมทานอล								
(ml/min)								
ความดัน (psi)	150	120	80	80	80	80	80	100
%FAME (%)	85.67	92.11	73.81	80.65	89.03	85.32	87.15	86.47
acid value	0.4665	0.4452	0.4923	0.4639	0.4452	0.4665	0.4488	0.4452
(mgKOH/g)								
ความหนืด (cst)	4.546	4.633	5.512	4.617	4.602	4.752	4.364	4.641

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

สภาวะ								
การทดลองและ	การทดลองที่							
ค่าคุณสมบัติ	33	34	35	36	37	38	39	40
อัตราส่วนโดย								
โมลเมทานอล	6:1	6:1	6:1	6:1	6:1	6:1	6:1	6:1
ต่อน้ำมัน								
อุณหภูมิใน								
ในการเกิด	60	60	60	60	60	55	55	55
ปฏิกิริยา (°C)								
เวลาในการ	5	5	20	20	20	5	5	5
เกิดปฏิกิริยา (sec)								
%KOH (%)	1	1.3	0.7	1	1.3	0.7	1	1.3
อัตรา								
การไหลของ	2.32	2.32	0.58	0.58	0.58	2.32	2.32	2.32
น้ำมัน (ml/min)								
อัตรา								
การไหลของ	0.6	0.6	0.15	0.15	0.15	0.6	0.6	0.6
เมทานอล								
(ml/min)								
ความดัน (psi)	110	100	60	60	50	140	140	140
%FAME (%)	92.50	92.96	81.39	86.66	86.94	83.51	89.21	87.05
acid value	0.4315	0.4382	0.4675	0.4639	0.4480	0.4551	0.4382	0.4488
(mgKOH/g)								
ความหนืด (cst)	4.546	4.364	4.792	4.506	4.697	4.752	4.364	4.388

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

สภาวะ								
การทดลองและ	การทดลองที่							
ค่าคุณสมบัติ	41	42	43	44	45	46	47	48
อัตราส่วนโดย								
โมลเมทานอล	6:1	6:1	6:1	6:1	6:1	6:1	6:1	6:1
ต่อน้ำมัน								
อุณหภูมิใน								
ในการเกิด	55	55	55	55	55	55	65	65
ปฏิกิริยา ($^{\circ}\text{C}$)								
เวลาในการ	10	10	10	20	20	20	5	5
เกิดปฏิกิริยา (sec)								
%KOH (%)	0.7	1	1.3	0.7	1	1.3	0.7	1
อัตรา								
การไหลของ	1.16	1.16	1.16	0.58	0.58	0.58	2.32	2.32
น้ำมัน (ml/min)								
อัตรา								
การไหลของ	0.3	0.3	0.3	0.15	0.15	0.15	0.6	0.6
เมทานอล								
(ml/min)								
ความดัน (psi)	90	90	90	60	70	70	120	120
%FAME (%)	83.76	86.02	86.30	75.69	80.33	83.80	85.82	87.50
acid value	0.4488	0.4488	0.4665	0.4923	0.4687	0.4687	0.4488	0.4315
(mgKOH/g)								
ความหนืด (cst)	5.132	5.005	4.831	4.831	4.752	4.887	4.506	4.697

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

สภาวะ	การทดลองที่							
การทดลองและ								
ค่าคุณสมบัติ	49	50	51	52	53	54	55	56
อัตราส่วนโดย								
โมลเมทานอล	6:1	6:1	6:1	6:1	6:1	6:1	6:1	9:1
ต่อน้ำมัน								
อุณหภูมิใน								
ในการเกิด	65	65	65	65	65	65	65	60
ปฏิกิริยา (°C)								
เวลาในการ	5	10	10	10	20	20	20	5
เกิดปฏิกิริยา (sec)								
%KOH (%)	1.3	0.7	1	1.3	0.7	1	1.3	0.7
อัตรา								
การไหลของ	2.32	1.16	1.16	1.16	0.58	0.58	0.58	2.104
น้ำมัน (ml/min)								
อัตรา								
การไหลของ	0.6	0.3	0.3	0.3	0.15	0.15	0.15	0.815
เมทานอล								
(ml/min)								
ความดัน (psi)	130	80	90	100	50	60	70	120
%FAME (%)	95.45	83.63	85.03	93.68	78.98	84.12	94.19	78.24
acid value	0.4250	0.4488	0.4639	0.4315	0.4488	0.4445	0.4186	0.4687
(mgKOH/g)								
ความหนืด (cst)	4.198	4.831	4.792	4.087	4.697	4.500	4.030	4.750

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

สภาวะ								
การทดลองและ	การทดลองที่							
ค่าคุณสมบัติ	57	58	59	60	61	62	63	64
อัตราส่วนโดย								
โมลเมทานอล	9:1	9:1	9:1	9:1	9:1	9:1	9:1	9:1
ต่อน้ำมัน								
อุณหภูมิใน								
ในการเกิด	60	60	60	60	60	60	60	55
ปฏิกิริยา ($^{\circ}\text{C}$)								
เวลาในการ	5	5	10	10	20	20	20	5
เกิดปฏิกิริยา (sec)								
%KOH (%)	1	1.3	0.7	1.3	0.7	1	1.3	0.7
อัตรา								
การไหลของ	2.104	2.104	1.052	1.052	0.526	0.526	0.526	2.104
น้ำมัน (ml/min)								
อัตรา								
การไหลของ	0.815	0.815	0.408	0.408	0.204	0.204	0.204	0.815
เมทานอล								
(ml/min)								
ความดัน (psi)	130	110	90	80	80	70	50	100
%FAME (%)	91.12	88.22	67.47	78.34	64.55	76.42	76.78	71.25
acid value	0.4382	0.4551	0.4923	0.4687	0.4923	0.4687	0.4665	0.4639
(mgKOH/g)								
ความหนืด (cst)	4.360	4.500	5.510	4.830	4.030	4.300	3.890	4.884

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

สภาวะ	การทดลองที่						
การทดลองและ							
ค่าคุณสมบัติ	65	66	67	68	69	70	71
อัตราส่วนโดย							
โมลเมทานอล	9:1	9:1	9:1	9:1	9:1	9:1	9:1
ต่อน้ำมัน							
อุณหภูมิใน							
ในการเกิด	55	55	55	55	55	55	55
ปฏิกิริยา (°C)							
เวลาในการ	5	5	10	10	10	20	20
เกิดปฏิกิริยา (sec)							
%KOH (%)	1	1.3	0.7	1	1.3	0.7	1
อัตรา							
การไหลของ	2.104	2.104	1.052	1.052	0.526	0.526	0.526
น้ำมัน (ml/min)							
อัตรา							
การไหลของ	0.815	0.815	0.408	0.408	0.204	0.204	0.204
เมทานอล (ml/min)							
ความดัน (psi)	120	140	70	80	100	60	70
%FAME (%)	80.16	86.58	65.33	74.42	80.15	44.57	74.42
acid value	0.4551	0.4488	0.4472	0.4687	0.4675	0.5794	0.4923
(mgKOH/g)							
ความหนืด (cst)	4.750	4.690	5.130	4.880	4.500	5.480	4.750

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

สภาวะ	การทดลองที่						
การทดลองและ ค่าคุณสมบัติ	72	73	74	75	76	77	78
อัตราส่วนโดย							
โมลเมทานอล	9:1	9:1	9:1	9:1	9:1	9:1	9:1
ต่อน้ำมัน							
อุณหภูมิใน							
ในการเกิด	55	65	65	65	65	65	65
ปฏิกิริยา (°C)							
เวลาในการ	20	5	5	5	10	10	10
เกิดปฏิกิริยา (sec)							
%KOH (%)	1.3	0.7	1	1.3	0.7	1	1.3
อัตรา							
การไหลของ	0.526	2.104	2.104	2.104	1.052	1.052	1.052
น้ำมัน (ml/min)							
อัตรา							
การไหลของ	0.204	0.815	0.815	0.815	0.408	0.408	0.408
เมทานอล (ml/min)							
ความดัน (psi)	80	120	130	120	90	70	80
%FAME (%)	76.02	72.33	81.12	82.37	65.69	76.76	74.82
acid value	0.4687	0.4836	0.4488	0.4382	0.4923	0.4665	0.4687
(mgKOH/g)							
ความหนืด (cst)	4.500	4.880	4.290	4.230	4.500	4.690	4.290

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

สถานะ	การทดลองที่		
การทดลองและ			
ค่าคุณสมบัติ	79	80	81
อัตราส่วนโดย			
โมลเมทานอล	9:1	9:1	9:1
ต่อน้ำมัน			
อุณหภูมิใน			
ในการเกิด	65	65	65
ปฏิกิริยา ($^{\circ}\text{C}$)			
เวลาในการ	20	20	20
เกิดปฏิกิริยา (sec)			
%KOH (%)	0.7	1	1.3
อัตรา			
การไหลของ	0.526	0.526	0.526
น้ำมัน (ml/min)			
อัตรา			
การไหลของ	0.204	0.204	0.204
เมทานอล (ml/min)			
ความดัน (psi)	50	50	60
%FAME (%)	53.09	76.75	67.29
acid value	0.5009	0.4488	0.4475
(mgKOH/g)			
ความหนืด (cst)	5.000	4.230	4.430



ภาคผนวก ข
การคำนวณค่าต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย

1. การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันหมูเริ่มต้น

จากการวิเคราะห์ปริมาณและชนิดของกรดไขมันของน้ำมันหมูแสดงในตารางผนวกที่ ข1

ตารางผนวกที่ ข1 ปริมาณและชนิดของกรดไขมันของน้ำมันหมู

ชื่อ	กรดไขมัน โครงสร้าง	ส่วนประกอบของกรดไขมันในน้ำมันหมู	
		น้ำหนักโมเลกุล	หมู (เปอร์เซ็นต์)
Octanote	8:0	144.21	0.008
Decanoic	10:0	172.26	0.063
Lauric	12:0	200.32	0.102
Myristic	14:0	228.37	1.302
Palmitic	16:0	256.42	22.292
Palmitoleic	16:1	254.41	2.214
Stearic	18:0	284.48	11.341
Oleic	18:1	282.46	41.46
Linoleic	18:2	280.45	15.694
Linolenic	18:3	278.49	0.962
Arachidonic	20:0	304.47	0.852
Behenic	22:0	340.58	0.043
Erucic	22:1	338.58	0.019
Lignoceric	24:0	368.63	0.16
อื่นๆ			3.488

1.1 คำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมันอิสระในน้ำมันหมู

$$MW_{FFA} = \sum \left(\frac{\%FA_n}{100} \times MW_n \right)$$

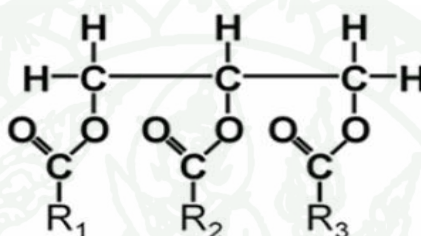
โดยที่ MW_{FFA} = น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมันอิสระ

FA_n = ปริมาณของกรดไขมัน

MW_n = น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมัน

$$\begin{aligned}
 \text{จะได้ } MW_{\text{FFA}} &= (0.008/100 \times 144.21) + (0.063/100 \times 172.26) + (0.102/100 \times 200.32) + \\
 &\quad (1.302/100 \times 228.37) + (22.292/100 \times 256.42) + (2.214/100 \times 254.41) + \\
 &\quad (11.341/100 \times 284.48) + (41.46/100 \times 282.46) + (15.694/100 \times 280.45) + \\
 &\quad (0.962/100 \times 278.49) + (0.852/100 \times 304.47) + (0.043/100 \times 340.58) + \\
 &\quad (0.019/100 \times 338.58) + (0.16/100 \times 368.63) \\
 MW_{\text{FFA}} &= 265.55 \text{ กรัม/โมล}
 \end{aligned}$$

1.2 คำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันหมู



ภาพผนวกที่ ข1 โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์

$$\begin{aligned}
 MW_{\text{TG}} &= 41 + (3 \times (MW_{\text{FFA}} - 1)) \\
 \text{โดยที่ } MW_{\text{TG}} &= \text{น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของไตรกลีเซอไรด์} \\
 \text{จะได้ } MW_{\text{TG}} &= 41 + (3 \times (265.55 - 1)) \\
 &= 834.65 \text{ กรัม/โมล}
 \end{aligned}$$

1.3 คำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำ피ชหมู

$$\begin{aligned}
 MW_{\text{waste oil}} &= MW_{\text{TG}} + MW_{\text{FFA}} \\
 \text{โดยที่ } MW_{\text{waste oil}} &= \text{น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันหมู} \\
 \text{จะได้ } MW_{\text{waste oil}} &= (98.01/100 \times 834.65) + (1.99/100 \times 265.55) \\
 &= 823.225 \text{ กรัม/โมล}
 \end{aligned}$$

2. การคำนวณเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ

$$\%FAME = \frac{(\sum A) - A_{us}}{A_{us}} \times \frac{C_s V_s}{W} \times 100$$

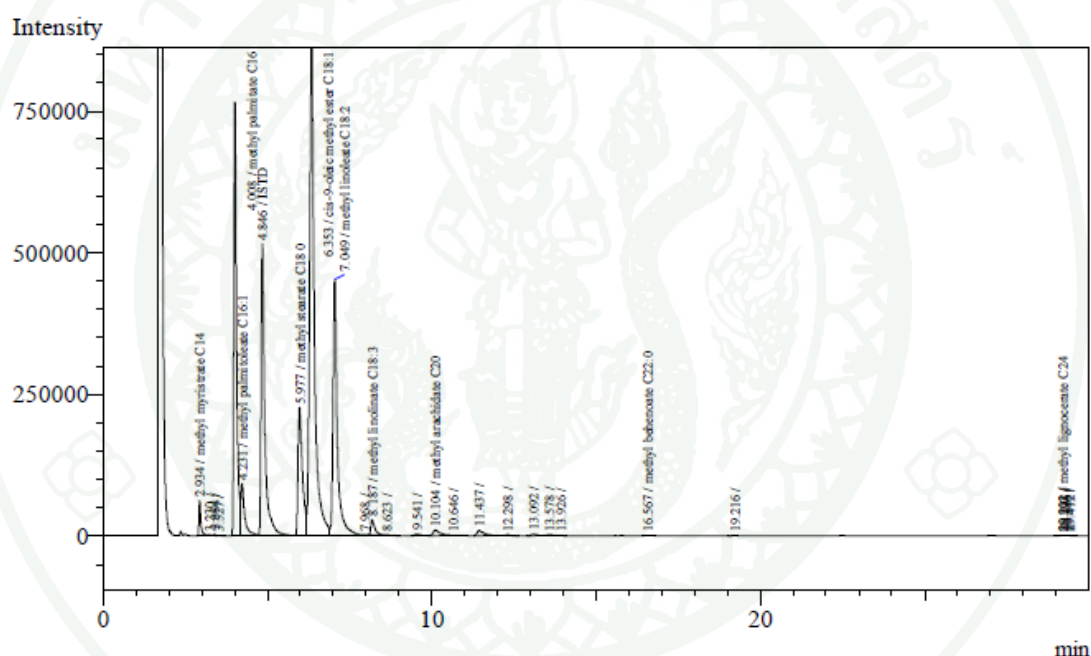
โดยที่ $\sum A$ = ผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟตั้งแต่ C14:0 ถึง C24:1

A_{us} = พื้นที่ใต้กราฟของ C₁₇

C_s = ความเข้มข้นของ C₁₇ (mg/ml)

V_s = ปริมาณของ C₁₇ ที่ถูกใช้ไป (μL)

W = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ (mg)



ภาพผนวกที่ ข2 ตัวอย่างโครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์

ตารางผนวกที่ ข2 ตัวอย่างค่าจากโครมาโทแกรมของตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Name
1	2.934	271097	62058	C14
2	3.23	5562	1671	
3	3.384	9116	2231	
4	3.527	3370	677	
5	4.008	4440700	765453	C16
6	4.231	727607	91884	C16:1
7	4.846	4081851	516308	ISTD
8	5.977	2135876	226655	C18:0
9	6.353	8944142	894424	C18:1
10	7.049	4235211	452571	C18:2
11	7.968	1672	302	
12	8.187	234037	27242	C18:3
13	8.623	10341	1069	
14	9.541	33246	2689	
15	10.104	146234	9887	C20
16	10.646	3147	548	
17	11.437	118893	8874	
18	12.298	13620	1212	
19	13.092	34242	2876	
20	13.578	17818	1608	
21	13.926	1287	231	
22	16.567	13052	978	C22
23	19.216	2104	223	
24	29.202	5454	682	C24

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Name
25	29.222	2031	708	
26	29.295	3260	720	
27	29.34	2300	610	
28	29.412	2897	466	
Total		25500104	3074857	

จากตารางที่ ข2 สามารถคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆได้ดังนี้

$$\sum A = 25489679 \text{ (พื้นที่ใต้กราฟรวมของเมทิลเอสเทอร์ตั้งแต่ } C_{14} \text{ ถึง } C_{24})$$

$$A_{us} = 4081851$$

$$C_s = 10.010 \text{ (mg/ml)}$$

$$V_s = 1 \text{ (ml)}$$

$$W = 55 \text{ (mg)}$$

แทนค่าในสมการ

$$\begin{aligned} \%FAME &= \frac{(25489679) - 4081851}{4081851} \times \frac{10.010 \times 1}{55} \times 100 \\ &= 95.41 \% \end{aligned}$$

3. การคำนวณปริมาณน้ำมันและเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

มวลโมเลกุลของเมทานอลเป็น 32 กรัมต่อโมล

ความหนาแน่นเมทานอลเป็น 0.79 g/cm^3

มวลโมเลกุลของน้ำมันหมูเป็น 823.2249 กรัมต่อโมล

ความหนาแน่นน้ำมันเป็น 0.884 g/cm^3

ตัวอย่างการคำนวณ ถ้าต้องการเตรียมอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1
หาน้ำหนักของเมทานอลและน้ำมัน โดยใช้สูตร

$$\text{น้ำหนักสาร (g)} = \text{จำนวนโมล} \times \text{น้ำหนักโมเลกุล}$$

จะได้ น้ำหนักเมทานอลเป็น 192 กรัม และน้ำหนักน้ำมันเป็น 823.2249 กรัม
หาปริมาตรของเมทานอลและน้ำมันที่ใช้ โดยใช้สูตร

$$\text{ปริมาตร} = \text{น้ำหนักสาร} \div \text{ความหนาแน่น}$$

จะได้ปริมาตรของเมทานอลเป็น 243.038 cm^3 และปริมาตรของน้ำมันเป็น 931.250 cm^3

ปริมาตรของท่อปฏิกรณ์ไมโครแซแนลเป็น 0.2433 cm^3

จะได้ อัตราส่วนของปริมาตรรวมของเมทานอลต่อน้ำมันกับปริมาตรของท่อ เป็น 4826.155

ดังนั้นในท่อปฏิกรณ์จะต้องมีปริมาตรเมทานอลเท่ากับ $243.038/4826.155 = 0.0504 \text{ cm}^3$

มีปริมาตรน้ำมันเท่ากับ $931.250/4826.155 = 0.1930 \text{ cm}^3$

กำหนดระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 10 วินาที เท่ากับ 0.1667 นาที

ดังนั้น อัตราการไหลของเมทานอลเท่ากับ $0.0504/0.1667$ เท่ากับ 0.30 ml/min

อัตราการไหลของน้ำมันเท่ากับ $0.1930/0.1667$ เท่ากับ 1.16 ml/min



1. การวิเคราะห์ค่าความหนืด

เปิดอ่างควบคุมอุณหภูมิให้น้ำในอ่างมีอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เทสารตัวอย่างลงในหลอดวัดความหนืด (viscometer) ที่ทราบค่าคงที่ โดยเทน้ำมันในปริมาณ 7 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำหลอดวัดความหนืดไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 15 นาที ใช้จุกยางอุดสารตัวอย่างจากหลอดวัดความหนืดให้ขึ้นมาอยู่เหนือขีดบน ทำการจับเวลาสารตัวอย่างโดยนับจากขีดบนลงขีดล่าง ดังภาพผนวกที่ ค1 บันทึกเวลาที่ได้ในหน่วยวินาทีนำมาหาค่าความหนืดโดยนำมาคูณกับค่าคงที่ของหลอดวัดความหนืด (ค่าคงที่หลอดวัดความหนืดคือ 0.007920 cst/s)



ภาพผนวกที่ ค1 หลอดวัดความหนืด (viscometer)

2. การวิเคราะห์จุดวาบไฟ

เทสารตัวอย่างลงไปในตัวโลหะของเครื่อง Pensky – Martens Closed Flash Tester แสดงดังภาพผนวกที่ ค2 โดยใช้ปริมาณ 80 มิลลิลิตร แล้วเพิ่มความร้อนให้กับน้ำมันในตัวพร้อมกับจุดไฟในทุกๆอุณหภูมิที่สูงขึ้น จุดวาบไฟคือจุดที่ไฟติดครั้งแรก



ภาพผนวกที่ ค2 เครื่อง Pensky – Martens Closed Flash Tester

3.การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

ชั่งน้ำมันหนัก 5 กรัมลงในขวดรูปชมพู่ เติมโพรพานอล 30 ลิตร หยดฟีนอล์ฟทาไลน์ 2 – 3 หยด หลังจากนั้นนำมาไทเทรตกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เมื่อสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู(จุดยุติ) บันทึกปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ นำไปคำนวณหาค่าความเป็นกรดจากสมการ

$$\text{Acid value} = \frac{V \times 56.1 \times 0.1}{g}$$

โดยที่ V = ปริมาตรของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ (ml)

g = น้ำหนักของน้ำมันตัวอย่าง (g)

4. การวิเคราะห์จุดหมอกควัน จุดไหลเท

นำหลอดทดลองใส่น้ำมันและปิดด้วยจุกยางที่เสียบเทอร์โมมิเตอร์ไว้ นำหลอดทดลองไปแช่ในอ่างน้ำแข็งที่มีเกลือผสมอยู่ เมื่อเกิดหมอกให้อ่านอุณหภูมิขณะนั้นและนำหลอดทดลองออกจากอ่างน้ำแข็งสังเกตจนกระทั่งหมอกหายไป อ่านอุณหภูมิ นำอุณหภูมิทั้งสองค่ามาเฉลี่ยจะได้จุดหมอกควัน

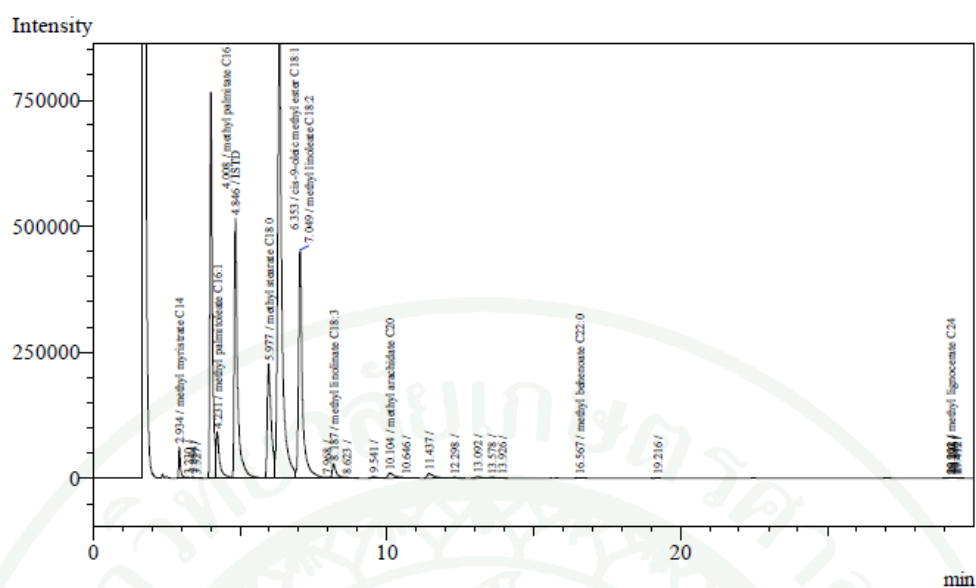
การหาจุดไหลเทให้นำหลอดทดลองจุ่มในอ่างน้ำแข็งเมื่อสารตัวอย่างเริ่มแข็งค่อยๆเอียงหลอดทดลองเป็นมุม 45 องศา เป็นเวลา 3 วินาที อุณหภูมิแรกที่ทำให้สารตัวอย่างไม่มีการไหลตามแรงโน้มถ่วงของโลกคือจุดไหลเท

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

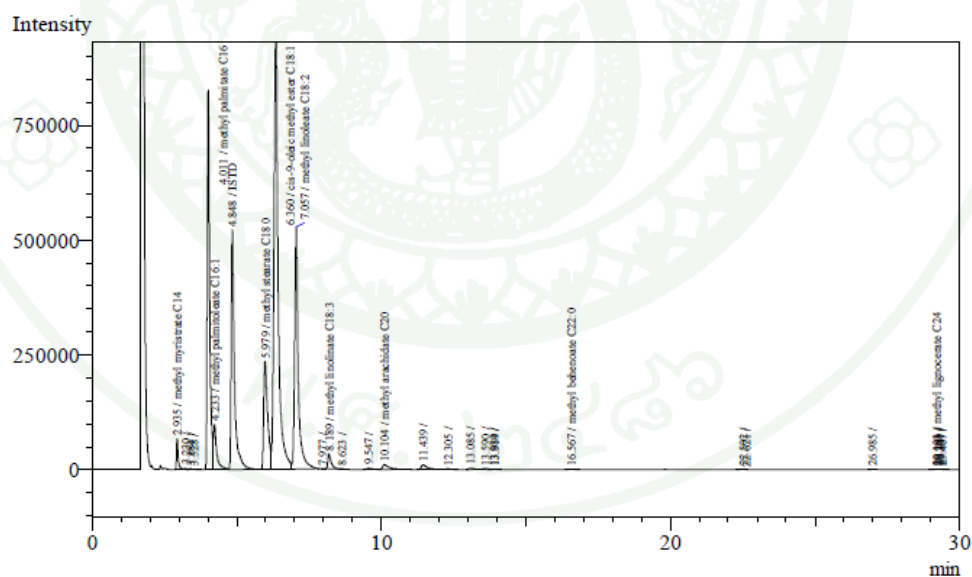
ภาคผนวก ง

ตัวอย่างโครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

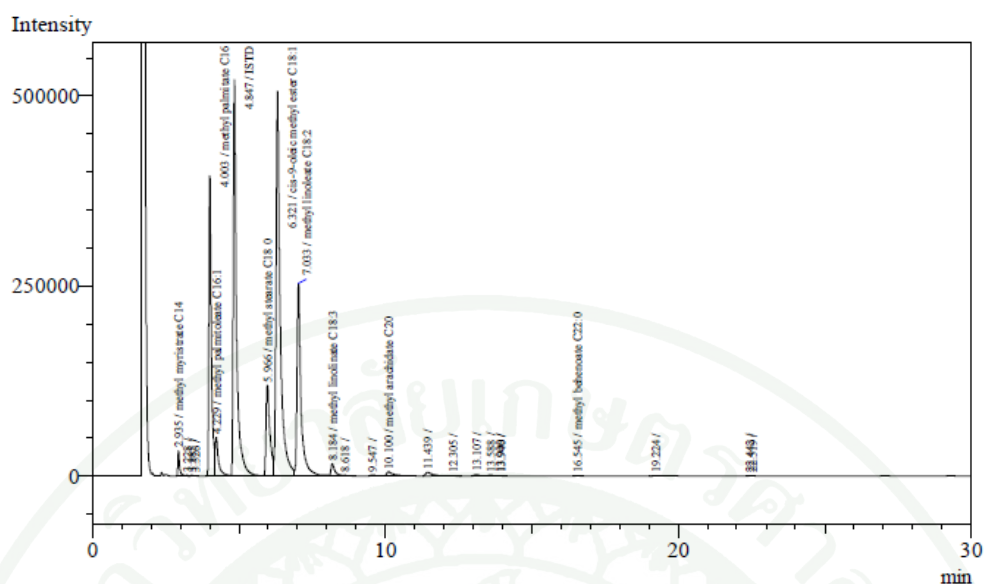
พ.ศ. ๒๕๕๖



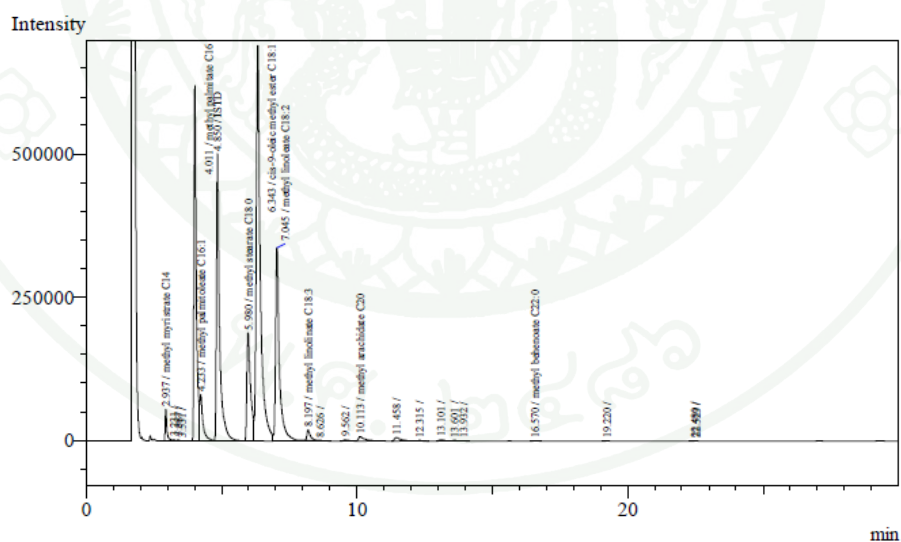
ภาพผนวกที่ 1 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.3% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที



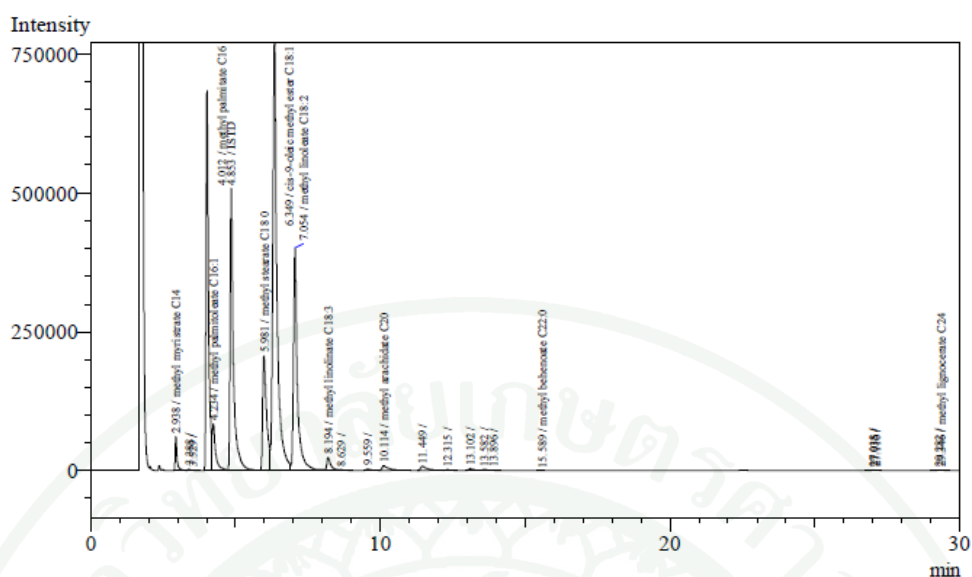
ภาพผนวกที่ 2 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.3% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที



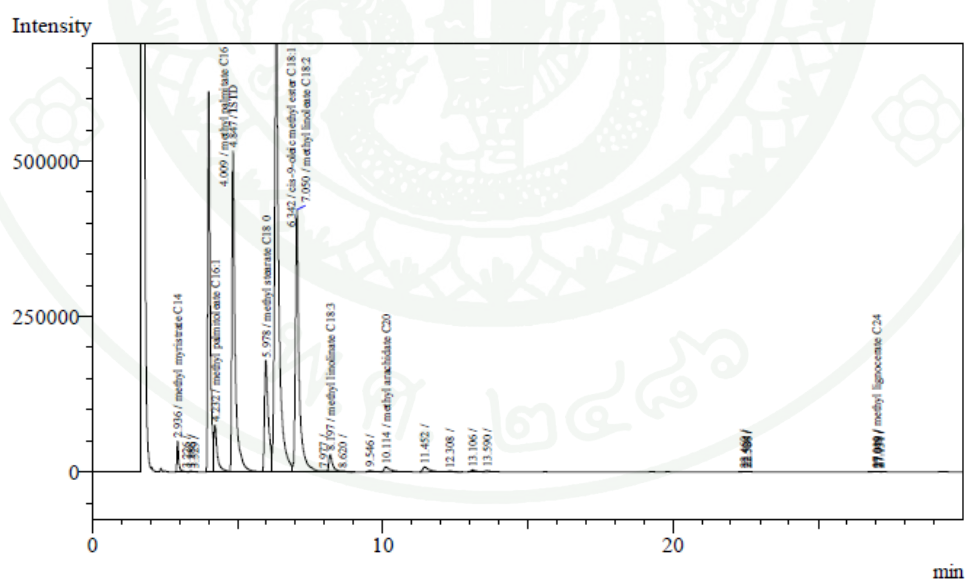
ภาพผนวกที่ 3 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.3% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที



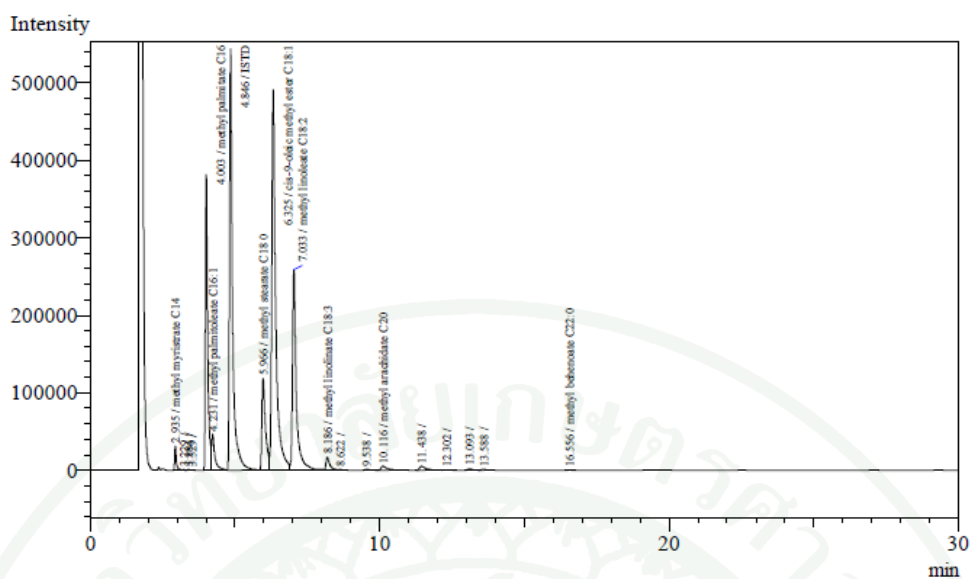
ภาพผนวกที่ 4 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที



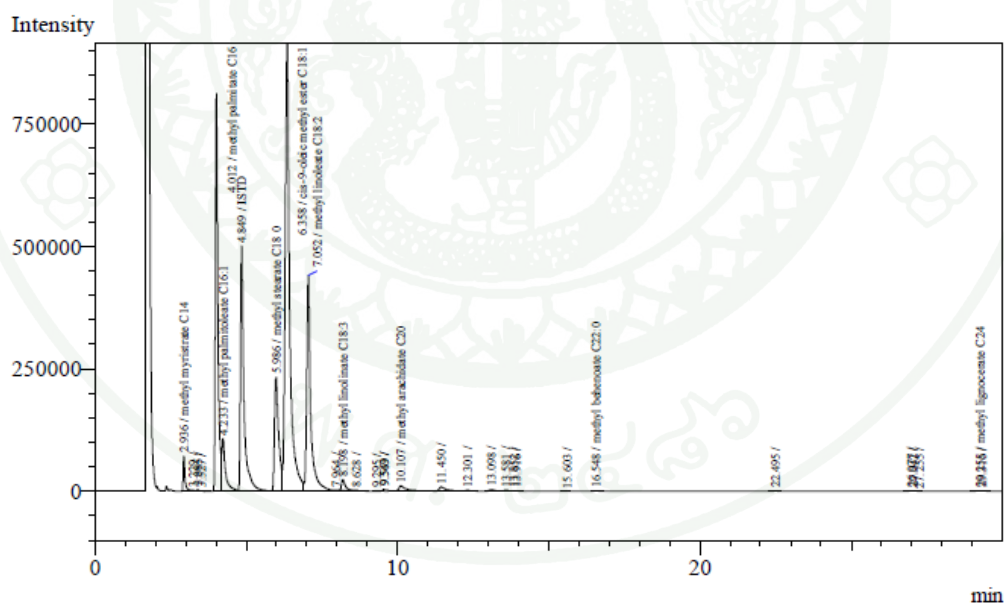
ภาพผนวกที่ 5 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที



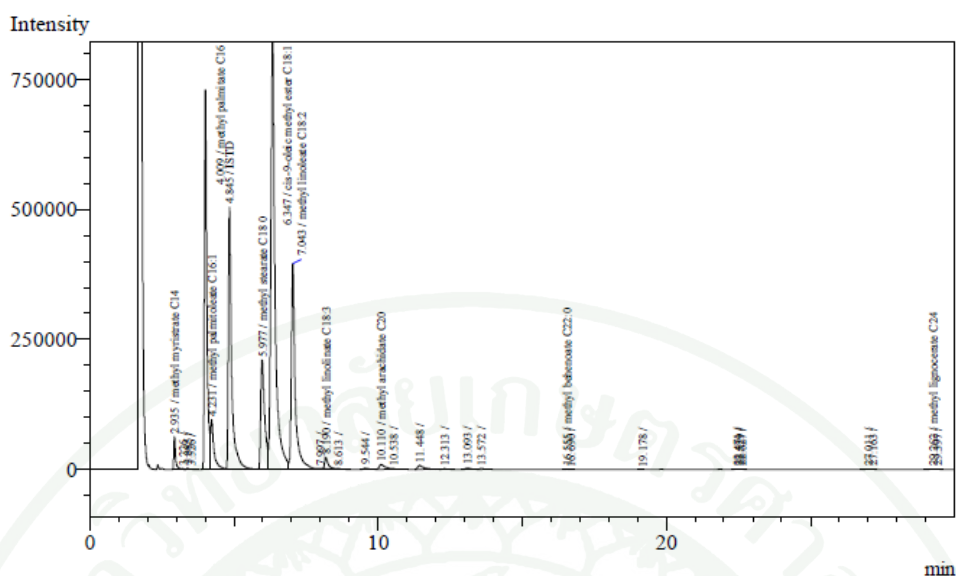
ภาพผนวกที่ 6 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที



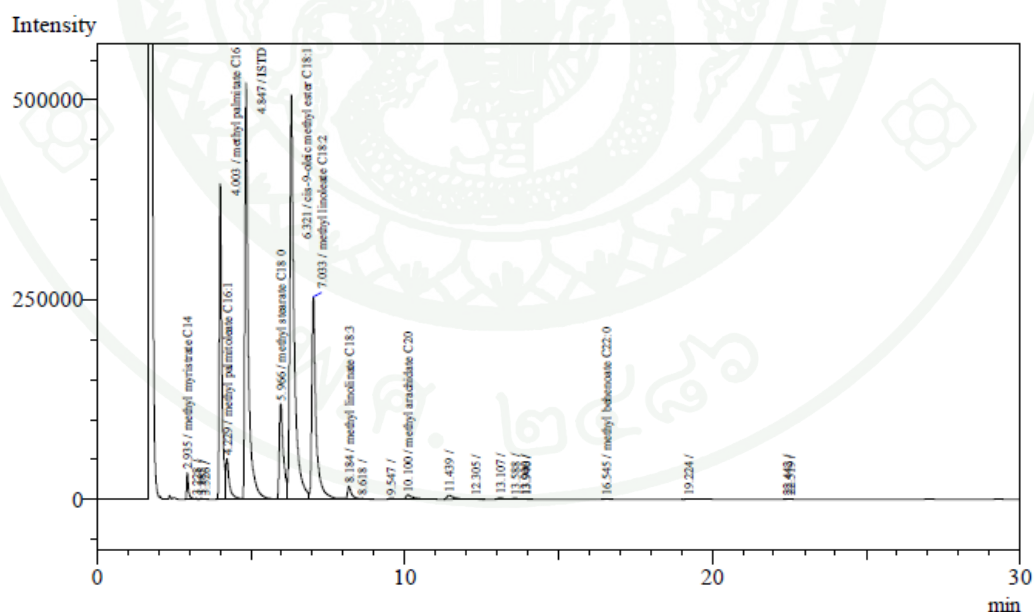
ภาพผนวกที่ 7 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที



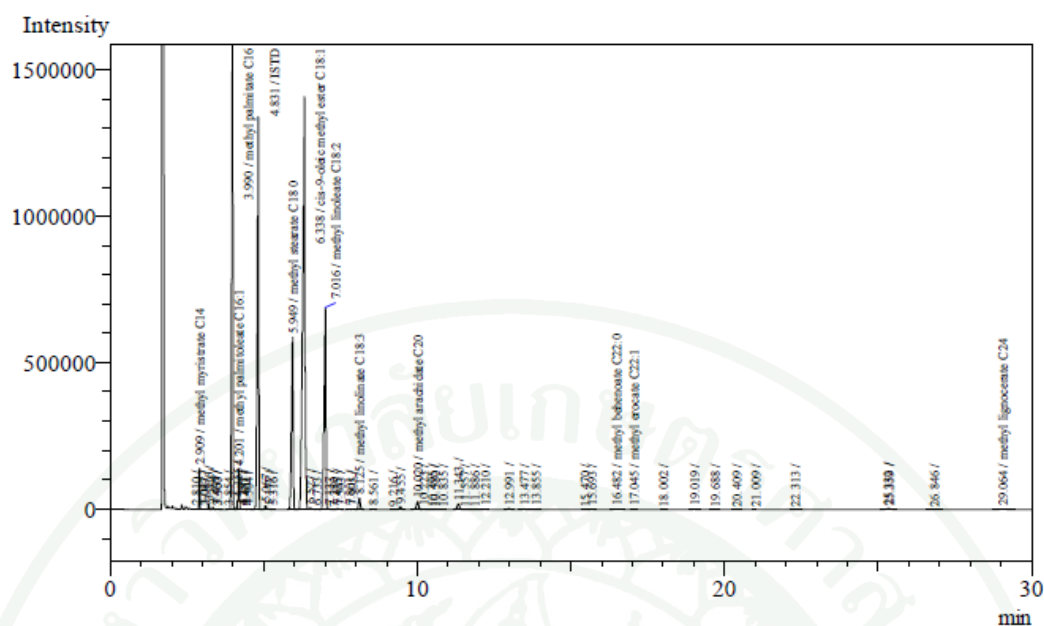
ภาพผนวกที่ 8 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.3% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที



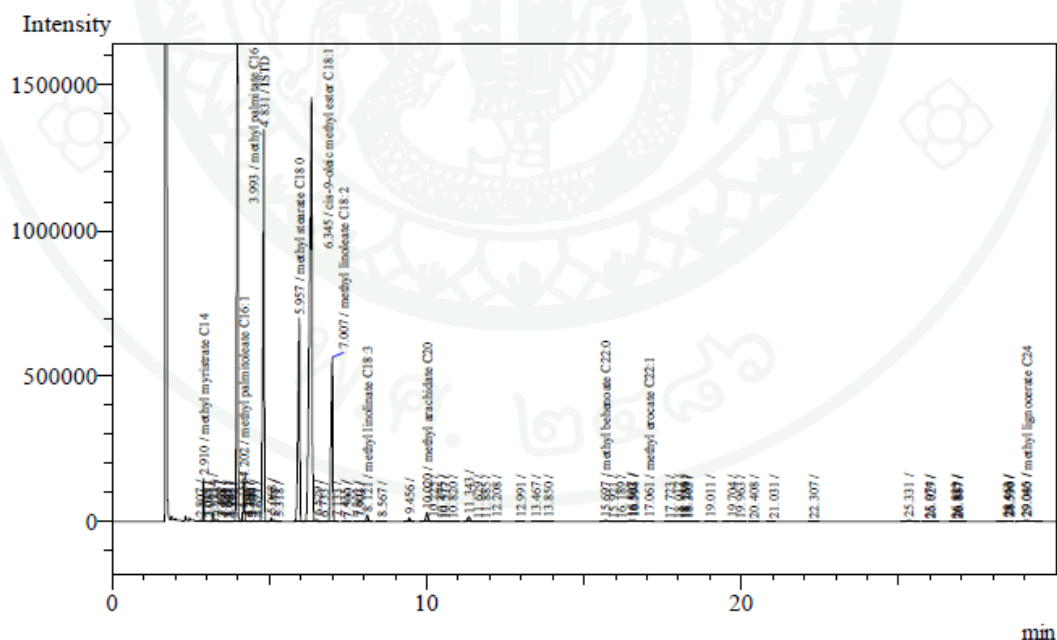
ภาพผนวกที่ 9 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.3% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที



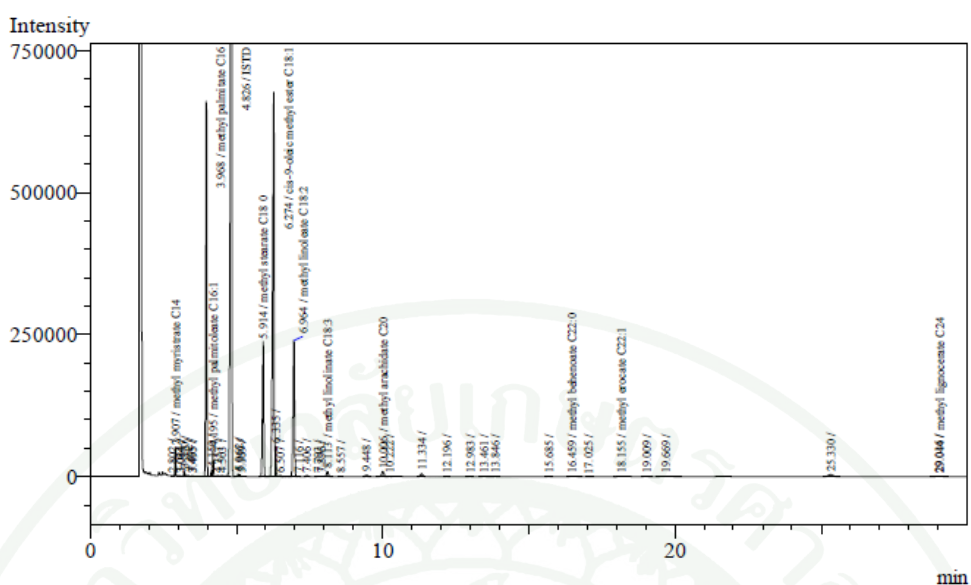
ภาพผนวกที่ 10 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที



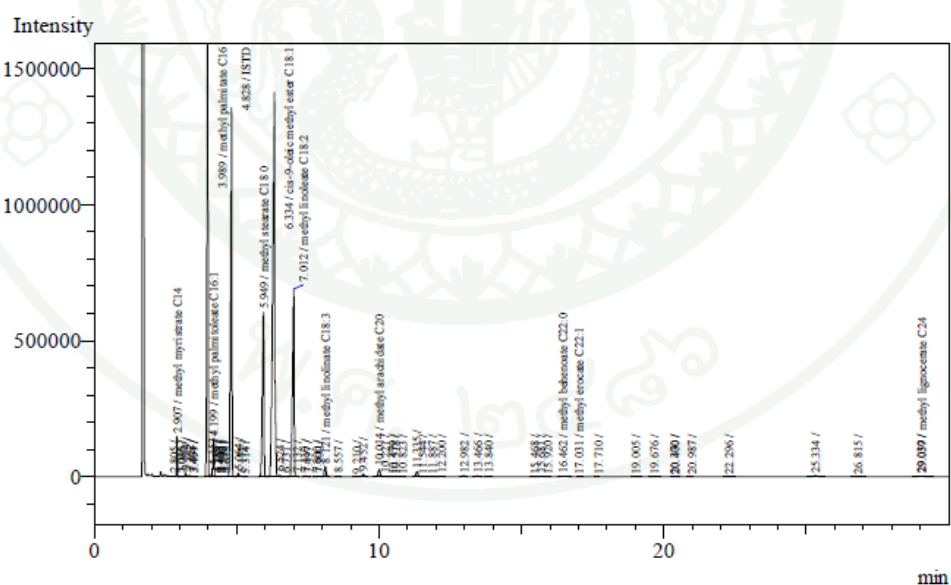
ภาพผนวกที่ 11 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที



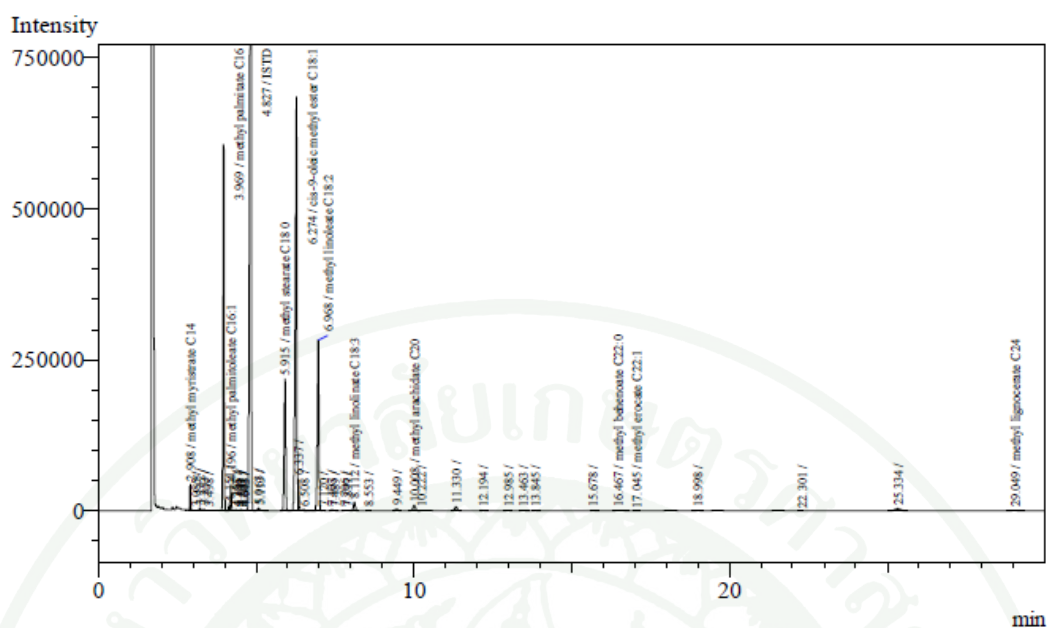
ภาพผนวกที่ 12 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที



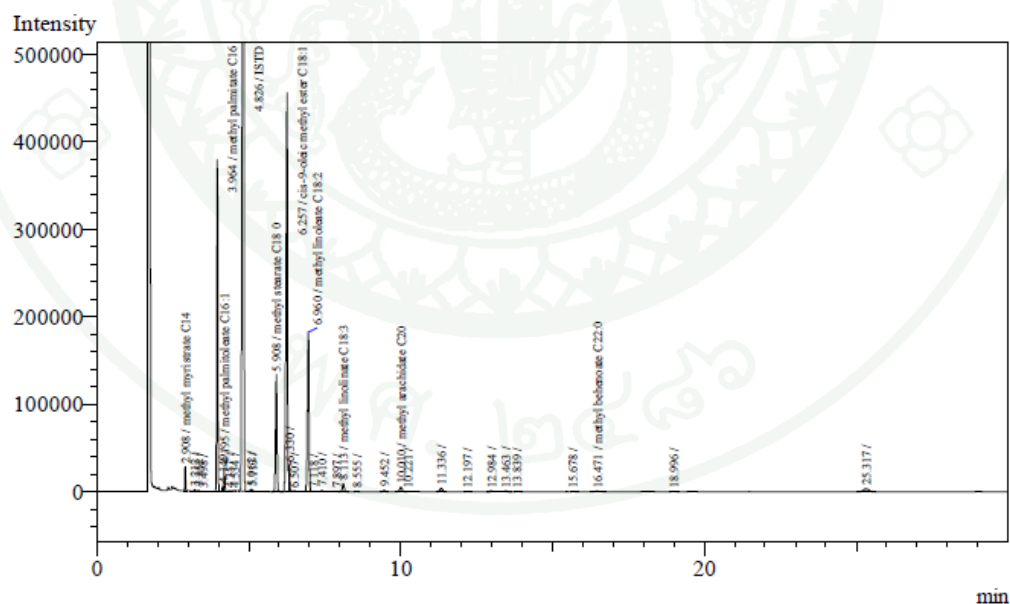
ภาพผนวกที่ 13 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที



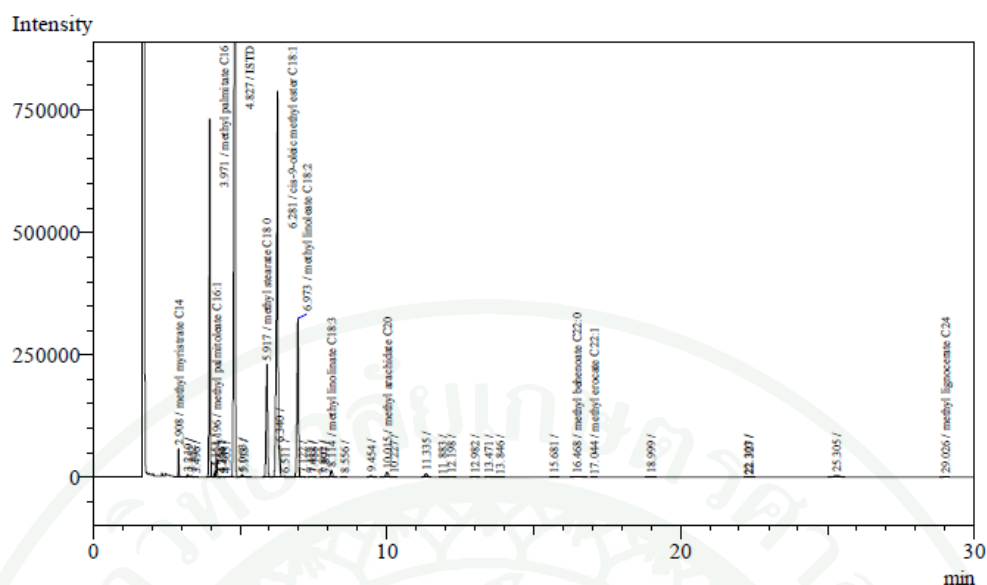
ภาพผนวกที่ 14 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที



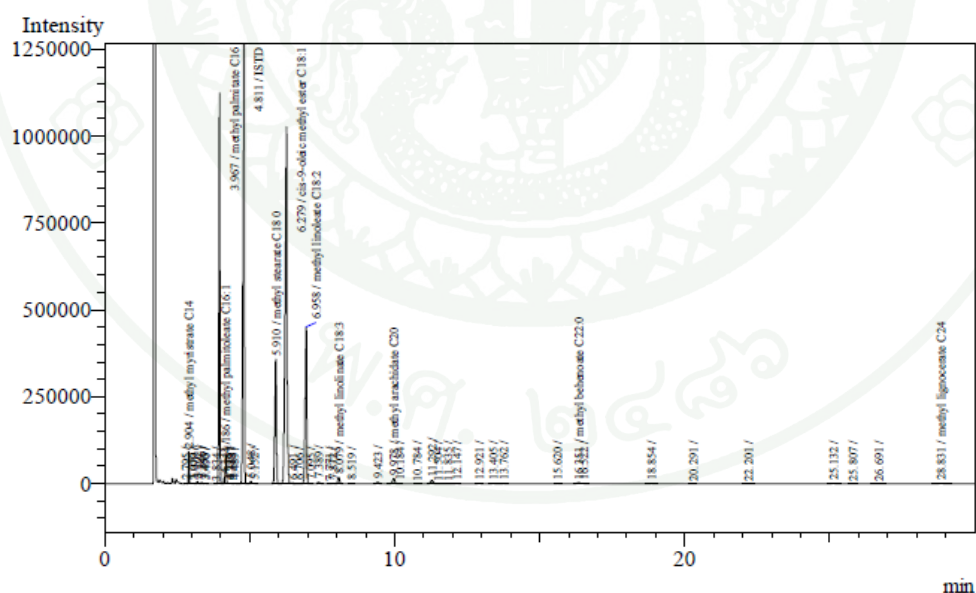
ภาพผนวกที่ 15 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที



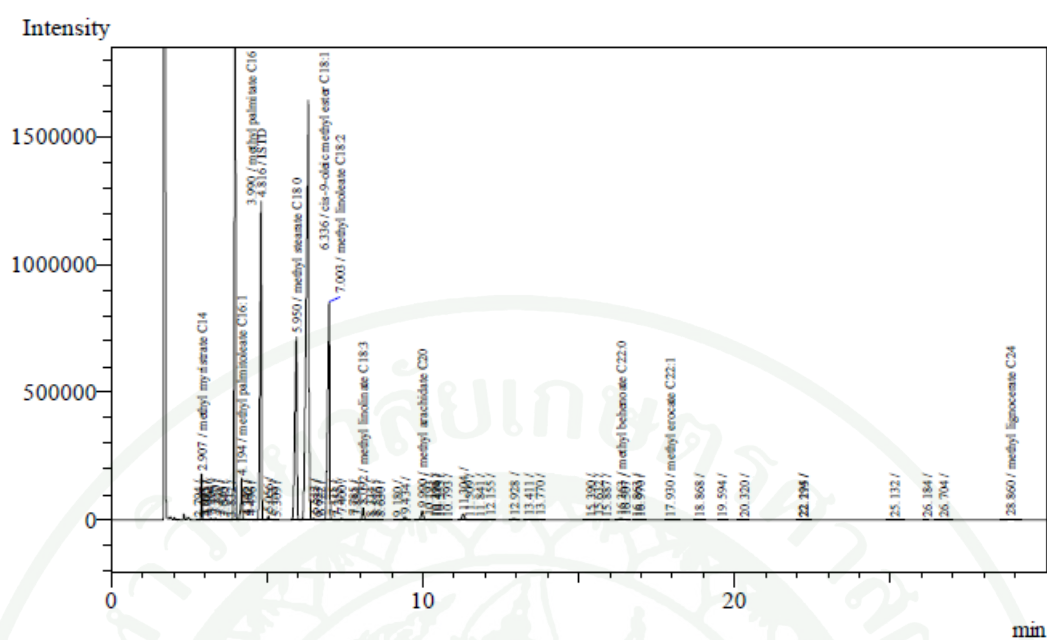
ภาพผนวกที่ 16 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที



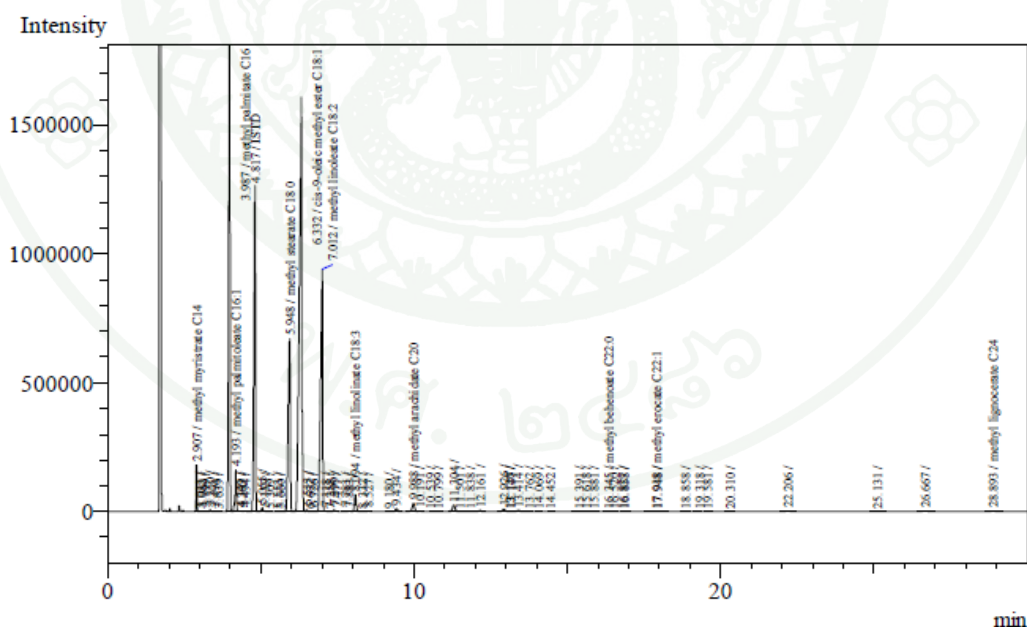
ภาพผนวกที่ 17 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที



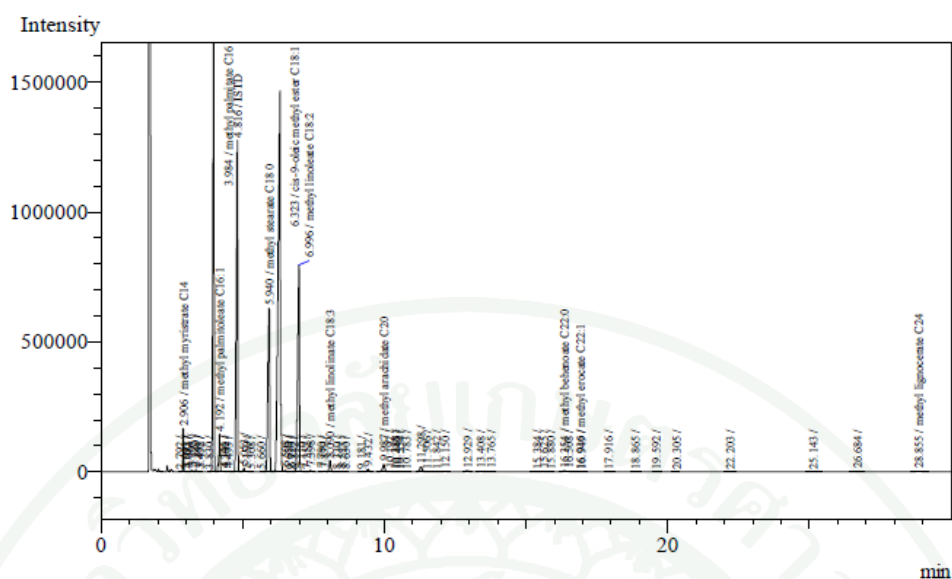
ภาพผนวกที่ 18 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที



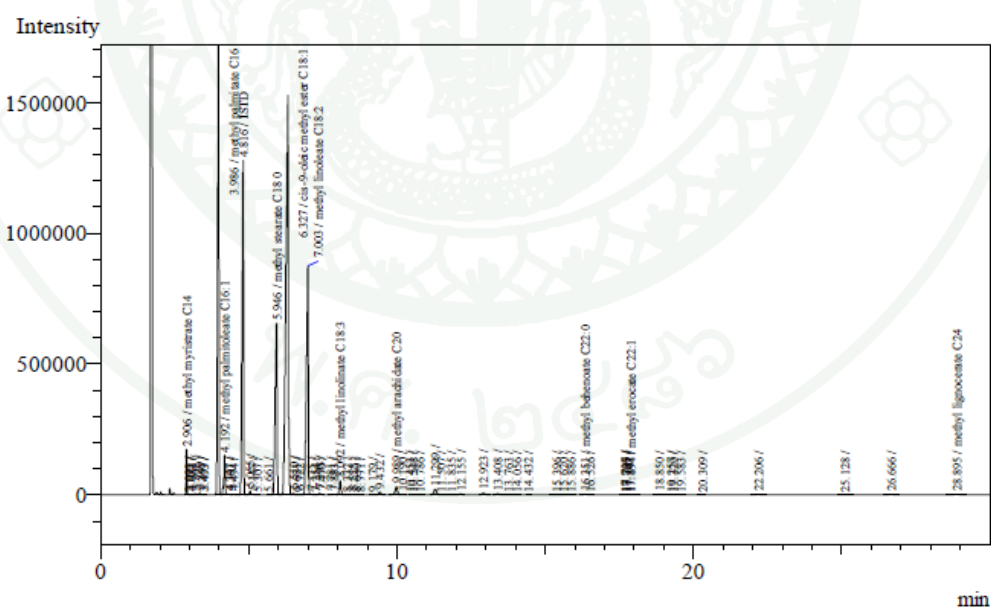
ภาพผนวกที่ 19 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที



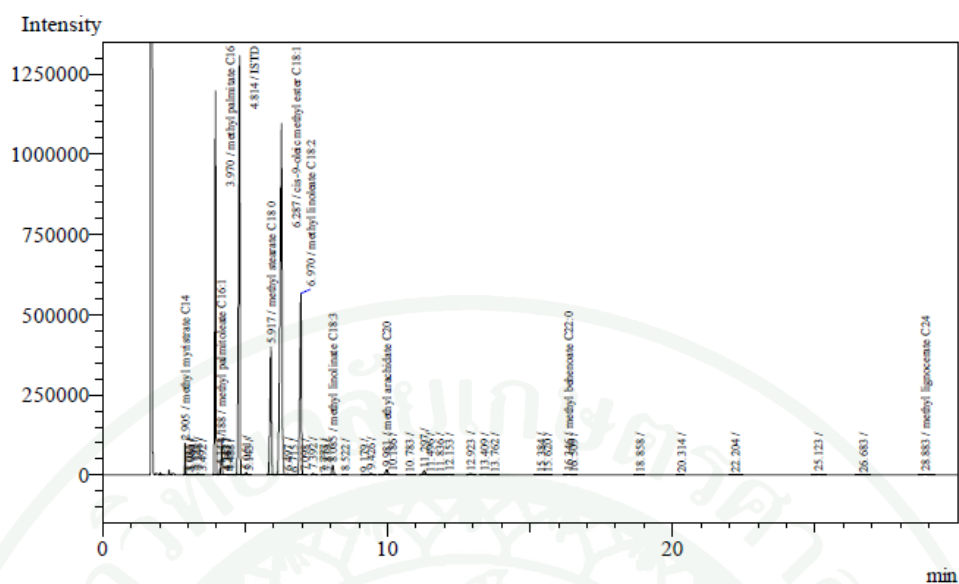
ภาพผนวกที่ 20 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.3% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที



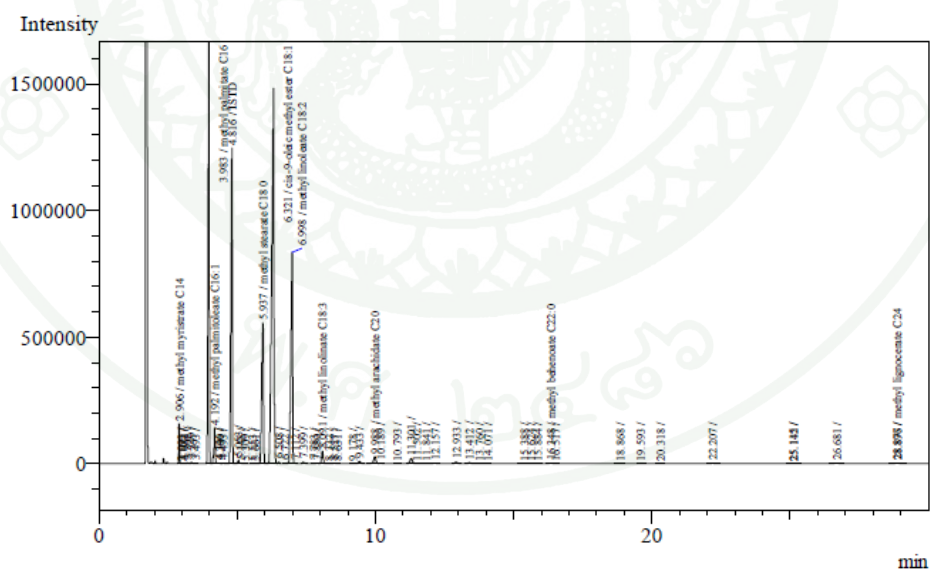
ภาพผนวกที่ 21 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที



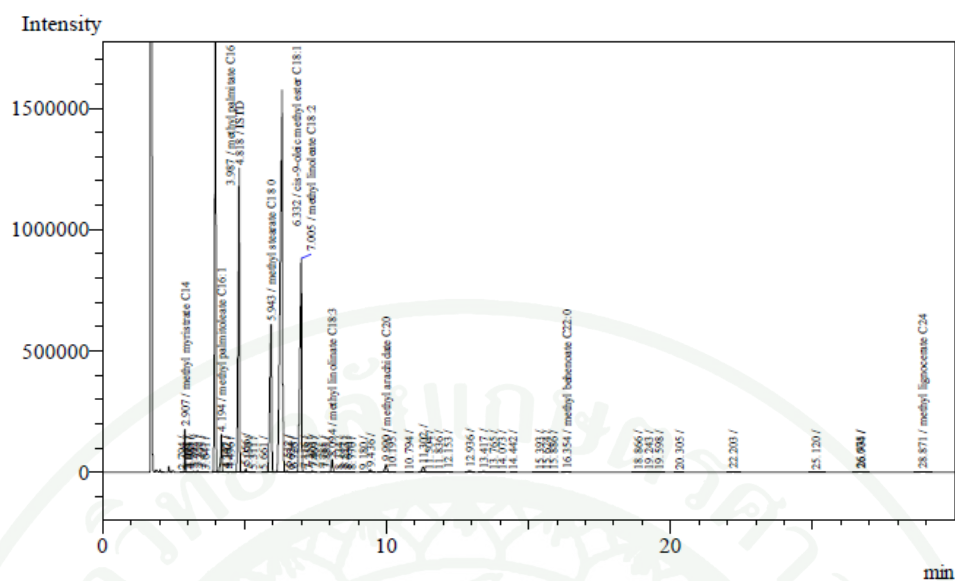
ภาพผนวกที่ 22 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที



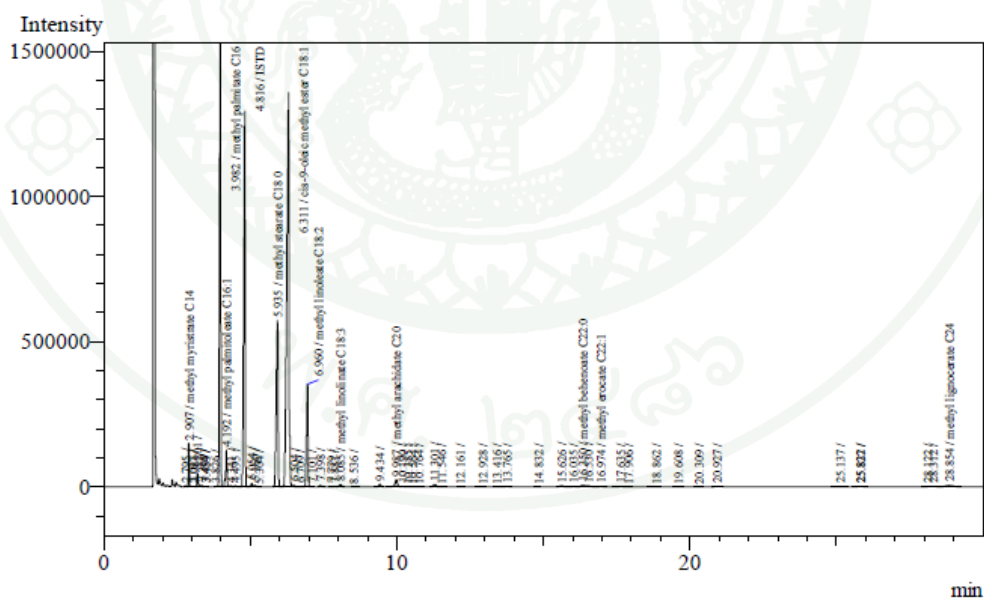
ภาพผนวกที่ 25 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที



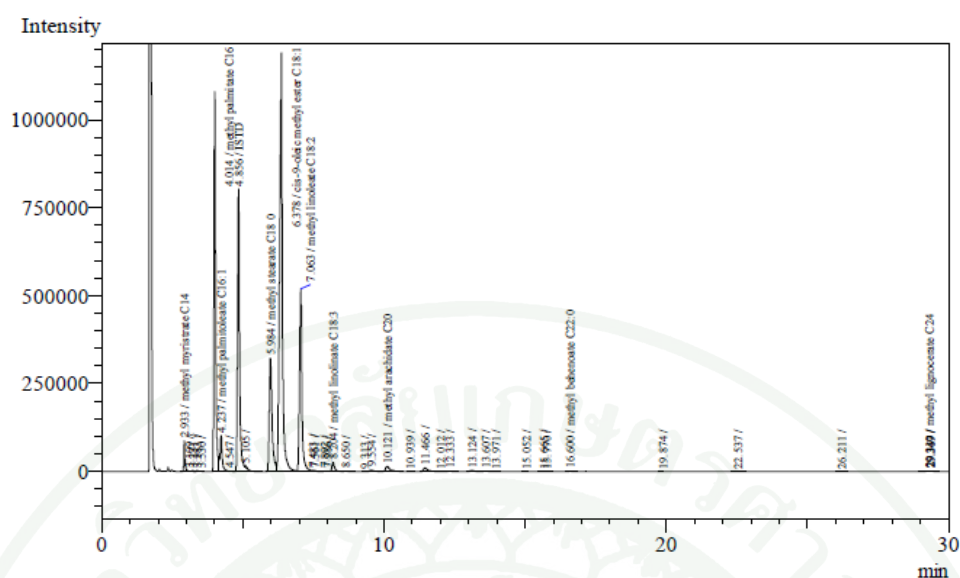
ภาพผนวกที่ 26 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที



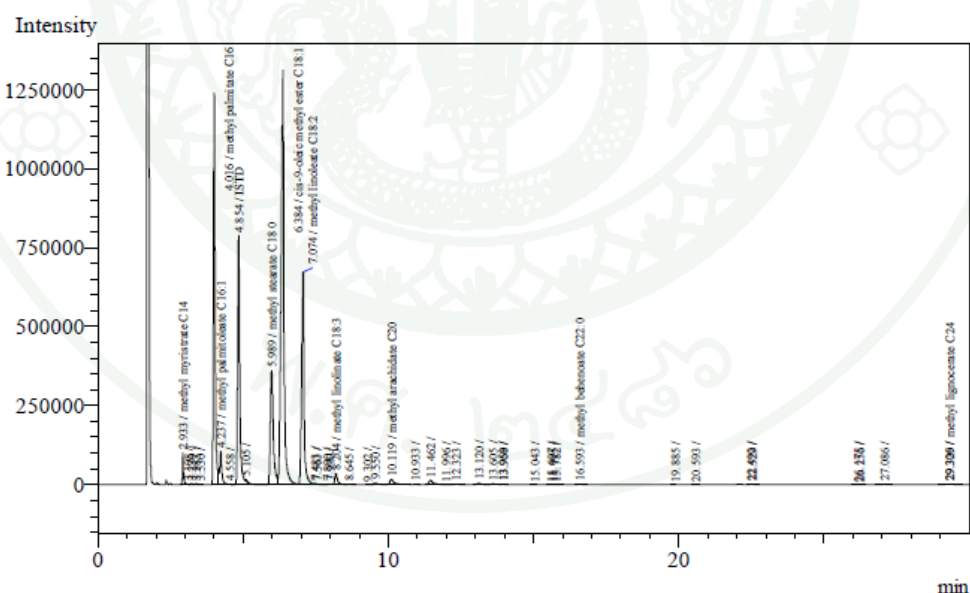
ภาพผนวกที่ 27 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที



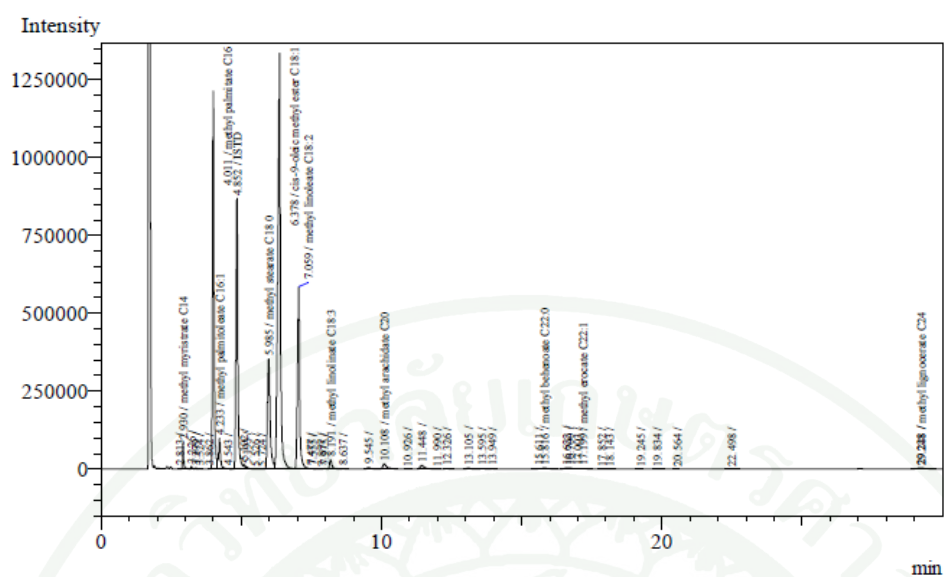
ภาพผนวกที่ 28 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.3% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที



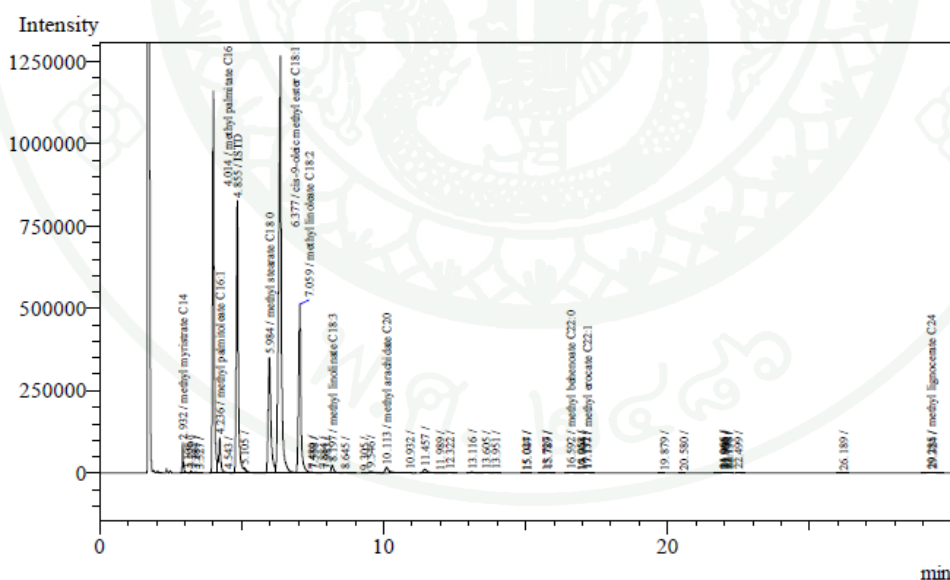
ภาพผนวกที่ 29 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที



ภาพผนวกที่ 30 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที



ภาพผนวกที่ 31 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที



ภาพผนวกที่ 32 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9 ต่อ 1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นายอภิชาติ เข้มทรัพย์
วัน เดือน ปีที่เกิด	12 มกราคม 2528
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลลำปาง จังหวัดลำปาง
ประวัติการศึกษา	ระดับอุดมศึกษา วศ.บ. (วิศวกรรมศาสตร์) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ (พ.ศ. 2550)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนจากโครงการบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี (ADB) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์