



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครทิวแนล

Biodiesel Production from Waste Cooking Oil in a Microtube Reactor

นามผู้วิจัย นายยุทธพงษ์ ธนวรรณพงศ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถศักดิ์ จารีย์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์อภิญญา ดวงจันทร์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อภิญญา ดวงจันทร์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา นีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครทิวแนล

Biodiesel Production from Waste Cooking Oil in a Microtube Reactor

โดย

นายยุทธพงษ์ ธนวรรณพงศ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ยุทธพงษ์ ธนวรรณพงศ์ 2555: การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้เครื่อง
ปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขา
วิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถศักดิ์ จารีย์, Ph.D. 115 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการนำน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้วมาผลิตเป็นไบโอดีเซลด้วยกระบวนการ
แบบ 2 ขั้นตอนโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล (เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.508
มิลลิเมตร) ในขั้นตอนแรกเป็นปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดเพื่อลดค่า
ความเป็นกรดของน้ำมันพืชจาก 3.96 จมมีค่าต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม
น้ำมัน ตัวแปรที่ศึกษาคืออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน (4.5:1-18:1) ความเข้มข้น
ของกรดซัลฟูริก (0.5-2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน) อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (55-70 องศา
เซลเซียส) และเวลาในการทำปฏิกิริยา (5-20 วินาที) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคืออัตราส่วนโดยโมล
ระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 1 เปอร์เซ็นต์โดย
น้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส ใน
ขั้นตอนที่สองไตรกลีเซอไรด์ซึ่งอยู่ในน้ำมันที่ได้จากขั้นตอนแรกถูกทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิ-
เคชันด้วยเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ตัว
แปรที่ศึกษาคืออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนแรก (4.5:1-12:1)
ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (0.5-2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน) อุณหภูมิใน
การทำปฏิกิริยา (50-70 องศาเซลเซียส) และเวลาในการทำปฏิกิริยา (5-20 วินาที) พบว่าสภาวะที่
เหมาะสมคืออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันจากขั้นตอนแรกที่ 6:1 ความเข้มข้น
ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที
และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่มีค่าเปอร์เซ็นต์เมทิล-
เอสเทอร์ 97.19 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ผ่านตามมาตรฐาน
ของกรมธุรกิจพลังงาน

Yuttapong Tanawannapong 2012: Biodiesel Production from Waste Cooking Oil in a Microtube Reactor. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Attasak Jaree, Ph.D. 115 pages.

Waste cooking oil (WCO) was used as a feedstock to produce biodiesel by a two-step process in a microtube reactor (0.508 mm ID). In the first step, the acid value of the WCO was reduced from 3.96 mg KOH/g to less than 1 mg KOH/g via acid catalyzed esterification. The effects of the methanol-to-WCO molar ratio (4.5:1–18:1), the H_2SO_4 concentration (0.5–2 wt.%), reaction temperature (55–70°C) and reaction time (5–20 seconds) were studied. Results indicated that the optimum conditions were 9:1 methanol-to-WCO molar ratio, 1 wt.% H_2SO_4 , reaction temperature of 65°C and 5 seconds of reaction time. In the second step, triglycerides in the product from the first step were transesterified with methanol and alkaline catalyst to produce methyl esters and glycerol. The effect of the methanol-to-WCO molar ratio (4.5:1–12:1), the KOH concentration (0.5–2.5 wt.%), reaction temperature (50–70°C) and reaction time (5–20 seconds) were studied. Methyl ester content of 97.19% was obtained after the transesterification reaction in the second step under the optimal operating conditions : molar ratio of methanol-to-WCO of 6:1, KOH concentration 1.5 wt.%, reaction temperature of 60°C and the reaction time of 5 seconds. Finally, it was found that the properties of biodiesel produced by our two step process in a microtube reactor were compatible with ranges according to the department of energy (Thailand) standards for commerce biodiesel.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.อรรถศักดิ์ จารีย์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อภิญา ดวงจันทร์ กรรมการที่ปรึกษาสาขาวิชาเอก ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ปริญญ์ คงพรม ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก และ ดร.ธงไทย วิฑูรย์ประธานการสอบ ที่ได้สละเวลา เพื่อเป็นกรรมการในการสอบพร้อมทั้งให้คำแนะนำต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง ที่สนับสนุนทุนการศึกษาและโครงการเชิญไปโอดิสเซิลที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เมทิล-เอสเทอร์

ขอขอบคุณ คุณสิริลักษณ์ พึ่งชัยชาญ และ คุณอภิชาติ แยมทรัพย์ ที่คอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล

ขอขอบคุณ คุณรัชฎาภรณ์ แก้วพิลึก และ คุณสุวิมล ภูระหงษ์ สำหรับกำลังใจ คำแนะนำ และความช่วยเหลือที่มอบให้เสมอมา

ขอขอบคุณ คุณวาทัญญู ศิริไพโรจน์ สำหรับคำปรึกษาด้านภาษาอังกฤษและคำแนะนำต่างๆ

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัว ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

ยุทธพงษ์ ธนวรรณพงศ์

มิถุนายน 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(15)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	39
อุปกรณ์	39
วิธีการ	42
ผลและวิจารณ์	47
สรุปและข้อเสนอแนะ	71
สรุป	71
ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	73
ภาคผนวก	79
ภาคผนวก ก การคำนวณค่าต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย	80
ภาคผนวก ข โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	93
ภาคผนวก ค ค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้วหลังจากทำปฏิกิริยา เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล	111
ภาคผนวก ง ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่ได้จากเครื่อง ปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล	113
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	115

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันทั่วไป	9
2	คุณสมบัติโดยทั่วไปของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล	16
3	รายละเอียดข้อกำหนดทางคุณภาพของไบโอดีเซลตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน	19
4	เปรียบเทียบความแตกต่างของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	31
5	ปริมาณและชนิดของกรดไขมันของน้ำมันพืชใช้แล้ว	48
6	คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชใช้แล้ว	49
7	ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลและเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	58
8	ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลและเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	68
9	คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานไบโอดีเซล	69
ตารางผนวกที่		
ก1	ปริมาณและชนิดของกรดไขมันของน้ำมันพืชใช้แล้ว	81
ก2	ปริมาณและชนิดของกรดไขมันของน้ำมันพืชใช้แล้วหลังจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	83
ก3	ตัวอย่างค่าจากโครมาโทแกรมของตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์	89
ค1	ค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้วหลังจากทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล	112
ง1	ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล	114

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์	7
2	โครงสร้างโมเลกุลของไดกลีเซอไรด์และโมนอกลิเซอไรด์	8
3	ปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกระบวนการทอดอาหาร	12
4	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันกับแอลกอฮอล์	23
5	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์	24
6	กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	26
7	ปฏิกิริยาสaponification ของกรดไขมันอิสระ	27
8	กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	28
9	ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดไขมันอิสระกับแอลกอฮอล์	28
10	ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์	32
11	a) ตัวช่วยในการผสมชนิด T b) ตัวช่วยในการผสมชนิด Y	35
12	ตัวช่วยการผสมแบบ multilamination ชนิดการไหลสวนทาง	35
13	ตัวช่วยการผสมแบบไฮโดรไดนามิกส์	36
14	แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล	42
15	แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	45
16	ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วในขั้นตอนที่ 1 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	51
17	ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในขั้นตอนที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
18	ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์และความดันที่เกิดขึ้นภายในระบบ เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	54
19	ขนาดของหยดวิฎภาคหลังจากออกจากตัวช่วยการผสมแบบที (T mixer) ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ในขั้นตอนที่ 1 : a) 5 วินาที, b) 10 วินาที, c) 15 วินาที, d) 20 วินาที โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	55
20	ขนาดของหยดวิฎภาคหลังจากออกจากเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ในขั้นตอนที่ 1 : a) 5 วินาที, b) 10 วินาที, c) 15 วินาที, d) 20 วินาที โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	56
21	ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอน ที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 วินาที	57
22	ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซล เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซล เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	62
24	ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลและความดันที่เกิดขึ้นภายในระบบ เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	63
25	ขนาดของหยดวิภาคหลังจากออกจากตัวช่วยการผสมแบบที (T mixer) ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ในขั้นตอนที่ 2 : a) 5 วินาที, b) 10 วินาที, c) 15 วินาที, d) 20 วินาที โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	65
26	ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซล เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 วินาที	66
ภาพผนวกที่		
ก1	โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์	81
ก2	ตัวอย่างโครมาโทแกรมของตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

- ข1 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเครื่อง
ปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลที่สภาวะอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทาน
อลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 1
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและ
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส 94
- ข2 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเครื่อง
ปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลที่สภาวะอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทาน
อลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 1 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนักของน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิใน
การทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส 94
- ข3 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
แบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะใน
ขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว
เท่ากับ 4.5:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการ
ทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส 95
- ข4 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
แบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะใน
ขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว
เท่ากับ 4.5:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการ
ทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส 95

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

- ข5 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส 96
- ข6 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส 96
- ข7 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส 97
- ข8 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส 97

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

ข9	โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 12:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	98
ข10	โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 12:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	98
ข11	โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	99
ข12	โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	99

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ข13	โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	100
ข14	โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	100
ข15	โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	101
ข16	โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	101

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข17 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	102
ข18 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	102
ข19 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส	103
ข20 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส	103

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข21 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	104
ข22 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	104
ข23 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	105
ข24 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	105

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข25 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	106
ข26 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส	106
ข27 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส	107
ข28 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส	107

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

ข29	โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส	108
ข30	โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส	108
ข31	โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส	109
ข32	โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส	109

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

- ข33 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส

110

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AV	= Acid Value
FAME	= Fatty Acid Methyl Ester
EN	= European Standard
ASTM	= American Society for Testing and Materials
°C	= Degree Celsius
GC / MS	= Gas Chromatography-Mass Spectrometry
GC / FID	= Gas Chromatography-Flame Ionization Detector
H ₂ SO ₄	= Sulfuric Acid
HCl	= Hydrochloric Acid
KOH	= Potassium Hydroxide
NaOH	= Sodium Hydroxide
wt %	= Percentage by Weight

การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครทิวบ์

Biodiesel Production from Waste Cooking Oil in a Microtube Reactor

คำนำ

จากปริมาณการใช้น้ำมันปิโตรเลียมที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในทุกวัน ซึ่งสวนทางกับปริมาณน้ำมันปิโตรเลียมจากแหล่งขุดเจาะที่ลดลง จึงทำให้ราคาน้ำมันมีการปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งประเทศไทยมีแหล่งน้ำมันปิโตรเลียมที่สามารถขุดเจาะได้จากธรรมชาติในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับความต้องการภายในประเทศ ทำให้ต้องพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันปิโตรเลียมจากต่างประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันในกลุ่มดีเซลซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในด้านการขนส่ง ประเทศไทยมีความต้องการใช้น้ำมันดีเซลโดยเฉลี่ยประมาณ 20,000 ล้านลิตรในแต่ละปี คิดเป็นร้อยละ 47 ของน้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมที่ใช้ทั้งหมด และมีปริมาณเป็น 2 เท่าของการใช้น้ำมันเบนซิน ทั้งหมดนี้คิดเป็นมูลค่าการนำเข้าน้ำมันดิบและสำเร็จรูปกว่า 1.3 ล้านล้านบาทต่อปี (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2554) ในปัจจุบันจึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่ให้ความสนใจในเรื่องพลังงานทางเลือก (Alternative energy) เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานไฮโดรเจนและพลังงานจากไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล คือ น้ำมันเชื้อเพลิงที่ผลิตมาจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ผ่านกระบวนการที่ทำให้อยู่ในรูปของอัลคิลเอสเทอร์ (Alkyl Ester) (Zheng *et al.*, 2006) มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมาก สามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้โดยตรงและได้รับการยอมรับว่ามีคุณภาพที่เท่าเทียมกัน (Hayyan *et al.*, 2011) ทำให้สามารถใช้ไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ นอกจากนี้ไขมันพืชหรือไขมันสัตว์สามารถเป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตเป็นไบโอดีเซลได้แล้ว ยังมีวัตถุดิบเหลือทิ้ง อาทิ แอชคอกอยล์และน้ำมันพืชใช้แล้ว (Nakpong *et al.*, 2010) ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลได้เช่นกัน จากข้อมูลของมูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อมระบุว่าประเทศไทยมีน้ำมันพืชเหลือทิ้งทั้งหมดปีละ 74.5 ล้านลิตร และกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ มาจากครัวเรือน นั่นคือจะมีน้ำมันพืชที่ถูกทิ้งสำหรับภาคครัวเรือนปีละ 45 ล้านลิตร ซึ่งถ้าหากสามารถนำน้ำมันพืชใช้แล้วเหล่านี้มาผลิตเป็นไบโอดีเซลได้จะสามารถช่วยบรรเทาปัญหาสิ่งแวดล้อมและเป็นวัตถุดิบสำหรับพลังงานทดแทนได้เป็นอย่างมาก

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ผลิตไบโอดีเซล โดยเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันกับแอลกอฮอล์ ผลผลิตที่เกิดขึ้นคือไบโอดีเซลและกลีเซอรอล โดยสามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทั้งแบบกรดและด่าง ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดมีข้อดีคือสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) กับกรดไขมันอิสระในน้ำมันให้เป็นเอสเทอร์ได้ แต่ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันคือน้ำ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดลดลงอย่างมาก ทำให้เอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันลดลง (Kusdiana and Saka, 2004) ส่วนตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เร็ว แต่มีข้อจำกัดคือถ้าในระบบมีน้ำหรือกรดไขมันอิสระในน้ำมันปริมาณมาก จะทำให้เกิดสบู่ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการและยังลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลง น้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงจึงต้องผ่านกรรมวิธีการลดกรดไขมันอิสระเสียก่อน ทั้งนี้ควรมีปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันอยู่ไม่เกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์ (Zhang *et al.*, 2003) ดังนั้นการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วจึงต้องใช้กระบวนการแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระกับเมทานอลเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระ และขั้นตอนที่สองเป็นการนำผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนแรกมาทำปฏิกิริยากับเมทานอล โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์ การผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีดังกล่าวจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต โดยจะเพิ่มปริมาณไบโอดีเซลและลดเวลาในการผลิตให้น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดในขั้นตอนเดียว กระบวนการผลิตส่วนใหญ่จะผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ซึ่งมีข้อเสียคือการใช้เวลาในการผลิตนานหลายชั่วโมง ด้วยเหตุนี้จึงมีการค้นคว้าวิจัยเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีการใช้ระยะเวลาสั้นลง โดยผลิตในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลที่มีลักษณะเป็นท่อขนาดเล็ก ซึ่งมีการถ่ายเทมวลและความร้อนได้ดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Sun *et al.*, 2010) อีกทั้งยังมีข้อดีคือใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยและยังสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้โดยการเพิ่มจำนวนของไมโครชาแนล

อย่างไรก็ตามการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่ จึงมีข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัยในปริมาณที่ไม่มากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำเอาวัตถุดิบเหลือทิ้งอย่างเช่นน้ำมันพืชใช้แล้วมาผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ยังมีข้อมูลไม่เพียงพอต่อการพัฒนานำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้กระบวนการแบบ

สองขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ซึ่งจะทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อนำผลจากงานวิจัยไปพัฒนาในระดับอุตสาหกรรมต่อไป



วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน อาทิ อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน อาทิ อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา
3. ศึกษาเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลและเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ
4. ทดสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์) ที่ผลิตได้จากสภาวะที่เหมาะสม

ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน (ขั้นตอนแรกใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนขั้นตอนที่สองใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) ได้แก่

ขั้นตอนแรก:

อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 4.5:1 ถึง 18:1
 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.5 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน
 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 55 ถึง 70 องศาเซลเซียส
 เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ถึง 20 วินาที

ขั้นตอนที่สอง:

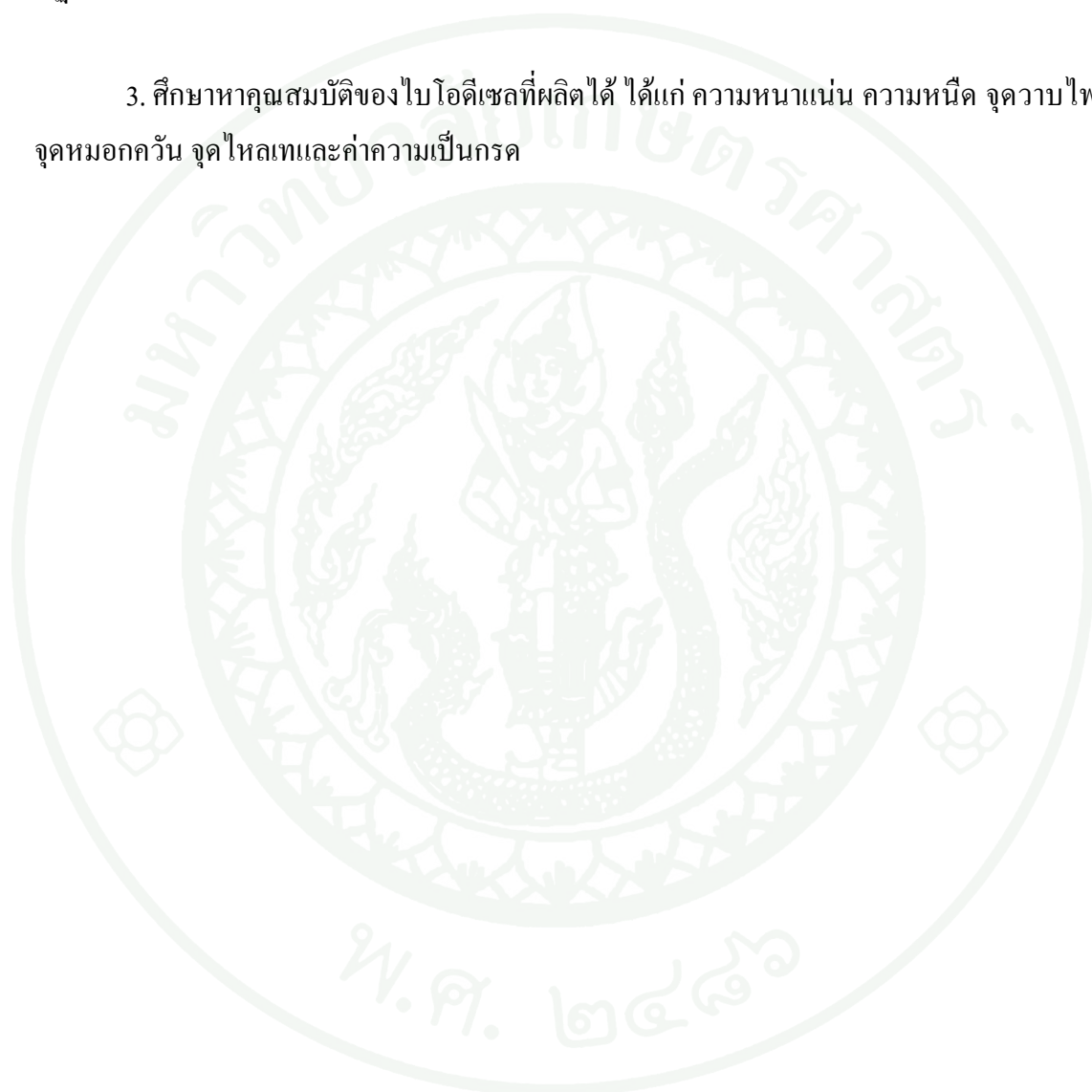
อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนแรก 4.5:1 ถึง 12:1
 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 ถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 ถึง 70 องศาเซลเซียส

เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ถึง 20 วินาที

2. ศึกษาเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลและเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ เช่น ประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซล

3. ศึกษาหาคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ได้แก่ ความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ จุดหมอกควัน จุดไหลเทและค่าความเป็นกรด



การตรวจเอกสาร

จากแนวพระราชดำริในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวเมื่อ 20 ปีที่แล้ว ที่ได้ทรงเล็งเห็นว่า ประเทศไทยจะประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำมันในอนาคต จึงได้ทรงดำริให้โครงการส่วนพระองค์สวนจิตรลดา ร่วมดำเนินการวิจัยกับหน่วยงานต่างๆ เช่น สถาบันการศึกษา หน่วยงานของรัฐและเอกชน โดยทรงมีพระราชดำรินำพืชผลทางการเกษตรมาเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นพลังงานทดแทน เพื่อให้คนไทยพึ่งตนเองได้ในด้านพลังงาน รวมทั้งรองรับปัญหาการขาดแคลนพืชผลทางการเกษตรที่อาจเกิดขึ้นด้วย โครงการไบโอดีเซลในประเทศไทยเริ่มขึ้นในปีพุทธศักราช 2528 โดยทรงมีพระราชดำริให้สร้างโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มขนาดเล็กขึ้นที่สหกรณ์นิคมอ่าวลึกจังหวัดกระบี่และโปรดเกล้าให้สร้างโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ขนาดเล็ก กำลังผลิตวันละ 110 ลิตร ที่ศูนย์ศึกษาการพัฒนาพิกุลทอง อันเนื่องมาจากพระราชดำริที่จังหวัดนราธิวาส ต่อมาในปีพุทธศักราช 2543 ทรงมีกระแสรับสั่งให้ทดลองนำน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ผลิตนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้กับรถยนต์ของกองงานส่วนพระองค์ที่วังไกลกังวล พบว่าไม่มีผลเสียกับเครื่องยนต์และสามารถใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ต้องผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ปัจจุบันพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวได้ทรงจดสิทธิบัตรการใช้ น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ผสมกับน้ำมันดีเซล เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลกับกรมทรัพย์สินทางปัญญาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว (จุฬาเกษตร, 2551)

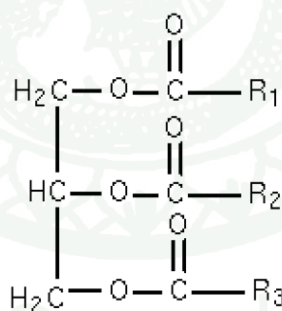
ต่อมากระทรวงพลังงานได้กำหนดเป้าหมายการใช้ไบโอดีเซลร้อยละ 3 ของการใช้ น้ำมันดีเซลในปีพุทธศักราช 2554 หรือประมาณวันละ 2.4 ล้านลิตร รวมถึงการกำหนดแผนการผลิตวัตถุดิบให้เพียงพอต่อการนำมาผลิตไบโอดีเซล โดยแบ่งกลุ่มเป้าหมายออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ผสมร้อยละ 2 ในน้ำมันดีเซล (วันละ 1.6 ล้านลิตร) และอีกร้อยละ 1 (วันละ 0.8 ล้านลิตร) ใช้ผสมในสัดส่วนอื่นๆ เพื่อใช้ในวัตถุประสงค์เฉพาะ เช่น การผลิตเพื่อใช้ในเครื่องจักรกลสำหรับไบโอดีเซลชุมชนและได้กำหนดแผนการพัฒนาและส่งเสริมไบโอดีเซลแบ่งเป็น 2 ระยะ คือ ระยะที่ 1 บังคับใช้เฉพาะพื้นที่เป้าหมายภายในปีพุทธศักราช 2549 ถึง 2553 และระยะที่ 2 บังคับใช้ทั่วประเทศตั้งแต่ปี 2553 เป็นต้นไป

น้ำมันและองค์ประกอบของน้ำมัน

ไขมันและน้ำมันเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ ไขมันและน้ำมันที่พบในสัตว์และพืชประกอบด้วย ไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) 90-98 เปอร์เซ็นต์ กรดไขมันอิสระ (Free fatty acids) 1-5 เปอร์เซ็นต์ มีไดกลีเซอไรด์ (Diglycerides) และโมโนกลีเซอไรด์ (Monoglycerides) อยู่เพียงเล็กน้อย (Srivastava and Prasad, 2000)

1. ไตรกลีเซอไรด์

องค์ประกอบหลักในน้ำมันคือไตรกลีเซอไรด์ ส่วนใหญ่จะพบในรูปเอซิลกลีเซอรอล (Acylglycerol) ซึ่งเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน 3 โมเลกุลและกลีเซอรอล 1 โมเลกุล โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์แสดงได้ดังภาพที่ 1 กรดไขมันซึ่งเป็นองค์ประกอบจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated Fatty Acid) และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty Acid) กรดไขมันในน้ำมันพืชที่พบส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันประเภทไม่อิ่มตัว ทำให้ที่อุณหภูมิห้องมีสถานะเป็นของเหลว ซึ่งต่างจากไขมันจากสัตว์ที่ประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวสูงและมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง (Fangrui and Milford, 1999)



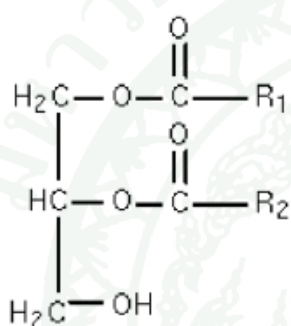
ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์

ที่มา: Laurila and Bohlen (2007)

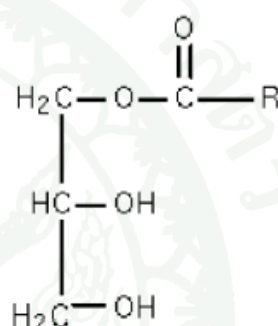
จากภาพที่ 1 หมู่ R_1 , R_2 และ R_3 คือ กรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยน้ำมันแต่ละชนิดมีปริมาณสัดส่วนของกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวแตกต่างกัน (Agarwal, 2007)

2. ไคกลีเซอไรด์และโมนอกลิเซอไรด์

ไคกลีเซอไรด์และโมนอกลิเซอไรด์เป็นเอสเทอร์ของกลีเซอรอลกับกรดไขมันเพียงสองและหนึ่งโมเลกุล ตามลำดับ และมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเหลืออยู่ ถ้าเป็นไคกลีเซอไรด์จะมีหมู่ไฮดรอกซิลเหลืออยู่ 1 หมู่ โครงสร้างโมเลกุลของไคกลีเซอไรด์แสดงดังภาพที่ 2 ถ้าเป็นโมนอกลิเซอไรด์ จะมีหมู่ไฮดรอกซิลเหลืออยู่ 2 หมู่ โครงสร้างโมเลกุลของโมนอกลิเซอไรด์แสดงดังภาพที่ 3 ไคกลีเซอไรด์ทั้งสองชนิดนี้ไม่ค่อยพบในธรรมชาติ แต่จะพบในไขมันที่เกิดการไฮโดรไลซิสที่ไม่สมบูรณ์



ไคกลีเซอไรด์



โมนอกลิเซอไรด์

ภาพที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของไคกลีเซอไรด์และโมนอกลิเซอไรด์

ที่มา: Laurila and Bohlen (2007)

3. กรดไขมัน

กรดไขมันเป็นกรดอินทรีย์ชนิดหนึ่ง โดยทั่วไปกรดไขมันจะมีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลเป็นเลขคู่เสมอ ซึ่งมีความยาวตั้งแต่ 12-24 โมเลกุล แต่ที่พบเป็นจำนวนมากจะมีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอม (C:16) และ 18 อะตอม (C:18) กรดไขมันปลายข้างหนึ่งเป็นหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) และปลายอีกข้างหนึ่งเป็นสายโซ่ยาวของไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่มีขั้ว ทำให้กรดไขมันไม่ละลายน้ำ (Agarwal, 2007) โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันทั่วไปแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันทั่วไป

Fatty acid	Systematic name	Structure	Formula
Lauric	Dodecanoic	12:0	$C_{12}H_{24}O_2$
Myristic	Tetradecanoic	14:0	$C_{14}H_{28}O_2$
Palmitic	Hexadecanoic	16:0	$C_{16}H_{32}O_2$
Stearic	Octadecanoic	18:0	$C_{18}H_{36}O_2$
Arachidic	Eicosanoic	20:0	$C_{20}H_{40}O_2$
Behenic	Docosanoic	22:0	$C_{22}H_{44}O_2$
Lignoceric	Tetracosanoic	24:0	$C_{24}H_{48}O_2$
Oleic	cis-9-Octadecenoic	18:1	$C_{18}H_{34}O_2$
Linoleic	cis-9,cis-12-Octadecadienoic	18:2	$C_{18}H_{32}O_2$
Linolenic	cis-9,cis-12,cis-15-Octadecatrienoic	18:3	$C_{18}H_{30}O_2$
Erucic	cis-13-Docosenoic	22:1	$C_{22}H_{42}O_2$

ที่มา: Srivastava and Prasad (2000)

น้ำมันพืชใช้แล้ว

ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลขึ้นอยู่กับราคาของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ที่ผ่านมานิยมใช้น้ำมันพืชใหม่ (Fresh Vegetable Oil) มาผลิตเป็นไบโอดีเซล โดยในแง่ร้อยละของผลได้ (Yield) นั้นค่อนข้างดี แต่ราคาของน้ำมันพืชก็ยังคงสูงอยู่ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลจึงมีการนำเอาน้ำมันพืชใช้แล้วมาเป็นวัตถุดิบซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความสนใจมากขึ้นเนื่องจากมีราคาถูกมากเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันพืชใหม่ นอกจากนี้ยังมีปริมาณมาก หาได้จากร้านอาหารหรือตามบ้านเรือนต่างๆ ทั้งยังช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการทิ้งน้ำมันพืชใช้แล้วลงในแหล่งน้ำอีกด้วย ที่ผ่านมามีเพียงการนำน้ำมันเหล่านี้ไปผสมกับอาหารสัตว์เท่านั้น ทำให้เหลือทิ้งอีกเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการนำน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้วมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลจะทำให้เกิดประโยชน์คุ้มค่าทั้งในแง่ของเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

1. นิยาม

น้ำมันพืชใช้แล้ว หมายถึงน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมอาหาร เป็นน้ำมันพืชรวมไม่แยกชนิดของน้ำมัน โดยส่วนใหญ่เป็นน้ำมันปาล์มและกระบวนการผลิตอาหารที่มีน้ำมันเหลือเป็นจำนวนมากคือการทอด (พุทธชาด และคณะ, 2546)

น้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้วแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ ถ้ามีปริมาณของกรดไขมันอิสระน้อยกว่าร้อยละ 15 จะเรียกว่า เหลดโล่กรีส (Yellow Grease) และถ้ามีปริมาณของกรดไขมันอิสระมากกว่าร้อยละ 15 จะเรียกว่า บราวน์กรีส (Brown Grease) สำหรับลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้วมีความแตกต่างกับน้ำมันที่ยังไม่ผ่านความร้อน ดังนั้นจึงต้องศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะเหล่านี้และวิธีการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซล (Supple *et al.*, 2002)

2. ลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำมันพืชใช้แล้ว

ในการทอดอาหาร น้ำมันเป็นตัวกลางที่นำความร้อนเข้าสู่อาหาร ในการทอดจะใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 177 ถึง 201 องศาเซลเซียส ในสถานะที่มีความชื้น (ศศิเกษม, 2530) ในขณะที่ทอดอาหารน้ำมันจะอยู่ในสถานะแวดล้อมที่แตกต่างกัน แบ่งได้เป็น 3 ช่วง ดังนี้ (Rosana *et al.*, 1999)

1. ช่วงเริ่มต้นของกระบวนการทอด (storage period) น้ำมันจะอยู่ในสถานะที่ใช้ทอดและสัมผัสกับอากาศที่อุณหภูมิห้อง ปฏิกริยาที่เกิดในช่วงเริ่มต้น ได้แก่ การเกิดออกซิเดชันอย่างช้า ๆ โดยออกซิเจนจากอากาศจะเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ของน้ำมัน ได้สารพวกไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide) ซึ่งไม่มีกลิ่น

2. ช่วงที่น้ำมันเริ่มได้รับความร้อน (standby period) เป็นช่วงที่น้ำมันสัมผัสกับอากาศและในช่วงที่อุณหภูมิค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนไปถึงช่วงทอดเสร็จจนกระทั่งน้ำมันเย็นตัวลง

3. ช่วงที่กำลังทอด (frying period) เป็นช่วงที่น้ำมันสัมผัสกับอากาศ ความชื้น ความร้อน และอาหารที่ทอด

ปฏิกิริยาที่เกิดในช่วงที่ 2 และ 3 จะคล้ายคลึงกัน ได้แก่ การเกิดออกซิเดชันโดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดได้เร็วขึ้น ทำให้พันธะคู่ในน้ำมันแตกออก ได้สารประกอบ

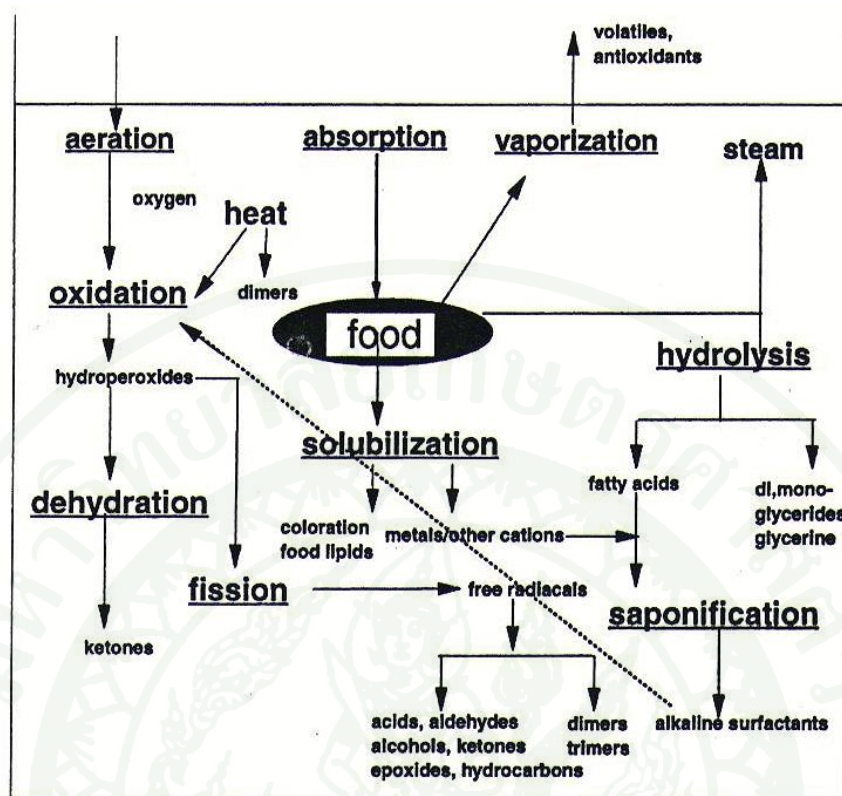
ใหม่ ปฏิกริยาอื่นที่เกิดขึ้นในทั้ง 2 ช่วงนี้ เช่น ไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) พอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ไพโรไลซิส (pyrolysis) และไฮโดรไลซิส (hydrolysis) นอกจากนี้เมื่อน้ำมันได้รับความร้อนสูงในช่วงอุณหภูมิ 177 ถึง 201 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลานาน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทั้งทางเคมีและกายภาพ ได้แก่ hydrolytic alteration, oxidative alteration และ thermal alteration

Hydrolytic alteration เกิดขึ้นขณะที่ทอดอาหาร อาหารจะถูกแช่อยู่ในน้ำมันและสัมผัสกับอากาศ น้ำมันจะทำปฏิกิริยากับความชื้นที่ระเหยมาจากอาหาร เกิดปฏิกิริยา hydrolytic ทำให้พันธะเอสเทอร์ (ester bond) ของกรดไขมันแตกออกเกิดกรดไขมันอิสระ โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และกลีเซอรอล

Oxidative alteration เกิดจากออกซิเจนในอากาศทำปฏิกิริยากับกรดไขมันไม่อิ่มตัว เป็นกระบวนการที่ทำลายคุณภาพและคุณค่าทางอาหารของน้ำมัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งจะให้สารพวก dimer polymer nonpolar dimer และ volatile compounds

Thermal alteration เกิดจากการที่น้ำมันได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง ๆ จะให้สารประกอบที่เป็นวง (cyclic monomer) ทำให้เกิด oxidative product เกิดเป็น dimer และ polymer

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการทอดอาหาร แสดงดังในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ปฏิกริยาต่าง ๆ ในกระบวนการทอดอาหาร

ที่มา: Rosana *et al.* (1999)

จากภาพที่ 3 น้ำมันจะเกิดปฏิกิริยาอย่างช้า ๆ ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการทอด และการเกิดออกซิเดชันจะเร็วขึ้นเมื่อน้ำมันเริ่มได้รับความร้อนและช่วงกำลังทอด เนื่องจากมีความร้อนเป็นตัวเร่งทำให้เกิดการสลายตัวของสารต่อเนื่องไปอย่างรวดเร็ว โดยที่ออกซิเจนในอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ของน้ำมัน เกิด oxidative alteration ได้สารพวกไฮโดรเปอร์ออกไซด์ซึ่งไม่มีกลิ่น และจะเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน (fission) ต่อไป ได้สารจำพวก แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์และไฮโดรคาร์บอน

การเกิด dehydration ของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ได้สารจำพวกคีโตนและส่วนที่เป็นอนุโมลอิสระจะเกิดปฏิกิริยาต่อให้สารจำพวก ไดเมอร์ พอลิเมอร์ ไตรเมอร์ เพอร์ออกไซด์ แอลกอฮอล์และไฮโดรคาร์บอน

นอกจากนี้ยังมีสารที่เกิดจากปฏิกิริยาไพโรไลซิสของไขมัน เช่น อะโครลีน (acrolein) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของกลีเซอรอล อะโครลีนเป็นสารที่ระเหยได้ทำให้ผู้อยู่ใกล้เคียงรู้สึกแสบตา ทำให้อาหารมีกลิ่นไม่น่ารับประทานและยังเป็นสารที่ไม่คงตัวสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้ง่าย เมื่อถูกแสงจะเกิดเป็นดิสอะคริล (disacryl) ซึ่งมีลักษณะแข็งคล้ายพลาสติก อะโครลีนเป็นสารที่สามารถยับยั้งการทำงานของเซลล์เม็ดเลือดขาวและเซลล์ในช่องปากได้ (นิธิยาและคณะ, 2543)

น้ำมันที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง นอกจากจะทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงแล้วยังทำให้สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะทำให้คุณภาพต่าง ๆ ของน้ำมันลดลง เช่น ค่าความจุความร้อน แรงตึงผิว และแรงภายใน (surface and interfacial tension) มีค่าลดลง ขณะที่ค่าความถ่วงจำเพาะ ความหนืด ค่าความเป็นกรด และปริมาณของสารพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น รวมทั้งทำให้น้ำมันมีสีเข้มหรือเปลี่ยนเป็นสีดำ สีที่เข้มขึ้นเป็นผลมาจากสารพวก nonvolatile เกิดการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยา thermal oxidation และการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัวเกิดเป็นคาร์บอนิล (carbonyl) cyclic fatty acid

ปฏิกิริยาทั้งหลายที่กล่าวมาแล้ว มีความสัมพันธ์กันและทำให้เกิดผลิตภัณฑ์หลายชนิด จากการศึกษาของนักวิจัย พบว่ามีสารประกอบต่าง ๆ มากกว่า 400 สาร ได้แก่ สารที่ระเหยได้ประมาณ 220 ชนิด และสารที่ไม่ระเหยซึ่งยังคงอยู่ในน้ำมันเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงหรือเป็นพอลิเมอร์ที่มีขี้ผึ้ง อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภค Clark and Serbia (1991) พบว่าสารเหล่านี้จะทำลายวิตามิน ยับยั้งเอนไซม์ ก่อให้เกิดการมิวเตชันและอาจก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินอาหาร

3. ปริมาณน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้ว

สำหรับประเทศไทย สถานจัดการและอนุรักษ์พลังงานรายงานผลการสำรวจน้ำมันพืชใช้แล้ว ภายใต้โครงการสำรวจน้ำมันพืชใช้แล้วเพื่อนำมาผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซล ในปีพ.ศ.2548 พบว่าน้ำมันพืชที่เหลือจากแหล่งที่ใช้น้ำมันทั้งหมดทั่วประเทศมีปริมาณปีละ 74.5 ล้านลิตร โดยกลุ่มครัวเรือนมีปริมาณน้ำมันพืชเหลือจากการใช้แล้วมากที่สุด คือ 47.2 ล้านลิตร/ปี รองลงมาได้แก่สถานประกอบการ 22.5 ล้านลิตร/ปี โรงงานอุตสาหกรรม 3.4 ล้านลิตร และผู้จำหน่ายของในตลาด 1.3 ล้านลิตร/ปี ตามลำดับ (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์, 2548) สำหรับการสำรวจปริมาณน้ำมันใช้แล้วจากสถานประกอบการนั้นพบว่าได้จากกลุ่มผู้ผลิตอาหารจานด่วนมากที่สุด

รองลงมาได้แก่ ร้านอาหาร โรงแรม โรงพยาบาลและห้างสรรพสินค้า ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลมีปัญหาในการรวบรวม นอกจากนั้นแล้วยังมีปัญหาในด้านคุณภาพน้ำมันเนื่องจากการทอดที่อุณหภูมิสูงหลายครั้งและมีการปนเปื้อนจากกระบวนการทำอาหาร ทำให้ต้องทำการควบคุมคุณภาพน้ำมันทั้งก่อนและหลังการทำปฏิกิริยา

ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลคือสารประกอบเอสเทอร์ ในคำจำกัดความของสากลคือทรัพยากรหมุนเวียนธรรมชาติ (Renewable Natural Resource) เช่น น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ แอซิดออลย์และน้ำมันรีไซเคิลจากการปรุงอาหารที่ถูกนำมาแปรรูปเชิงเคมีโดยการทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ซึ่งนิยมใช้เมทิลแอลกอฮอล์หรือเอทิลแอลกอฮอล์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์เป็นเชื้อเพลิงที่มีการเผาไหม้สะอาด ไบโอดีเซลจัดอยู่ในกลุ่มน้ำมันดีเซลชีวภาพ (Biological Diesel oil) ร่วมกับดีโซฮอล (Diesohol) น้ำมันดีเซลชีวภาพดิบ (Crude Biological Diesel Oil) และน้ำมันดีเซลชีวภาพบริสุทธิ์ (Refined Biological Diesel Oil)

1. ประเภทของไบโอดีเซล

1.1 ไบโอดีเซลที่ใช้น้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์โดยตรง เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันสบู่ดำ หรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันหมู ป้อนลงไปเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีใดๆ แต่สิ่งสำคัญของการใช้น้ำมันพืชโดยตรงคือต้องมีการอุ่นน้ำมันในทุกๆจุดที่น้ำมันผ่าน ได้แก่ ถังน้ำมัน ท่อทางเดินน้ำมัน ชุดกรองน้ำมัน วิธีการใช้น้ำมันประเภทนี้เป็นวิธีที่ได้น้ำมันในราคาถูก แต่การนำมาใช้อย่างเหมาะสมจำเป็นต้องอาศัยความร้อนในการหลอมเหลวไขแข็งและลดความหนืดของน้ำมัน (อาภาณี, 2549) ที่อุณหภูมิตัวน้ำมันพืชจะมีความหนืดสูงขึ้นจนเกิดเป็นไข ทำให้น้ำมันเป็นฝอยได้ยากและเกิดการสันดาปไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้น้ำมันพืชยังมีคุณสมบัติที่ระเหยตัวกลายเป็นไอน้ำได้น้อยมาก ทำให้การจุดระเบิดเกิดขึ้นได้ยาก ส่งผลให้เครื่องยนต์ติดยากและหลงเหลือคราบเขม่าเกาะที่หัวฉีด ผนังลูกสูบ แหวนและวาล์ว ซึ่งเป็นความยุ่งยากที่เกิดขึ้นเมื่อใช้น้ำมันพืชโดยตรงในเครื่องยนต์ดีเซล

1.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม เป็นการผสมระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ กับ น้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซล เพื่อลดความหนืดของน้ำมันลงทำให้ได้น้ำมันไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ

น้ำมันดีเซลให้มากที่สุด อย่างเช่น โคโคดีเซล (coco-diesel) เป็นการผสมกันระหว่างน้ำมันมะพร้าว กับน้ำมันก๊าด หรือปาล์มดีเซล (palm-diesel) เป็นการผสมระหว่างน้ำมันปาล์มกับน้ำมันดีเซล

น้ำมันที่ได้จากวิธีการดังกล่าวเหมาะกับกรณีที่ต้องการใช้น้ำมันอย่างเร่งด่วนและใช้กับเครื่องยนต์ที่ใช้งานหนัก ตลอดจนใช้งานในภูมิอากาศเขตร้อน อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำมันก๊าด และน้ำมันพืชขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของพื้นที่ใช้งาน อัตราส่วนผสมมีตั้งแต่ 10% ของน้ำมันก๊าด ต่อ 90% ของน้ำมันพืช จนถึง 40% ของน้ำมันก๊าด ต่อ 60% ของน้ำมันพืช โดยอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมอยู่ที่ 20% ของน้ำมันก๊าด ต่อ 80% ของน้ำมันพืช ปัจจุบันมีการนำวิธีการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานจริง แต่เนื่องจากราคาน้ำมันก๊าดค่อนข้างสูงทำให้ต้องใช้ปริมาณของน้ำมันก๊าดที่น้อยลง ส่งผลทำให้น้ำมันผสมที่ได้มีผลกระทบต่อเครื่องยนต์ดีเซลที่ไม่มีการดัดแปลงเครื่องยนต์ ทั้งนี้จึงจำเป็นต้องเลือกชนิดของน้ำมัน ชนิดตัวทำละลาย สัดส่วนที่เหมาะสม ซึ่งต้องพิจารณาประกอบกับปัจจัยเรื่องพื้นที่และฤดูกาลที่ใช้งานด้วย

1.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ เป็นไบโอดีเซลที่มีการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นเอสเทอร์ของไตรกลีเซอไรด์ ไบโอดีเซลชนิดนี้เป็นที่ยอมรับและผลิตกันโดยทั่วไป เช่น สหพันธรัฐเยอรมัน สหรัฐอเมริกา เป็นต้น ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์นี้มีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุดและน้ำมันที่ได้มีความคงตัวมากขึ้น ทำให้เมื่อนำมาใช้งานกับเครื่องยนต์แล้วไม่เกิดปัญหา สามารถเดิมเข้ากับเครื่องยนต์ดีเซลได้ทุกชนิดทั้งแบบเดิมโดยตรงหรือผสมในอัตราส่วนต่างๆ เช่น B5 หมายถึงการผสมน้ำมันดีเซลกับไบโอดีเซลในอัตราส่วน 95 ต่อ 5 หรือ B100 หมายถึงไบโอดีเซล 100% เป็นต้น ปัจจุบันไบโอดีเซลได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในระบบขนส่งมวลชนเนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่าน้ำมันดีเซลมาก นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สะอาด ไม่มีเขม่าหลงเหลือและจุดวาบไฟของไบโอดีเซลมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้มีความปลอดภัยในระบบขนส่งและเก็บรักษามากขึ้น อีกทั้งค่าซีเทนของไบโอดีเซลซึ่งเป็นดัชนีบ่งบอกถึงคุณภาพการติดไฟของน้ำมันยังคงมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ดังแสดงค่าในตารางที่ 2 (อาภาณี, 2549)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติโดยทั่วไปของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

Fuel property	Diesel	Biodiesel
Fuel standard	ASTMD975	ASTM D6751
Lower heating value, Btu/gal	~129,050	~118,170
Kinematic viscosity, (40 °C)	1.3 to 4.1	4.0 to 6.0
Specific gravity kg/l, (60 °F)	0.85	0.88
Density, lb/gal (15 °C)	7.079	7.328
Water and sediment, vol%	0.05 max	0.05 max
Carbon, wt%	87	77
Hydrogen, wt%	13	12
Sulfur, wt%	0.05 max	0.0 to 0.0024
Boiling point, °C	180 to 340	315 to 350
Flash point, °C	60 to 80	100 to 170
Cloud point, °C	-18 to 5	-3 to 12
Pour point, °C	-35 to -15	-15 to 10
Cetane number	40 to 55	48 to 65
Lubricity SLBOCLE, grams	2,000 to 5,000	>7,000

ที่มา: Tyson (2004)

2. มาตรฐานไบโอดีเซล

การผลิตเมทิลเอสเทอร์ในเชิงการค้าจะต้องมีการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้หรือไม่ โดยคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของไบโอดีเซลที่มักถูกพิจารณาเป็นอันดับแรกๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

2.1 ความหนืด (Viscosity) หมายถึง ความหนืดเชิงจลศาสตร์ของน้ำมันดีเซล มีผลต่อรูปร่างของตะอองน้ำมันที่ฉีดออกมาจากหัวฉีด ถ้าน้ำมันมีความหนืดเชิงจลศาสตร์สูงจะทำให้การ

ฉีดเป็นฝอยไม่ดี ละอองน้ำมันมีขนาดใหญ่ ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ แต่หากน้ำมันมีความหนืดต่ำเกินไปจะทำให้น้ำมันที่พ่นออกมาเป็นฝอยละเอียดมาก แต่ไม่พุ่งไปไกลเท่าที่ควรทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เช่นกันเนื่องจากน้ำมันรวมตัวกับอากาศได้ไม่ดี ประสิทธิภาพด้านกำลังของเครื่องยนต์ก็จะลดลง

2.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) หมายถึง สัดส่วนความหนาแน่นของเชื้อเพลิงต่อความหนาแน่นของน้ำโดยได้จากอัตราส่วน มวลต่อปริมาตรของเชื้อเพลิงหารด้วยมวลต่อปริมาตรของน้ำ ค่านี้ขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำและเชื้อเพลิง ค่าความถ่วงจำเพาะของไบโอดีเซลควรมีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานของน้ำมันดีเซลเพื่อให้เกิดการผสมเข้ากันได้ดี หากค่าความถ่วงจำเพาะมีความแตกต่างกันมากระหว่างสาร 2 ชนิดที่ผสมกัน จะทำให้เกิดการนอนกันหรือผสมกันไม่ได้ ทำให้คุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันที่ผสมไม่เป็นไปตามที่ต้องการและไม่มีคุณภาพ

2.3 จุดวาบไฟ (Flash point) หมายถึง อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ไอของสารติดไฟและลุกไหม้เมื่อมีเปลวไฟจ่ออยู่ที่ผิวหน้าของสาร ถ้าเอาเปลวไฟออกสารจะไม่ลุกไหม้อีกต่อไป คุณสมบัตินี้มีความสำคัญในด้านการป้องกันอันตรายจากอัคคีภัยในการเก็บรักษาแต่ไม่มีผลต่อสมบัติการเผาไหม้และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ โดยปกติแล้วอุณหภูมิจุดวาบไฟของไบโอดีเซลจะมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล (Tyson, 2004) แต่อย่างไรก็ตามไบโอดีเซลอาจมีจุดวาบไฟที่ต่ำกว่าปกติได้หากในผลิตภัณฑ์มีปริมาณแอลกอฮอล์จากกระบวนการผลิตหลงเหลือหรือเจือปนอยู่ซึ่งควรต้องกำจัดออกเพื่อให้มีจุดวาบไฟสูงเพื่อความปลอดภัยในการขนส่งเชื้อเพลิง

2.4 จุดขุ่นมัวหรือจุดหมอก (Cloud point) หมายถึง อุณหภูมิที่เริ่มปรากฏให้เห็นกลุ่มหมอกจากการตกผลึกของแว็กซ์ (Wax) ในน้ำมันเชื้อเพลิงโดยการทำให้อุณหภูมิเย็นลงภายใต้การควบคุมอุณหภูมิ หากน้ำมันมีจุดขุ่นมัวหรือจุดหมอกสูงเกินไป จะทำให้เกิดการตกผลึกได้ง่าย มีแว็กซ์ก่อตัวอยู่ตามจุดต่างๆ ของท่อ ทำให้การฉีดพ่นน้ำมันให้เป็นฝอยได้ยากในห้องเครื่องยนต์และเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จนกระทั่งก่อให้เกิดควันที่ท่อไอเสียได้

2.5 จุดไหลเท (Pour point) หมายถึง อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่น้ำมันเป็นของเหลวพอที่จะไหลได้เมื่อได้รับความเย็นในเครื่องมือการหาจุดไหลเท ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการไหลของน้ำมันภายในท่อน้ำมันของรถยนต์ได้ที่อุณหภูมิต่ำๆ น้ำมันเชื้อเพลิงไม่ควรมีจุดไหลเทสูงเนื่องจากในสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อมในประเทศเขตหนาวจะทำให้ น้ำมันหนืดจนไม่สามารถไหลผ่าน

ท่อต่างๆ ได้จนส่งผลให้เครื่องยนต์สตาร์ทไม่ติด อย่างไรก็ตามจุดไหลเทของไบโอดีเซลขึ้นกับความอึดตัวของน้ำมันโดยที่น้ำมันที่มีความอึดตัวสูง จะมีจุดไหลเทสูงเช่นกัน

2.6 ปริมาณน้ำและตะกอน (Water and sediment) หมายถึง ปริมาณน้ำและอนุภาคของตะกอนหรือของแข็งในเกณฑ์ที่ต่ำที่สุดที่สามารถยอมรับได้ โดยปกติตามมาตรฐานสากลของไบโอดีเซลจะมีค่าเท่ากับน้ำมันดีเซล หากในน้ำมันมีปริมาณน้ำและตะกอนเจือปนอยู่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดการผุกร่อนของอุปกรณ์ต่างๆ ในเครื่องยนต์ ทำให้อายุการใช้งานของเครื่องยนต์สั้นลง

2.7 ค่าซีเทน (Cetane number) เป็นค่าดัชนีที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติในการจุดติดไฟ (Ignition quality) ของน้ำมัน โดยที่น้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนสูงจะมีระยะเวลาในการจุดติดไฟสั้นซึ่งจะช่วยให้เครื่องยนต์สตาร์ทติดง่ายแม้ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เครื่องยนต์ร้อนได้เร็วขึ้นโดยไม่เกิดการสะดุด ไม่เกิดควันขาว คราบยางเหนียว (Varnish) และคราบเขม่าในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามน้ำมันที่มีค่าซีเทนสูงเกินไปอาจทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จนกระทั่งทำให้เกิดควันที่ท้อไอเสียได้เช่นกัน

2.8 กากคาร์บอน (Carbon Residue) หมายถึง ปริมาณของสารที่เหลือตกค้างอยู่หลังจากน้ำมันดีเซลได้ระเหยออกไปหมดแล้วที่อุณหภูมิสูงๆ ถ้าน้ำมันมีค่าของกากคาร์บอนสูงเกินไปก็อาจทำให้เกิดคราบเขม่าสะสมในห้องเผาไหม้ได้มากและไอเสียมีควันดำมาก

2.9 ปริมาณกำมะถัน (Sulfur) กำมะถันในน้ำมันดีเซลเมื่อเผาไหม้กับอากาศจะกลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นกลายเป็นกรดกำมะถัน กัดกร่อนชิ้นส่วนต่างๆ ในเครื่องยนต์ ทำให้เครื่องยนต์สึกหรอเร็วกว่าปกติ การสึกหรอนี้จะมีไม่มากถ้าเครื่องยนต์ทำงานเต็มกำลังความเร็วคงที่และอุณหภูมิการทำงาน of เครื่องยนต์สูงๆ เช่น เครื่องยนต์เรือเดินทะเลหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงงาน เครื่องยนต์ประเภทนี้สามารถใช้ น้ำมันดีเซลที่มีกำมะถันสูงๆ ได้

ตารางที่ 3 รายละเอียดข้อกำหนดทางคุณภาพของไบโอดีเซลตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ
1	เมทิลเอสเทอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methyl Ester, wt %)	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส (Density at 15 °C, kg/m ³)	ไม่ต่ำกว่า 860 และ ไม่สูงกว่า 900	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เซนติสโตกส์ (Viscosity at 40 °C, cSt)	ไม่ต่ำกว่า 3.5 และ ไม่สูงกว่า 5	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส (Flash Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
5	กำมะถัน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur, wt %)	ไม่สูงกว่า 0.001	ASTM D 2622
6	กากถ่าน ร้อยละโดยน้ำหนัก (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (Carbon Residue , on 10 % distillation residue, wt %)	ไม่สูงกว่า 0.3	ASTM D 4530
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	EN ISO 12937
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก (Total Contaminate, wt %)	ไม่สูงกว่า 0.0024	EN 12662
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า หมายเลข 1	ASTM D 130

ตารางที่ 3 (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยา ชั่วโมง ออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (Oxidation Stability at 100 °C, hours)	ไม่ต่ำกว่า 6	EN 14112
13	ค่าความเป็นกรด มิลลิกรัม โพตัสเซียม ไฮดรอกไซด์/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 ร้อยละโดย น้ำหนัก (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	ไดกลิเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Diglyceride , wt %)	ไม่สูงกว่า 0.2	EN 14105
19	ไตรกลิเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Triglyceride , wt %)	ไม่สูงกว่า 0.2	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Free glycerin , wt %)	ไม่สูงกว่า 0.02	EN 14105
21	กลีเซอรินทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก (Total glycerin, wt %)	ไม่สูงกว่า 0.25	EN 14105

ตารางที่ 3 (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด	วิธีทดสอบ
22	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group I metals (Na+K), mg/kg)	ไม่สูงกว่า 5 ไม่สูงกว่า 5	EN 14108 และ EN 14109
	โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group II metals (Ca+Mg), mg/kg)		pr EN 14538
23	ฟอสฟอรัส ร้อยละโดยน้ำหนัก (Phosphorus, wt %)	ไม่สูงกว่า 0.001	ASTM D 4951

ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน (2550)

3. กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

วิธีการทั่วไปที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีได้แก่ การใช้โดยตรงและผสมตามสัดส่วน (Direct Use and Blending) ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Thermal Cracking or Pyrolysis) การทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสถานะเหนือจุดวิกฤต (Supercritical Methanol) และทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) โดยรายละเอียดในการผลิตไบโอดีเซลของแต่ละวิธีมีดังต่อไปนี้

3.1 การใช้โดยตรงและผสมตามสัดส่วน (Direct Use and Blending)

การใช้โดยตรงหรือการผสม (Direct use and Blending) เป็นการนำน้ำมันพืชมาผสมกับน้ำมันดีเซลโดยตรงในสัดส่วนต่างๆ เพื่อให้ความหนืดของน้ำมันพืชลดลง สามารถผสมน้ำมันได้ตั้งแต่ 10% ขึ้นไปตามความเหมาะสมของน้ำมันที่ใช้ ข้อดีของการนำน้ำมันพืชใช้โดยตรงคือให้

ค่าความร้อนเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ของดีเซล เป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่พร้อมใช้และเป็นพลังงานทางเลือกใหม่ ส่วนข้อเสียคือความหนืดสูง ความสามารถในการกลายเป็นไอดำ

3.2 ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)

เนื่องจากน้ำมันพืชมีความหนืดสูง วิธีการไมโครอิมัลชันจะช่วยลดความหนืดของน้ำมัน โดยทำให้ของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันสามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้ ของเหลวไมโครอิมัลชันหมายถึง การที่คอลลอยด์กระจายตัวอยู่ในสถานะสมดุลของระบบสองวัฏภาคระหว่างน้ำและน้ำมัน (Schwab *et al.*, 1987) อิมัลชันที่เกิดขึ้นนี้จะมีความหนาแน่น 1 - 150 นาโนเมตร สามารถเตรียมได้จากการผสมน้ำมันพืชกับเอสเทอร์ โดยมีการใช้ตัวทำละลายร่วมหรือเตรียมจากน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์โดยมีการใช้สารลดแรงตึงผิวในสัดส่วนที่เหมาะสมซึ่งทำให้ระบบมีเสถียรภาพ อาจจะผสมหรือไม่ผสมน้ำมันดีเซลลงไปในช่วงของเหลวไมโครอิมัลชันก็ได้ โดยปริมาณแอลกอฮอล์ที่ผสมในของเหลวไมโครอิมัลชันทำให้ค่าความร้อนจำเพาะในของเหลวนี้มีค่าน้อยกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้ระบบการเผาไหม้ของเครื่องยนต์มีอุณหภูมิต่ำลง จึงพบปัญหาเกี่ยวกับการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

3.3 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Thermal cracking or pyrolysis)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยใช้ความร้อนสูงถึง 450-850 องศาเซลเซียส โดยไม่มีอากาศหรือออกซิเจนระหว่างกระบวนการเผาไหม้ (Sontage, 1979) ในระบบนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยในการแตกตัวของพันธะในโครงสร้างสารเคมีให้กลายเป็นสารโมเลกุลเล็กๆ (Weisz *et al.*, 1979) กระบวนการนี้มีความซับซ้อนและหลากหลายของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลายชนิดได้แก่ อัลเคน อัลคีน กรดคาร์บอกซิลิก อะโรมาติกและผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส วัตถุดิบที่นำมาใช้ได้คือน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรดไขมัน ซากสิ่งมีชีวิต เป็นต้น แต่กระบวนการไพโรไลซิสมีข้อเสียที่สำคัญคือต้องใช้ความร้อนสูงทำให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมได้

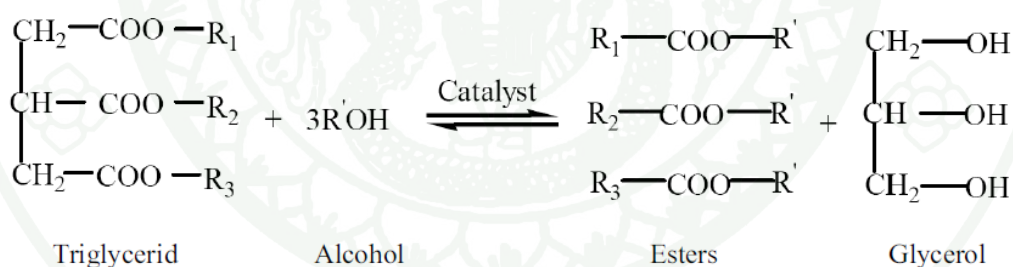
3.4 การทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสถานะเหนือจุดวิกฤต (Supercritical Methanol)

เป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันกับเมทานอลที่สถานะเหนือจุดวิกฤต วิธีนี้จะใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาก่อนข้างสั้น ใช้อุณหภูมิและความดันสูง ในปี 2000 Kusdiana and Saka ได้ทำการผลิตไบโอดีเซลจาก

Rapeseed oil ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 30 เมกะปาสคาล อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:42 ใช้เวลา 4 นาที ให้ค่าแปลงผัน (Conversion) มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ขึ้นไปจะทำให้ค่าแปลงผันลดลงเพราะน้ำมันเกิดการเสียสภาพโดยความร้อน

3.5. ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)

กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน คือ ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดจาก Alkoxy group (-OR) ของเอสเทอร์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์ในรูปอื่นตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ากระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน คือ กระบวนการแลกเปลี่ยน Alkoxy group ระหว่างเอสเทอร์กับแอลกอฮอล์ โดยที่กรดสามารถเร่งปฏิกิริยาโดยให้โปรตอนแก่หมู่ Alkoxy ขณะที่เบสสามารถเร่งปฏิกิริยาโดยย้ายโปรตอนจากแอลกอฮอล์ สำหรับกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ สารประกอบไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้อัลคิลเอสเทอร์หรือเรียกโดยทั่วไปว่าไบโอดีเซล ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันกับแอลกอฮอล์

ที่มา: Khan (2002)

กระบวนการนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ผลิตโดยใช้น้ำมันจากพืชหรือไขมันจากสัตว์ โดยกระบวนการนี้เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์เพื่อก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลและอัลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ทำให้ค่าความหนืดของเชื้อเพลิงที่สังเคราะห์ได้ลดลง

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีด้วยกัน 3 ขั้นตอนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกัน แสดงดังภาพ ที่ 5

ขั้นที่ 1 : ไตรกลีเซอไรด์ + แอลกอฮอล์ $\longrightarrow$ ไดกลีเซอไรด์ + อัลคิลเอสเทอร์

ขั้นที่ 2 : ไดกลีเซอไรด์ + แอลกอฮอล์ $\longrightarrow$ โมโนกลีเซอไรด์ + อัลคิลเอสเทอร์

ขั้นที่ 3 : โมโนกลีเซอไรด์ + แอลกอฮอล์ $\longrightarrow$ กลีเซอรอล + อัลคิลเอสเทอร์

ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์

ที่มา: Fukuda *et al.* (2001)

กระบวนการเริ่มจากไตรกลีเซอไรด์ถูกเปลี่ยนเป็นไดกลีเซอไรด์ จากนั้นไดกลีเซอไรด์จะถูกเปลี่ยนต่อเป็นโมโนกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์จะถูกเปลี่ยนเป็นกลีเซอรอล ในแต่ละขั้นตอนจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นอัลคิลเอสเทอร์หนึ่งโมเลกุล (Fukuda *et al.*, 2001) ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ ดังนั้นเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าจนผลิตภัณฑ์เกิดมากขึ้นจึงจำเป็นต้องใช้แอลกอฮอล์ในปริมาณที่มากเกินไปในการทำปฏิกิริยา แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ได้แก่ เมทานอล เอทานอล และโพรพานอล โดยที่เมทานอลและเอทานอลจะนิยมใช้มากที่สุด ข้อดีของการใช้เอทานอลคือสามารถผลิตได้จากผลผลิตทางการเกษตรมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย ส่วนเหตุผลที่นิยมใช้เมทานอลเป็นเพราะว่าเมทานอลมีราคาถูกและมีข้อได้เปรียบทางโครงสร้างโมเลกุล เนื่องจากเป็นแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่สั้นที่สุดและมีขั้ว ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้เอทานอล (Ma and Hanna, 1999)

4. ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

เนื่องจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ปริมาณและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณน้ำในน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบ (Free Fatty Acid) อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและเวลาในการทำปฏิกิริยา ปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ ดังนั้นในการผลิตไบโอดีเซลควรคำนึงถึงความสำคัญของปัจจัยเหล่านี้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญมากต่อปริมาณของเอสเทอร์ ตามปริมาณสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันซึ่งต้องการ 3 โมลของแอลกอฮอล์ต่อ 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น 3 โมลของอัลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน และ 1 โมลของกลีเซอรอล อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นจึงนิยมใช้แอลกอฮอล์ที่มากเกินไปเพื่อให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางขวา แต่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่มากเกินไปจะส่งผลต่อการแยกกลีเซอรอลออกจากเอสเทอร์ เนื่องจากแอลกอฮอล์ที่มากเกินไปจะทำให้ความสามารถในการละลายระหว่างกลีเซอรอลกับเอสเทอร์เพิ่มขึ้น โดยกลีเซอรอลที่ผสมอยู่จะเป็นตัวช่วยให้สมดุลย้อนกลับไปทางซ้าย ส่งผลให้ได้เอสเทอร์น้อยลง

สำหรับผลกระทบจากชนิดของแอลกอฮอล์นั้น พบว่าความหนืดของเอทิลเอสเทอร์จะสูงกว่าเมทิลเอสเทอร์เล็กน้อย แต่จุดหมอกควันและจุดไหลเท (Cloud and Pour Points) ของเอทิลเอสเทอร์จะต่ำกว่าเมทิลเอสเทอร์เล็กน้อย จากการทดลองใช้กับเครื่องยนต์ พบว่าเมทิลเอสเทอร์จะให้กำลังและทอร์ก (Torque) ที่สูงกว่า และทำให้เกิดการอุดตันในเครื่องยนต์น้อยกว่าการใช้เอทิลเอสเทอร์ อย่างไรก็ตามเอทิลเอสเทอร์จะมีคุณสมบัติหลายประการที่ดีกว่าเมทิลเอสเทอร์ คือ การเผาไหม้ทำให้เกิดควันน้อยและจุดไหลเทที่ต่ำกว่า (Demirbas, 2002)

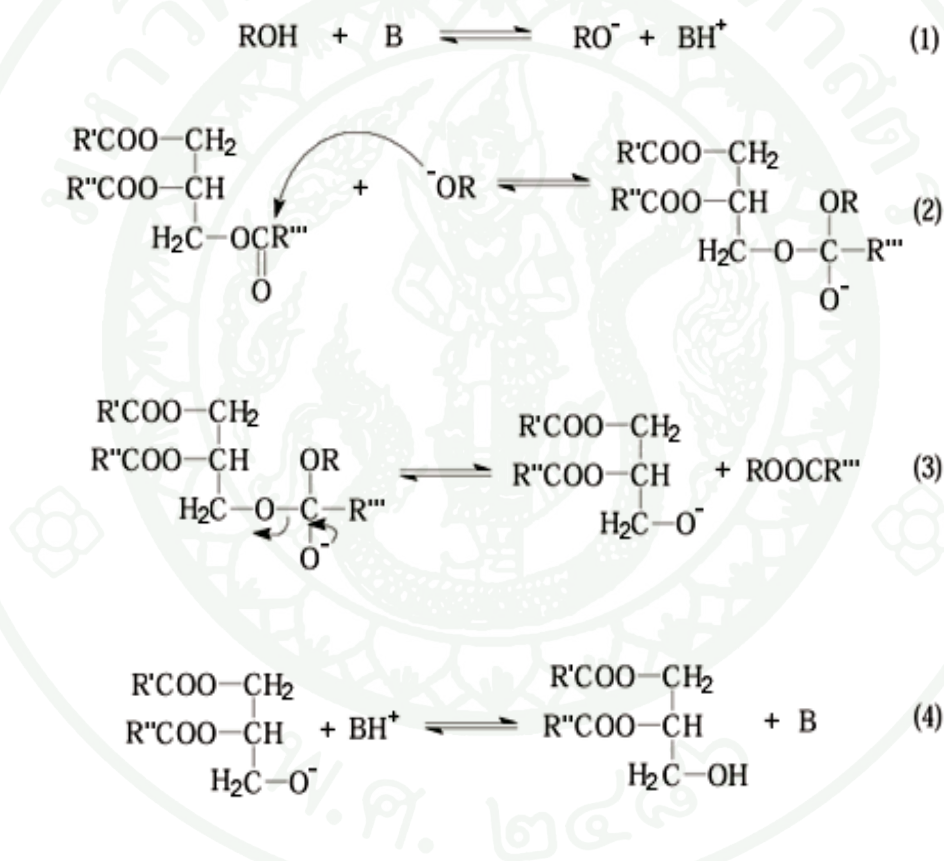
4.2 ปริมาณและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีอยู่หลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทก็มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 4

4.2.1. การใช้ตัวเร่งชนิดเบส

การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสเป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาดีที่สุด ให้ปริมาณ ไบโอดีเซลสูงในระยะเวลาอันสั้น ส่วนมากมักเลือกใช้สารประกอบอัลคอกไซด์และไฮดรอกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์ (Alkaline metal oxide alkoxides and hydroxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Schuchardt *et al.*, 1998)

กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 6 ขั้นตอนที่ 1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสจะเข้าทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์เกิดเป็นอัลคอกไซด์ (alkoxide, RO^-) และโปรตอนเนต (protonated, BH^+) จากนั้นอัลคอกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นสารมัธยันตร์เตตระฮีดรอล (tetrahedral intermediate) แสดงดังขั้นตอนที่ 2 โดยสารมัธยันตร์เตตระฮีดรอลจะเปลี่ยนไปเป็นอัลคิลเอสเทอร์และแอนไอออนของไตรกลีเซอไรด์ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 จากนั้นแอนไอออนของไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับโปรตอนเนตเกิดเป็นไตรกลีเซอไรด์และให้ตัวเร่งเบสกลับคืนมาในขั้นตอนที่ 4 และกลไกของปฏิกิริยาจะกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 1 ใหม่ สุดท้ายจะให้กลีเซอรอลและอัลคิลเอสเทอร์เป็นผลิตภัณฑ์

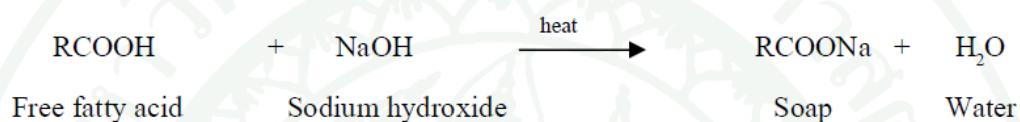


ภาพที่ 6 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Schuchardt *et al.* (1998)

การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นที่นิยมมากในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากมีราคาถูกและ

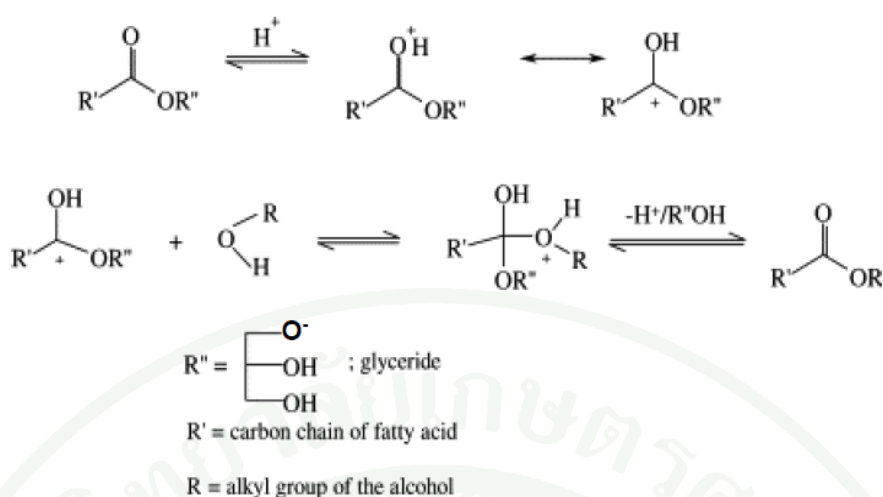
เป็นตัวเร่งที่ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็ว แต่ข้อจำกัดที่สำคัญในการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคือ ปฏิกิริยาจะมีความไวต่อน้ำและกรดไขมันอิสระ โดยน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ขณะที่กรดไขมันอิสระจะทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสเกิดเป็นสบู่หรือเกิดปฏิกิริยาซาปอนิฟิเคชัน (Saponification) แสดงดังภาพที่ 7 การเกิดสบู่ไม่เพียงแต่ทำให้สิ้นเปลืองตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาซาปอนิฟิเคชันเท่านั้น แต่สบู่จะทำให้เกิดคอลลอยด์ (ของผสมสองชนิดที่ไม่ละลายผสมกัน) ทำให้ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลที่ได้ต่ำ ดังนั้นก่อนที่จะนำน้ำมันพืชและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสมาใช้เป็นวัตถุดิบ จึงควรกำจัดน้ำและกรดไขมันอิสระออกก่อน



ภาพที่ 7 ปฏิกิริยาซาปอนิฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ

4.2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด

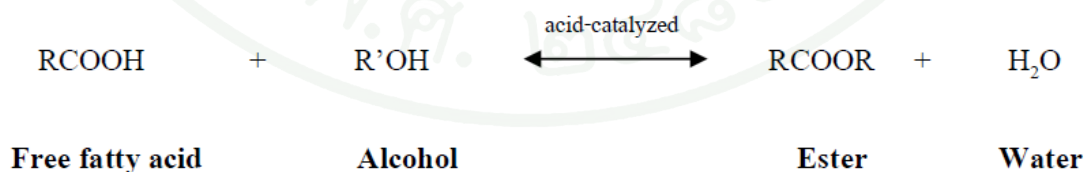
สำหรับน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระมากการใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ไบโอดีเซลในปริมาณที่ไม่มากนัก ดังนั้นจึงมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดแทนเบส กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 8 ขั้นแรกโปรตอนจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ คาร์บอนิล (carbonyl group) ของโมโนกลีเซอไรด์เกิดเป็นคาร์โบแคตไอออน (carbocation) จากนั้นคาร์โบแคตไอออนจะทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์เกิดเป็นสารมัธยันตร์เตตระฮีดรอล (tetrahedral intermediate) และเมื่อกำจัดกลีเซอรอลและโปรตอนออกก็จะได้อีสเทอร์ สำหรับกลไกปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์สามารถอธิบายได้จากภาพที่ 8 เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 8 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Schuchardt *et al.* (1998)

การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ในการผลิตไบโอดีเซลมีข้อดีคือ เป็นตัวเร่งที่มีราคาถูกและสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) เปลี่ยนกรดไขมันอิสระที่มีมากในน้ำมันให้เป็นเอสเทอร์ได้ดังแสดงในภาพที่ 9 แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยก็คือ น้ำ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดลดลงอย่างมาก ทำให้ปริมาณเอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันลดลง (Kusdiana and Saka, 2004) และข้อจำกัดในการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญอีกอย่างคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำมาก จึงใช้เวลานานกว่าในการเกิดปฏิกิริยา



ภาพที่ 9 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดไขมันอิสระกับแอลกอฮอล์

ที่มา: Khan (2002)

4.2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีทั้งแบบเอกพันธุ์และแบบวิวิธพันธุ์ ส่วนใหญ่ที่ใช้กันในปัจจุบันเป็นแบบเอกพันธุ์ซึ่งเป็นเอนไซม์ชนิด Mobilized enzyme แต่ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเป็น Immobilized enzyme ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ปัจจุบันมีการศึกษาโดยใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและพบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง ปฏิกิริยามีความจำเพาะสูง ง่ายต่อการแยกผลิตภัณฑ์ออกจากกลีเซอริน แต่มีข้อเสียคือมีต้นทุนสำหรับกระบวนการผลิตที่สูง (Fukuda *et al.*, 2001)

4.2.4 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน (Two-step Catalyzed Process)

เนื่องจากน้ำมันใช้แล้วมักมีปริมาณของกรดไขมันอิสระสูง ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบสหรือกรดอย่างใดอย่างหนึ่งจะไม่ให้ผลดีเท่าที่ควร วิธีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนจึงถูกพัฒนามาจากวิธีดั้งเดิม เนื่องจากจะทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยขั้นตอนแรกจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดเพื่อเปลี่ยนกรดไขมันอิสระให้เป็นเอสเทอร์จากปฏิกิริยา เอสเทอร์ฟิเคชัน จนปริมาณของกรดไขมันอิสระน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 0.5 ต่อมาในขั้นตอนที่ 2 จึงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบสสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

Dorado *et al.* (2003) ทำการศึกษากับน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้วหลายชนิด เช่น น้ำมันปาล์มและน้ำมันที่ผ่านการเติมไฮโดรเจนแล้ว (Hydrogenated Oil) ของประเทศบราซิล ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระร้อยละ 5.12 น้ำมันมะกอกของประเทศสเปนมีกรดไขมันอิสระร้อยละ 2.24 และน้ำมันผสมจากประเทศเยอรมันมีกรดไขมันอิสระร้อยละ 1.28 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรกต้องทำให้น้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงให้มีค่าลดลงด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน แล้วจึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันต่อ โดยน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 3 จะมีร้อยละการแปลงผันเป็นไบโอดีเซลประมาณร้อยละ 88 – 95

Hanny *et al.* (2008) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันของเมล็ดสบู่ดำซึ่งมีกรดไขมันอิสระในปริมาณสูง จนทำให้เกิดสบู่อุ่นในปริมาณมากส่งผลให้ปริมาณร้อยละของไบโอดีเซลที่ได้มีค่าต่ำ จึงได้ขั้นตอนที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลของน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมัน

อิสระสูงก็ต้องใช้กระบวนการสองขั้นตอน งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ขั้นตอนแรกเป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6 ต่อ 1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ใช้เวลาการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมงและใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 50 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นได้นำน้ำมันที่ได้จากขั้นตอนแรกไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันต่อในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมัน 24 ต่อ 1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ใช้เวลาการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมงและใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 65 องศาเซลเซียส ผลการทดลองที่ได้พบว่าไบโอดีเซลมีค่าเปอร์เซ็นต์ FAME 90 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบความแตกต่างของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

รายการ	คุณสมบัติในการทำปฏิกิริยา	กระบวนการผลิตโดยใช้			
		กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ^a	เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ^a	เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ^a	ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน ^b
1	กรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชหรือสัตว์	เอสเทอร์	เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ	เอสเทอร์	เอสเทอร์
2	ปริมาณน้ำในน้ำมันพืชหรือสัตว์	รบกวนการเกิดปฏิกิริยา	รบกวนการเกิดปฏิกิริยา	ไม่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยา	รบกวนการเกิดปฏิกิริยา
3	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	55-80	60-70	30-40	50-60
4	ปริมาณเอสเทอร์	ปกติ	ปกติ	สูง	สูง
5	การแยกกลีเซอรอลออกจากผลิตภัณฑ์	ยาก	ยาก	ง่าย	ยาก
6	การแยกสารเพื่อให้ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์	ทำการแยกหลายขั้นตอน	ทำการแยกหลายขั้นตอน	ไม่ต้องมี	ทำการแยกหลายขั้นตอน
7	ราคาของผลิตภัณฑ์ที่ได้	ราคาถูก	ราคาถูก	ค่อนข้างแพง	ราคาถูก

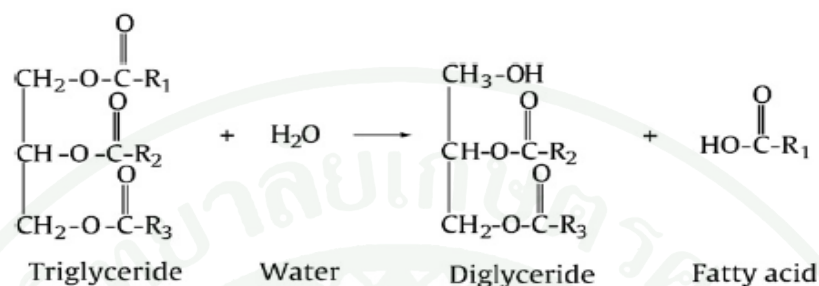
ที่มา: ^a Marchetti *et al.* (2005)

^b Wang *et al.* (2006)

4.3 ปริมาณน้ำในน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบ

ปริมาณน้ำในน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันทั้งที่ใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้เพราะน้ำจะลดประสิทธิภาพของตัวเร่ง

ปฏิกิริยาลงและทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) กับไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันตั้งต้น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันอิสระ (free fatty acids) ดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณเอสเทอร์ที่ลดลง



ภาพที่ 10 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์

ที่มา: Man *et al.*, (2010)

Peiyong Sun *et al.* (2010) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันโอเลอิกด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล โดยใช้อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันโอเลอิกเป็น 30:1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมัน ใช้เวลาการทำปฏิกิริยา 5 นาทีและใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 100 องศาเซลเซียส พบว่าเมทิลเอสเทอร์จะลดลงจาก 99.1 เป็น 10.4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีน้ำเจือปนอยู่ในน้ำมันจาก 0.01 เป็น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน

4.4 ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบ (Free Fatty Acid)

ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบเป็นปัจจัยสำคัญเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชันได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นสบู่ ซึ่งป็นสารอิมัลซิฟายเออร์ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันคือกลีเซอรอลละลายในชั้นของเอสเทอร์ได้มากขึ้น ทำให้ความบริสุทธิ์และปริมาณของเอสเทอร์ลดลง โดยน้ำมันวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาควรมีปริมาณกรดไขมันอิสระไม่เกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์ (Wang *et al.*, 2006) หรือค่าความเป็นกรดของน้ำมัน (Acid value) ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน (Felizardo *et al.*, 2006)

Kusdiana and Saka (2004) พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดเรพกับเมทานอล เนื่องจากปฏิกิริยาสaponิฟิเคชันซึ่งเกิดจากกรดไขมันอิสระทำปฏิกิริยากับเบสแล้วเกิดเป็นสบู่ ส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ลดลง

Ma *et al.* (1998) ศึกษาผลกระทบของกรดไขมันอิสระต่อการทำปฏิกิริยาของไขมันวัวกับเมทานอลโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลปรากฏว่าปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในไขมันวัวควรมีค่าต่ำกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งจะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์การแปลงผันเป็นเอสเทอร์สูงที่สุด

4.5 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสหรือกรดส่วนใหญ่เมื่อใช้อุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยาจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ แต่ไม่ควรใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าจุดเดือดของแอลกอฮอล์ตั้งต้น เนื่องจากจะทำให้แอลกอฮอล์ระเหยกลายเป็นไอส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาลดลง นอกจากนี้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคควรระวังการเกิดปฏิกิริยาสaponิฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์เมื่อใช้อุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยา โดยอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะขึ้นอยู่กับประเภทของน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยส่วนมากจะอยู่ในช่วง 50-60 องศาเซลเซียส (Dennis *et al.*, 2010)

5. เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล

การย่อขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ทางกระบวนการเคมีได้เป็นการปฏิรูปที่สำคัญสำหรับการปรับปรุงอุปกรณ์เพื่อให้กระบวนการทางเคมีเกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสมและคุ้มค่าที่สุด เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลสามารถใช้ได้กับกระบวนการผลิตหลายประเภท เช่น การผลิตเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells) โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการแพทย์เพื่อใช้ทดสอบและสังเคราะห์ยาชนิดต่างๆ เพราะอุตสาหกรรมการผลิตยานั้นไม่ใช่กระบวนการที่ต้องใช้สารเคมีในปริมาณมาก ๆ การใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลในกระบวนการผลิตเป็นสิ่งที่น่าสนใจ สะดวกในการเคลื่อนย้ายเพราะมีขนาดเล็ก ลดปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสียน้อย มีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายโอนความร้อนเนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลได้ถูก

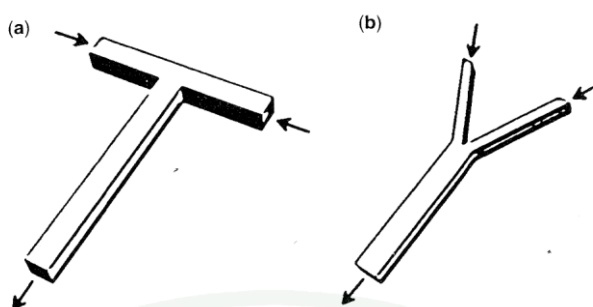
ออกแบบให้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาตรสูง เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลสามารถใช้กับปฏิกิริยาเคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปเกี่ยวข้องกับสารเคมีที่ผสมเข้าด้วยกันไม่ได้ เช่น ปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายกับของเหลวอินทรีย์ที่ผสมเข้าด้วยกันไม่ได้ (Immiscible aqueous – organic liquid) ปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับของเหลว ปฏิกิริยาระหว่างแก๊ส ของเหลว ของแข็ง เป็นต้น ในปฏิกิริยาเหล่านี้ต้องการแรงเพื่อที่จะผลักดันให้สารตั้งต้นตัวหนึ่งสามารถผสมด้วยเข้ากันได้กับสารตั้งต้นที่เหลือ โดยจะเกิดขึ้นที่รอยต่อวฏภาคของสารต่างชนิดกัน ในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของเหลวที่ผสมกันไม่ได้ เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลจะช่วยให้เกิดการแพร่ที่ดีขึ้นระหว่างเฟสที่ติดกัน (George *et al.*, 2005) ดังนั้นจึงสามารถนำไปประยุกต์เพื่อใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันสำหรับผลิตไบโอดีเซลเพื่อลดระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

5.1 ตัวช่วยการผสมแบบไมโคร (micro mixers)

การผสมกันของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาต่างๆ ปัจจัยหนึ่งที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา คือ ตัวช่วยในการผสม โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ Passive mixers กับ Active mixers ข้อแตกต่างระหว่างตัวช่วยในการผสม 2 ประเภทนี้คือ ตัวช่วยการผสมแบบ Passive mixers อาศัยการออกแบบรูปร่างทางเรขาคณิตเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสม เช่น ตัวช่วยในการผสมชนิด Y ตัวช่วยการผสมชนิด T เป็นต้น ส่วนตัวช่วยการผสมแบบ Active mixers อาศัยแหล่งพลังงานจากภายนอกเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสม เช่น การใช้การสั่นสะเทือนของคลื่นอัลตราซาวด์ เป็นต้น แม้ว่าตัวช่วยในการผสมทั้ง 2 ชนิดนี้จะมีลักษณะที่แตกต่างกัน แต่วัตถุประสงค์หลักของตัวช่วยในการผสมทั้ง 2 ชนิดเหมือนกันคือ ตัวช่วยในการผสมจะทำหน้าที่เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารที่เข้าทำปฏิกิริยาเพื่อให้การทำปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสเกิดได้ดีขึ้น

5.1.1 ตัวช่วยการผสมแบบชนิด Y และชนิด T

ตัวช่วยการผสมชนิดนี้เป็นตัวช่วยการผสมที่ง่ายที่สุดและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมได้ดี โดยเฉพาะในระบบที่เป็นไมโครแชนแนลเมื่อใช้ตัวช่วยการผสมแบบนี้จะช่วยเพิ่มการผสมได้ดีขึ้นเพราะช่วยให้เกิดการแพร่ของโมเลกุลเร็วขึ้นในระบบที่มีขนาดเล็ก แต่ถ้าจะใช้ตัวช่วยการผสมชนิดนี้ในระบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะต้องเพิ่มอัตราการไหลของสารที่จะทำปฏิกิริยาเพื่อที่จะทำให้การผสมดีขึ้น ตัวช่วยการผสมชนิด Y และ ชนิด T แสดงดังภาพที่ 11

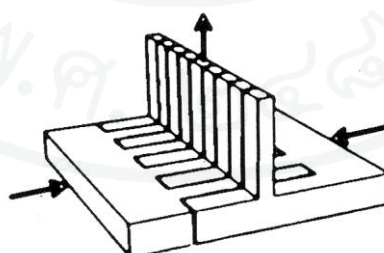


ภาพที่ 11 a) ตัวช่วยในการผสมชนิด T b) ตัวช่วยในการผสมชนิด Y

ที่มา: Dietrich (2009)

5.1.2 ตัวช่วยการผสมแบบ Multilamination

ตัวช่วยการผสมชนิดนี้เป็นแบบที่นิยมใช้ในระบบการผลิตขนาดใหญ่ ระดับโรงงานอุตสาหกรรม หลักการทำงานคือจะใช้การไหลของสารที่ทำปฏิกิริยาให้มาสัมผัสในทิศทางที่ต่างกันอย่างจะเป็นการไหลทางเดียว (Cocurrent) หรือการไหลสวนทางก็ได้ (Countercurrent) ระยะเวลาในการผสมในแต่ละส่วนสัมผัสขึ้นอยู่กับความกว้างของชั้นของไหล ดังนั้นในการออกแบบทางเรขาคณิตของตัวช่วยในการผสมชนิดนี้ต้องพิจารณาถึงความกว้างของสายการไหลของของไหล โดยต้องมีขนาดมากกว่า 100 ไมโครเมตร ตัวช่วยการผสมแบบ multilamination ชนิดการไหลสวนทางแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ตัวช่วยการผสมแบบ multilamination ชนิดการไหลสวนทาง

ที่มา: Dietrich (2009)

5.1.3 ตัวช่วยการผสมแบบไฮโดรไดนามิกส์

ตัวช่วยการผสมชนิดนี้ดัดแปลงมาจากชนิด multilamination โดยอาศัยการลดขนาดความกว้างของไมโครแชนเนล เพื่อให้ชั้นการไหลของของไหลที่ไหลผ่านช่องที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กๆ ส่งผลต่อการลดระยะทางในการแพร่และทำให้การผสมดีขึ้น ลักษณะของตัวช่วยการผสมแบบไฮโดรไดนามิกส์ ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ตัวช่วยการผสมแบบไฮโดรไดนามิกส์

ที่มา: Dietrich (2009)

Jachuck *et al.* (2009) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครแชนเนล ปฏิกริยาที่ใช้เป็นแบบทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันตัวเร่งปฏิกริยาชนิดเบสที่ใช้คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้น้ำมันคาโนลาและเมทานอลเป็นสารตั้งต้น เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครแชนเนลมีลักษณะเป็นท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.5 มิลลิเมตร ส่งผลให้มีการถ่ายเทมวลและความร้อนได้ดี ทั้งนี้ได้มีการศึกษาลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อ ผลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกริยา ระยะเวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกริยาต่ออัตราการเกิดปฏิกริยา ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการทำปฏิกริยา 60 องศาเซลเซียส และความดัน 80 psig ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ conversion มากกว่า 98% โดยใช้เวลาในการทำปฏิกริยา 3 นาที นอกจากนี้ยังพบว่า การสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครแชนเนลมีประสิทธิภาพในการแยกแหว่งเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาได้ดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

Peiyong *et al.* (2010) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากสารตั้งต้นที่เป็นแอซิดออยล์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล (microstructured reactor) โดยได้ออกแบบให้เป็นการทำปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง 2 ขั้นตอน ซึ่งขั้นตอนแรกเป็นการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระในแอซิดออยล์ โดยใช้อัตราส่วนในการทำปฏิกิริยาระหว่างเมทานอลกับแอซิดออยล์เป็น 30 ต่อ 1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของปฏิกิริยาที่ 100 องศาเซลเซียสและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 7 นาที ทำให้ค่าความเป็นกรดของแอซิดออยล์เริ่มต้นจาก 160 มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม น้ำมัน ลดลงเป็น 1.1 มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม น้ำมัน จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนแรกมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันต่อในขั้นตอนที่สอง โดยใช้อัตราส่วนของเมทานอลต่อแอซิดออยล์ 20 ต่อ 1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที ผลการทดลองได้ FAME yield มากกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์

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

Peiyong *et al.* (2010) ศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยน้ำมันที่สกัดจากเมล็ดฝ้ายเป็นน้ำมันตั้งต้นโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล (microstructured reactor) ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสคือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวช่วยในการผสมต่างชนิดกัน คือ RIMM-mixer, SIMM-V2-mixer, T-mixer และ J - mixer พบว่า RIMM-mixer มีประสิทธิภาพสูงสุดในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลและรองลงมาคือ SIMM-V2-mixer T-mixer J - mixer ตามลำดับ นอกจากนี้ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบขนาดท่อที่ใช้ในส่วนการทำปฏิกิริยา โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ท่อสแตนเลสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.6 มิลลิเมตรและท่อที่ทำจากพอลิเทตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 8 ต่อ 1 ผลการทดลองที่ได้จากการใช้ท่อที่ทำจากพอลิเทตระฟลูออโรเอทิลีนซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 มิลลิเมตรเป็น

delay loop จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ FAME สูงถึง 99.5% และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 17 วินาที ส่วนการทดลองที่ใช้ท่อสแตนเลสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็น 0.6 มิลลิเมตร จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ FAME 94.8% และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 44 วินาที



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.1 ปฏิกรณ์ขนาดเล็กทำจาก PTFE เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.508 มิลลิเมตร ผลิตโดยบริษัท CHROMTECH, U.S.A

1.2 ตัวช่วยในการผสมขนาดเล็ก (T device) ผลิตโดยบริษัท CHROMTECH, U.S.A.

1.3 ปัมป์ไฮดรอลิกความดันสูง Alltech รุ่น 426 HPLC Pump

1.4 ตู้อบให้ความร้อน Memmert รุ่น UFB 400

1.5 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดถึงตำแหน่งที่ 3 AND รุ่น GF 300

1.6 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) Yamato Model BL - 31

1.7 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (thermocouple)

1.8 กรวยแยก (separatory funnel) Clasco ขนาด 250 ml

1.9 ปัมป์ไฮดรอลิกและสายน้ำเย็น Masterflex Model 77200 - 60

1.10 นาฬิกาจับเวลา

1.11 กระดาษกรองเบอร์ 1 และ เบอร์ 4 บริษัท Whatman

1.12 ปิ๊มสุญญากาศ

1.13 แผ่นฟิล์ม (laboratory film) ปิดบีกเกอร์และอุปกรณ์เครื่องแก้ว ยี่ห้อ Parafilm

1.14 เครื่องกวนแม่เหล็กและให้ความร้อน รุ่น C - MAG HS7 ยี่ห้อ IKA

1.15 เครื่องวัด pH มิเตอร์ Hanna pH211, U.S.A.

1.16 กล้องจุลทรรศน์ Celestron, U.S.A.

1.17 เครื่องแก้วและชุดอุปกรณ์แบบกะ (batch reactor)

2. การวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

2.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC-2010 บริษัท Shimadzu

2.2 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดถึงตำแหน่งที่ 4 รุ่น GF-300 ยี่ห้อ AND

2.3 หลอดหยด

2.4 ขวด Vial ขนาด 1 มิลลิลิตร

3. การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล

3.1 อุปกรณ์วัดความหนืด (Viscometer) Cannon – Fenske Routine Viscometer Serial number T 289 size 75

3.2 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath)

3.3 นาฬิกาจับเวลา

3.4 เทอร์โมมิเตอร์ ช่วงอุณหภูมิ 0 - 100 องศาเซลเซียส (ยี่ห้อ SK)

3.5 เครื่องวัดความหนาแน่น

3.6 เครื่องมือทดสอบจุดวาบไฟ (Pensky-martens Closed Flash Tester)

3.7 ชุดเครื่องมือวิเคราะห์จุดหมอกควันและจุดไหลเท

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาแบบไมโครฮานแนล

- 1.1 เมทานอล (CH_3OH) AR Grade จาก Merck
- 1.2 กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) AR grade จาก Merck
- 1.3 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) AR grade จาก Quality Reagent Chemical

Product

- 1.4 น้ำมันพืชใช้แล้วจากร้านค้าภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- 1.5 น้ำ DI

2. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

- 2.1 ฟีนอล์ฟทาลีน AR Grade จาก Ajax Finechem Pty Ltd.
- 2.2 2-Propanol AR Grade จาก Merck
- 2.3 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) AR grade จาก Quality Reagent Chemical

Product

3. การวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (ตามมาตรฐาน EN 14103)

- 3.1 Methyl Heptadecanoate ($\text{C}_{17:0}$) (ความบริสุทธิ์ 99%, บริษัท Fluka)
- 3.2 Normal heptane (ความบริสุทธิ์ 99%, บริษัท Fluka)
- 3.3 Tricaprin (Analytical Grade, บริษัท Fluka)

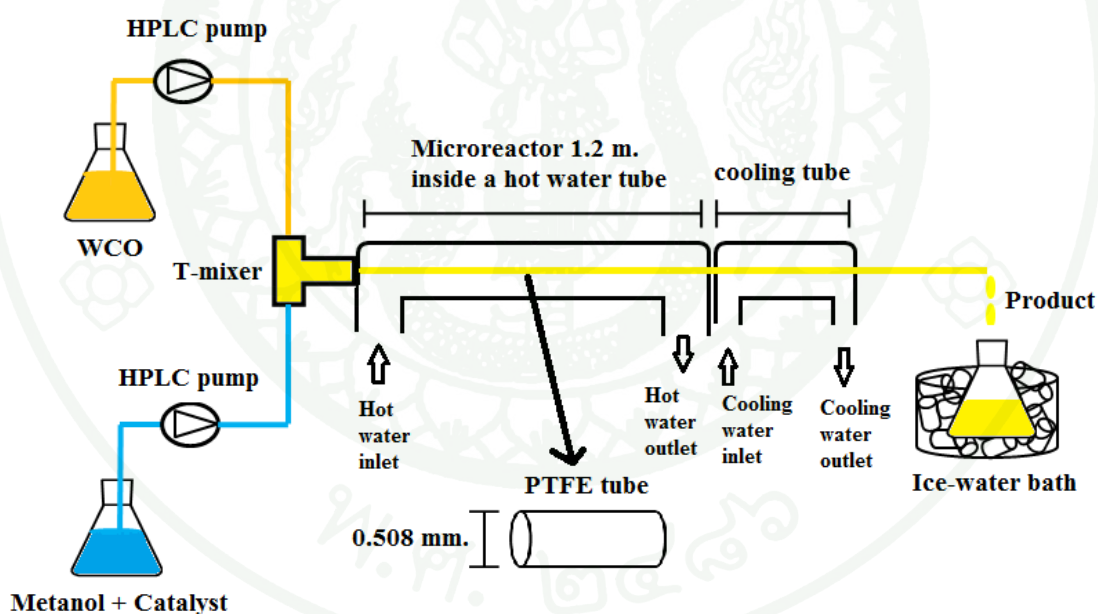
วิธีการ

1. ขั้นตอนการบำบัดน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้ว (Pre-treatment)

เนื่องจากวัตถุดิบเป็นน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้วจึงมีสิ่งเจือปนอยู่หลายชนิด จึงต้องกำจัดเศษอาหารที่ติดมากับน้ำมันพืชโดยการกรองน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 และเบอร์ 1 ตามลำดับ ด้วยระบบกรองแบบสุญญากาศ แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเป็นการกำจัดน้ำออกจากน้ำมันพืช

2. ผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล

2.1 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล



ภาพที่ 14 แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล

ติดตั้งท่อสำหรับนำสารเข้าทำปฏิกิริยาทั้งสองสาย (สายหนึ่งสำหรับเมทานอลและสายหนึ่งสำหรับน้ำมันตั้งต้น) โดยนำปลายท่อแต่ละด้านของแต่ละสายต่อกับเครื่องปั๊มแรงดันสูงทั้ง 2 เครื่อง โดยใช้ท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.508 มิลลิเมตร แล้วนำตัวช่วยในการผสม (T device) มา

ต่อที่ปลายท่อด้านที่เหลือซึ่งออกจากเครื่องปั๊มแรงดันสูงทั้ง 2 ท่อ เพื่อให้เกิดการผสมกันของ เมทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยาและน้ำมันตั้งต้น ส่วนของท่อด้านที่ออกจากตัวช่วยในการผสมเป็นส่วน ทำปฏิกิริยาโดยมีความยาว 1.2 เมตร ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ท่อส่วนสุดท้ายต่อเนื่องมาจากส่วนที่ทำปฏิกิริยามีการควบคุมอุณหภูมิให้เย็นเพื่อหยุดปฏิกิริยา ส่วนปลายท่อจะต่อเข้ากับภาชนะที่ใช้ในการเก็บผลิตภัณฑ์ โดยภาชนะนี้ถูกแช่ไว้ในถังน้ำแข็ง ชุดอุปกรณ์การทดลอง ดังกล่าวแสดงในภาพที่ 14

2.2 ขั้นตอนที่ 1 : ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เตรียมเมทานอลในปริมาณที่ได้คำนวณไว้ หยดสารเคมีที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ กรด ซัลฟิวริกตามน้ำหนักที่ได้คำนวณไว้ในเมทานอลที่เตรียมไว้ข้างต้นเพื่อให้ได้อัตราส่วนตาม ต้องการ ป้อนน้ำมันพืชใช้แล้วที่ผ่านการกรองแล้วโดยใช้ปั๊มแรงดันสูงเข้าไปที่ตัวช่วยในการผสม พร้อมกับป้อนเมทานอลที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาผสมอยู่แล้วเข้าไปที่ตัวช่วยในการผสมเช่นกัน โดยปรับ อัตราการไหลของน้ำมันและเมทานอลที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาผสมอยู่ด้วยปั๊มแรงดันสูงดังที่ได้คำนวณไว้ ป้อนน้ำร้อนไปที่ส่วนท่อทำปฏิกิริยาเพื่อควบคุมให้ได้อุณหภูมิดังที่ต้องการ ป้อนน้ำเย็นไปที่ท่อ ส่วนสุดท้ายซึ่งต่อจากปฏิกิริยาเพื่อหยุดปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกเก็บไว้ในภาชนะที่แช่อยู่ในถัง น้ำแข็ง เมื่อได้ผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่ต้องการ จะเทผลิตภัณฑ์ที่ได้ลงในกรวยแยก ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ทำการไขผลิตภัณฑ์ที่อยู่ด้านล่าง แล้วนำผลิตภัณฑ์ไปล้างในกรวยแยกด้วยน้ำ DI อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ทำการล้างซ้ำจนกระทั่งน้ำล้างมีค่า pH เท่ากับน้ำ DI เริ่มต้นที่ใช้ นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ มาผ่านกระบวนการต้มกำจัดน้ำที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แบ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid Value) และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำปฏิกิริยาต่อในขั้นตอน ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

2.3 ขั้นตอนที่ 2 : ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ซังสารเคมีที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ตามน้ำหนักที่ได้ คำนวณไว้ แล้วนำไปละลายลงในเมทานอลในปริมาณที่ได้คำนวณไว้เช่นกัน เพื่อให้ได้อัตราส่วน ตามต้องการ ป้อนน้ำมันที่ได้จากขั้นตอนเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ปั๊มแรงดันสูงเข้าไปที่ตัวช่วยใน การผสมพร้อมกับป้อนเมทานอลที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาผสมอยู่แล้วเข้าไปที่ตัวช่วยในการผสมเช่นกัน โดยปรับอัตราการไหลของน้ำมันและเมทานอลที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาผสมอยู่ด้วยปั๊มแรงดันสูงดังที่ได้

คำนวณไว้ ป้อนน้ำร้อนซึ่งมีอุณหภูมิดังที่ได้ออกแบบไว้ไปที่ส่วนท่อทำปฏิกิริยาเพื่อทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิที่ต้องการและป้อนน้ำเย็นไปที่ท่อส่วนสุดท้ายซึ่งต่อจากส่วนที่ทำปฏิกิริยาเพื่อหยุดปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกจากปล่อยท่อซึ่งจะถูกเก็บไว้ในภาชนะที่แช่อยู่ในถังน้ำแข็ง เมื่อได้ผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่ต้องการ จะเทผลิตภัณฑ์ที่ได้ลงในกรวยแยก ตั้งทิ้งไว้ 8 ชั่วโมง แล้วทำการไขเกลีเซอร์อลที่อยู่ชั้นล่างออก นำเมทิลเอสเทอร์ที่อยู่ด้านบนไปทำการล้างผลิตภัณฑ์ในกรวยแยกด้วยน้ำ DI อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ทำการล้างซ้ำจนกระทั่งน้ำล้างมีค่า pH เท่ากับน้ำ DI เริ่มต้นที่ใช้ นำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มาผ่านกระบวนการดัดน้ำที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แบ่งตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์ไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์และคุณสมบัติต่างๆ

3. ผลิตภัณฑ์เซลล์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

3.1 ขั้นตอนที่ 1 : ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ซึ่งน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้วตามปริมาณที่ได้คำนวณไว้ใส่ลงในขวดก้นกลม แล้วอุ่นจนได้อุณหภูมิที่ต้องการ เตรียมเมทานอลและกรดซัลฟิวริกตามอัตราส่วนโดยโมลที่กำหนด เติมน้ำมันอลและกรดซัลฟิวริกที่เตรียมไว้ผสมกับน้ำมันที่อยู่ในขวดก้นกลม ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 15 ในการทำปฏิกิริยาต้องควบคุมอุณหภูมิและอัตราเร็วการกวนเท่ากับ 100 รอบต่อนาที ให้คงที่ตลอดระยะเวลาที่กำหนด เมื่อทำปฏิกิริยาจนครบกำหนดเวลาที่ตั้งไว้ นำขวดก้นกลมไปแช่ในน้ำเย็นอย่างรวดเร็วเพื่อหยุดปฏิกิริยา หลังจากนั้นเทผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในขวดก้นกลมลงในกรวยแยก ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ทำการไขผลิตภัณฑ์ที่อยู่ด้านล่าง แล้วนำผลิตภัณฑ์ไปล้างในกรวยแยกด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ทำการล้างซ้ำจนกระทั่งน้ำล้างมีค่า pH เท่ากับน้ำ DI เริ่มต้นที่ใช้ นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาผ่านกระบวนการดัดน้ำที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid Value)



ภาพที่ 15 แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

3.2 ขั้นตอนที่ 2 : ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนที่หนึ่งมาชั่งน้ำหนัก แล้วใส่ลงในขวดก้นกลม อุ่นจนได้อุณหภูมิที่ต้องการ เตรียมเมทานอลตามอัตราส่วนโดยโมลที่กำหนดไว้ ซึ่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และนำไปละลายในเมทานอลที่เตรียมไว้ จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมไว้ผสมกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนที่หนึ่งในขวดก้นกลม ชุดอุปกรณ์การทดลองแสดงดังภาพที่ 15 เมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาตามเวลาที่ได้กำหนดไว้จึงเทผลิตภัณฑ์ที่ได้ลงในกรวยแยก ตั้งทิ้งไว้ 8 ชั่วโมง แล้วทำการไขกลีเซอรอลที่อยู่ชั้นล่างออก นำเมทิลเอสเทอร์ที่อยู่ด้านบนไปทำการล้างผลิตภัณฑ์ในกรวยแยกด้วยน้ำ DI ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ทำการล้างซ้ำจนกระทั่งน้ำล้างมีค่า pH เท่ากับน้ำ DI เริ่มต้นที่ใช้ นำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มาผ่านกระบวนการดื่มน้ำที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

4. ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้

4.1 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

ชั่งไบโอดีเซลที่ต้องการวิเคราะห์ 5 กรัมใส่ขวดรูปชมพู่ เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร หยดฟีนอล์ฟทาลีน 2 - 3 หยดแล้วเขย่าให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำสารละลายผสมที่

ได้มาไตเตรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 N สารละลายจะเปลี่ยนจากสีของน้ำมันไปเป็นสีชมพูที่จุดยุติ บันทึกปริมาตรสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเป็นกรด ดังสมการที่ 1

$$\text{ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)} = \frac{V \times 56.1 \times 0.1}{m} \quad (1)$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)

m คือ น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ใช้ในการหาค่าความเป็นกรด (กรัม)

4.2 การวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์

ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) โดยใช้ Methyl Heptadecanoate (C17:0) เป็นสารมาตรฐานภายใน (Internal Standard) ตามมาตรฐาน EN 14103 สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ได้ดังสมการที่ 2

$$\text{เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์} = \frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{M} \times 100 \quad (2)$$

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

A_{EI} = พื้นที่ใต้กราฟของ C17:0

C_{EI} = ความเข้มข้นของ C17:0 ที่ใช้ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

V_{EI} = ปริมาตร C17:0 ที่ใช้ (ไมโครลิตร)

M = น้ำหนักไบโอดีเซลที่ใช้ (มิลลิกรัม)

ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้วโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ปฏิกริยาที่ใช้เป็นแบบสองขั้นตอน (ขั้นตอนแรกใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและขั้นตอนที่ 2 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) โดยทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ดังนี้ ในขั้นตอนแรกทำการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันในช่วง 4.5:1 ถึง 18:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกระหว่าง 0.5 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่าง 5 ถึง 20 วินาที และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาระหว่าง 55 ถึง 70 องศาเซลเซียส โดยมีเป้าหมายเพื่อลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้วให้มีค่าต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมไขมัน หลังจากนั้นจึงนำน้ำมันพืชใช้แล้วที่ผ่านการลดค่าความเป็นกรดจากสถานะที่เหมาะสมในขั้นตอนแรกไปทำการศึกษาต่อในขั้นตอนที่สอง ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันในช่วง 4.5:1 ถึง 12:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ระหว่าง 0.5 ถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่าง 5 ถึง 20 วินาที และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาระหว่าง 50 ถึง 70 องศาเซลเซียส โดยมีเป้าหมายเพื่อผลิตไบโอดีเซลที่มีค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงสุด แล้วจึงนำไบโอดีเซลจากสถานะที่ดีที่สุดในขั้นตอนที่สองไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เช่น ความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ จุดไหลเทและค่าความเป็นกรด เป็นต้น

เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้วซึ่งผ่านความร้อนสูงในกรรมวิธีประกอบอาหาร รวมทั้งยังมีสิ่งเจือปนอยู่หลายชนิด ทำให้สมบัติทางกายภาพและทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นหลังจากผ่านขั้นตอนการบำบัดแล้ว จึงต้องนำน้ำมันไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติ องค์ประกอบ ปริมาณและชนิดของกรดไขมัน ก่อนที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล โดยผลจากการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1. สมบัติและองค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้ว

ขั้นตอนเริ่มต้นด้วยการนำน้ำมันพืชใช้แล้วไปกรองเพื่อกำจัดเศษอาหารและกำจัดน้ำที่ปะปนอยู่ด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังนี้

1.1 ปริมาณและชนิดของกรดไขมันในน้ำมันพืชใช้แล้ว

ปริมาณและชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันพืชมีความแตกต่างกันไปตามประเภทของพืชที่เป็นแหล่งวัตถุดิบและสภาพภูมิอากาศในการเจริญเติบโต ดังนั้นในตารางที่ 5 จึงแสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณและชนิดของกรดไขมันในน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC/MS) ดังนี้

ตารางที่ 5 ปริมาณและชนิดของกรดไขมันของน้ำมันพืชใช้แล้ว

กรดไขมัน		น้ำหนักโมเลกุล	สัดส่วนของกรดไขมัน ในน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้ว (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
ชื่อ	โครงสร้าง		
Lauric	C12:0	200.32	4.2
Myristic	C14:0	228.38	7.55
Palmitic	C16:0	256.43	30.08
Palmitoleic	C16:1	254.41	0.32
Stearic	C18:0	284.43	3.56
Oleic	C18:1 n-9 cis	282.47	37.61
Linoleic	C18:2 n-6 cis	280.45	16.26
Linolenic	C18:3 n-3	278.44	0.42

ผลจากการวิเคราะห์พบว่าชนิดของกรดไขมันที่มีมากที่สุดคือน้ำมันพืชใช้แล้ว คือ กรดโอเลอิก (Oleic) 37.61 เปอร์เซ็นต์ กรดปาล์มมิติก (Palmitic) 30.08 เปอร์เซ็นต์ กรดลิโนเลอิก (Linoleic) 16.26 เปอร์เซ็นต์และกรดชนิดอื่นๆอีก 16.05 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แบ่งเป็นกรดไขมันอิ่มตัว 45.39 เปอร์เซ็นต์และกรดไขมันไม่อิ่มตัว 54.61 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ปริมาณและชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันเป็นปัจจัยสำคัญหลักที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้ เช่น น้ำมันตั้งต้นที่มีกรดไขมันอิ่มตัวในปริมาณมากจะทำให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติของจุดหมอกควัน (Cloud point) เลขซีเทน (Cetane number) และค่าเสถียรภาพ (Stability) ที่สูง แต่ในทางกลับกันกรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมันตั้งต้นที่สูงจะทำให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติของจุดหมอกควัน เลขซีเทนและค่าเสถียรภาพที่ต่ำ (Ramadhas *et al.*, 2005)

1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชใช้แล้ว

น้ำมันพืชใช้แล้วเป็นน้ำมันที่ผ่านการได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงจากกระบวนการประกอบอาหาร ดังนั้นจึงทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชใช้แล้วมีการเปลี่ยนแปลงไปจากน้ำมันพืชใหม่ ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชใช้แล้วแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชใช้แล้ว

ตัวแปร	หน่วย	ค่าที่ได้
สี	-	สีส้มเข้ม
ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	มิลลิเมตร ² ต่อวินาที	19.535
ความหนาแน่นที่ 15 องศาเซลเซียส	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	905
ค่าความป็นกรด	มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมไขมัน	3.96
ปริมาณกรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์	1.99

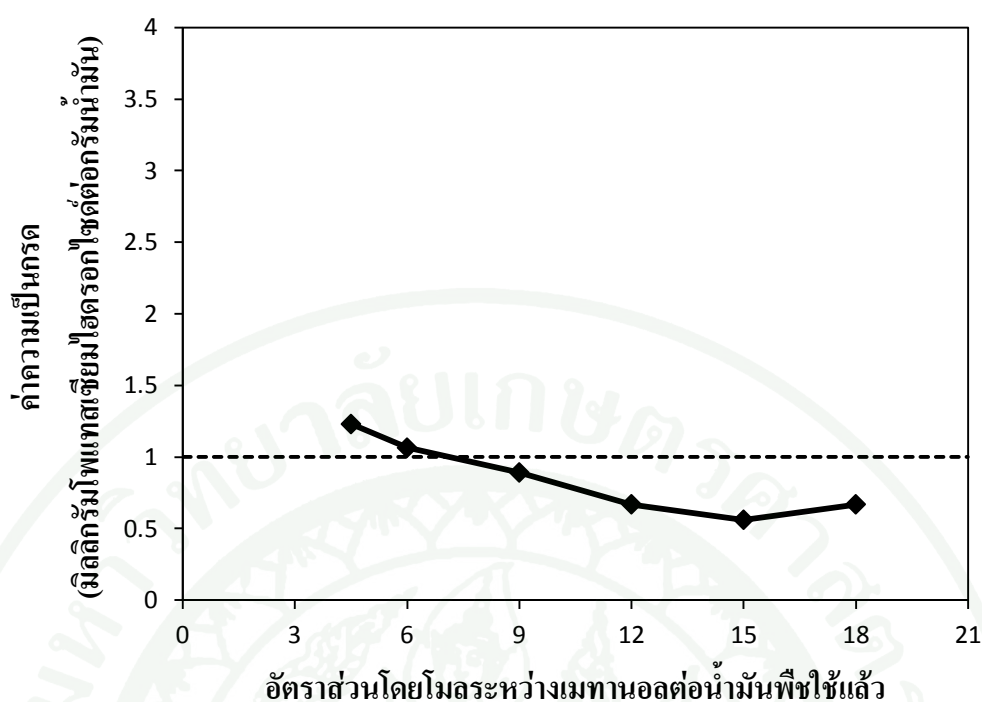
จากตารางที่ 6 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้ว พบว่าน้ำมันพืชใช้แล้วมีค่าความหนืด 19.535 เซนติสโตกส์ ความหนืดดังกล่าวทำให้คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืชใช้แล้วไม่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรง เพราะความหนืดที่สูงจะทำให้ฉีดเป็นฝอยได้ยากและเกิดการสันดาปไม่สมบูรณ์ น้ำมันพืชใช้แล้วมีค่าความเป็นกรด 3.96 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมไขมันหรือค่ากรดไขมันอิสระเท่ากับ 1.99 เปอร์เซ็นต์ ในงานวิจัยของ Felizardo *et al.* (2006) และ Zhang *et al.* (2003) ได้ระบุไว้ว่าน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ควรมีค่าความเป็นกรดน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมไขมันหรือมีปริมาณกรดไขมันอิสระน้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อหลีกเลี่ยงปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชันระหว่างกรดไขมันอิสระกับเบสแล้วเกิดผลิตภัณฑ์เป็นสบู่ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นน้ำมันพืชใช้แล้วที่ใช้ในการศึกษานี้จึงเหมาะสมกับการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน นอกจากนี้ผลการศึกษาสมบัติและองค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้วยังสามารถนำไปคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้วได้เท่ากับ 826.84 กรัมต่อโมล ดังแสดงในภาคผนวก ก

2. ผลของการทดลองในขั้นตอนที่ 1 ปฏิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโคร ชาแนล

ขั้นตอนที่ 1 ปฏิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระกับเมทานอลเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้วให้มีค่าน้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ หรือมีค่าความเป็นกรดน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน เนื่องจากค่าความเป็นกรดจะมีค่าประมาณ 2 เท่าของปริมาณกรดไขมันอิสระ (Tiwari *et al.*, 2007) ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังนี้ ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

2.1. ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว

ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วที่มีผลต่อค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้ว อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วที่ใช้ในการทดลองคือ 4.5:1, 6:1, 9:1, 12:1, 15:1 และ 18:1 โดยมีสภาวะการทดลองอื่นๆ คงที่ ดังต่อไปนี้ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 16



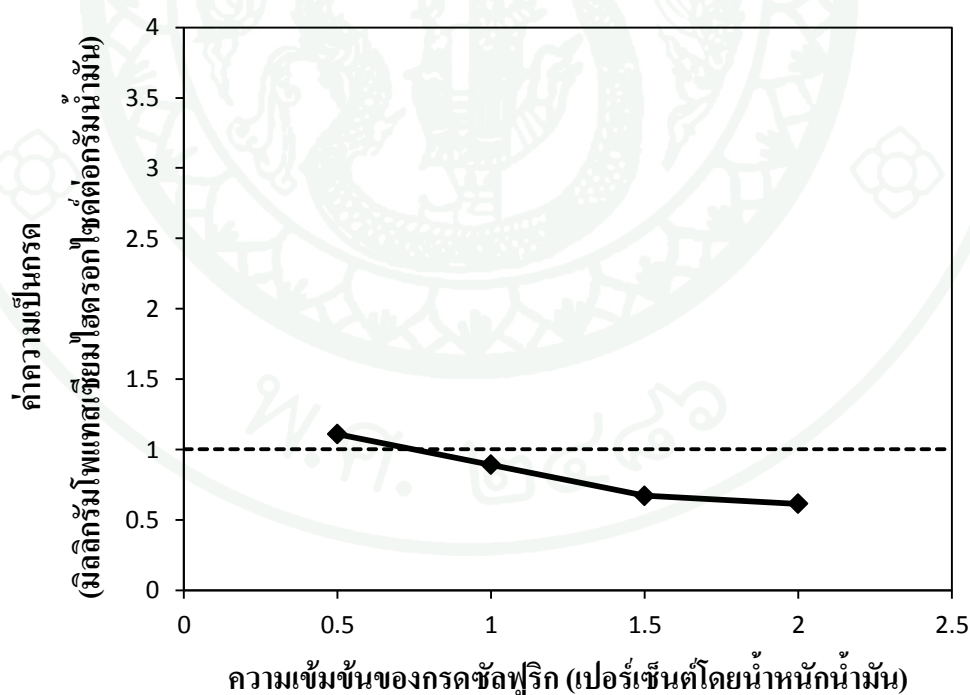
ภาพที่ 16 ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มในขั้นตอนที่ 1 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มระหว่าง 4.5:1 ถึง 15:1 จะมีค่าความเป็นกรดลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเพิ่มสูงขึ้น จนมีค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ต่ำที่สุดเมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มมีค่าเท่ากับ 15:1 จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นปริมาณแอลกอฮอล์ที่มากเกินไปจึงเป็นที่ต้องการเพื่อให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางขวา แต่เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มมากกว่า 15:1 ปรากฏว่าค่าความเป็นกรดมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณเมทานอลที่มากเกินไปจะส่งผลให้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ทำให้ประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยามีค่าต่ำลง (Zhang *et al.*, 2008) ผลการทดลองดังกล่าวมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Peiyong *et al.* (2010) ที่ได้ทำการทดลองศึกษาการผลิตไบโอดีเซล โดยพบว่าในช่วงแรกเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อกรดโอเลอิกเพิ่มขึ้นจาก 10:1 ถึง 40:1 จะส่งผลให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อกรดโอเลอิกเพิ่มขึ้นมากกว่า 50:1 ค่าการเปลี่ยนแปลง

ของกรดไขมันอิสระจะลดลง จากการศึกษาในปัจจุบันพบว่าค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้ว จะเริ่มมีค่าต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระใน น้ำมันพืชใช้แล้วให้มีค่าต่ำกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์หรือมีค่าความเป็นกรดต่ำกว่า 1 มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

2.2 ผลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1

จากการศึกษาค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้ว เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ กรดซัลฟิวริกซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 โดยทดลองที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 0.5, 1, 1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน และกำหนดให้สภาวะการทดลองอื่นๆ คงที่ ดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 17

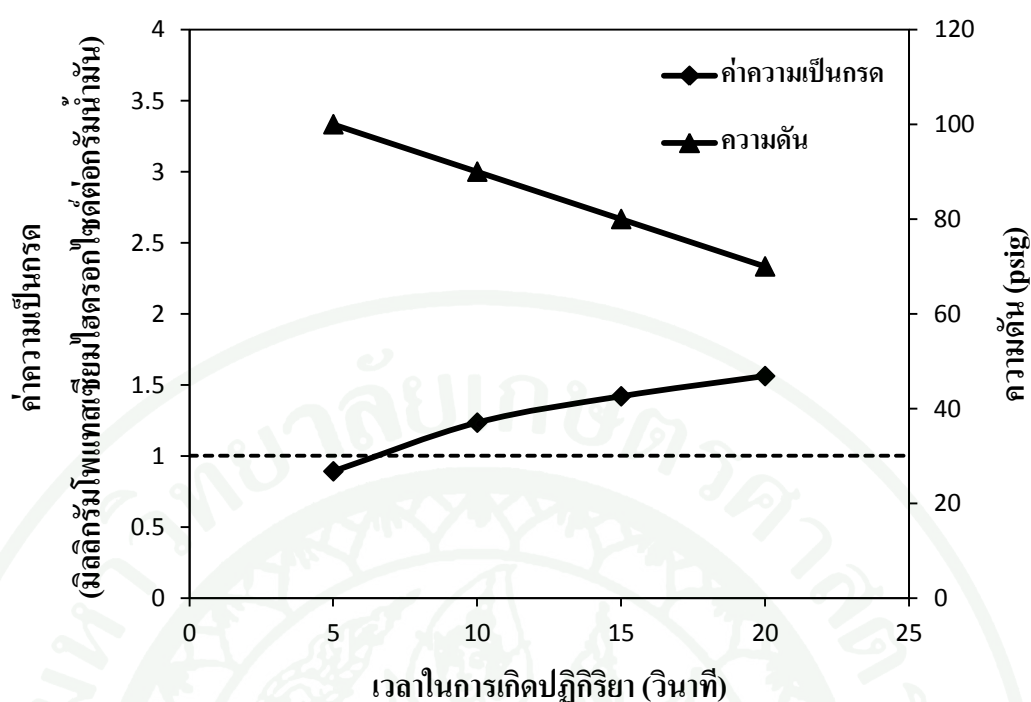


ภาพที่ 17 ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกใน ขั้นตอนที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกระหว่าง 0.5 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมัน ส่งผลให้ค่าความเป็นกรดลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันให้เกิดได้เร็วขึ้น จึงทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้วมีปริมาณลดลงหรือทำให้ค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้วมีค่าลดลง แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกมากกว่า 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน จะมีค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างคงที่ ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เกิดขึ้นมาถึงจุดสมดุลของปฏิกิริยา ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Freedman *et al.* (1984) ซึ่งนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการศึกษาในปัจจัยดังกล่าวนี้จะพบว่าค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้วจะเริ่มมีค่าต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้วให้มีค่าต่ำกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์หรือมีค่าความเป็นกรดต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

2.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1

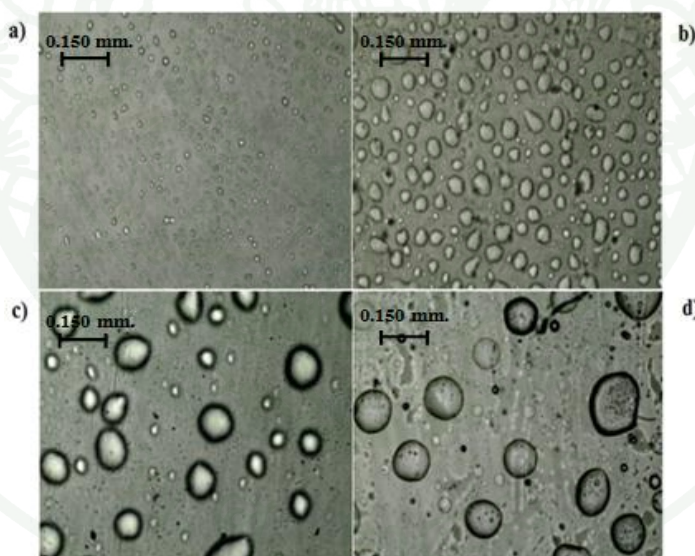
ทำการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 5-20 วินาที ที่มีต่อค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยมีสภาวะการทดลองอื่นๆ คงที่ ดังต่อไปนี้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 18



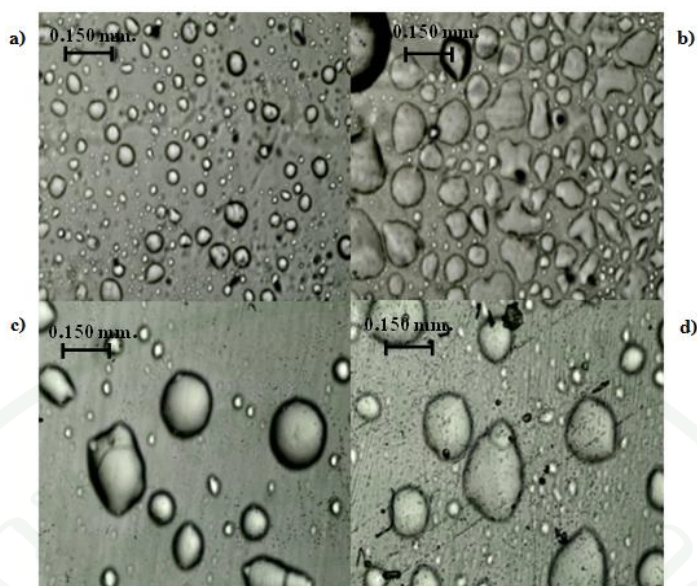
ภาพที่ 18 ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์และความดันที่เกิดขึ้นภายในระบบ เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองพบว่าการใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้การลดลงของค่าความเป็นกรดต่ำลง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเลือกใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาสั้นจะต้องปรับอัตราการไหลของน้ำมันพืชใช้แล้ว เมทานอลและกรดซัลฟิวริกให้เพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้ความดันที่เกิดขึ้นภายในระบบ (วัดความดันจากปั๊มที่ป้อนสายเมทานอล) มีค่าเพิ่มขึ้นและทำให้สารตั้งต้นเหล่านี้เข้าไปผสมกันได้ดีขึ้นในตัวช่วยการผสมและในท่อปฏิกิริยา ภาพที่ 19 แสดงขนาดของหยดวัฏภาคหลังออกจากตัวช่วยการผสมแบบที (T mixers) ซึ่งเกิดจากการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5, 10, 15 และ 20 วินาที โดยมีขนาดของหยดวัฏภาคที่เกิดขึ้นดังนี้ 0.014, 0.043, 0.114 และ 0.129 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าขนาดของหยดวัฏภาคหลังออกจากตัวช่วยการผสมแบบทีสำหรับสถานะที่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที มีขนาดเล็กที่สุดและมีความหนาแน่นของการกระจายสูงจากความดันในระบบที่มีค่าสูง จึงส่งผลให้มีการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่ดีกว่าสถานะที่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานกว่า ซึ่งจะมีขนาดของหยดวัฏภาคที่ใหญ่ขึ้นและมีการกระจายตัวที่หนาแน่นน้อยลง สอดคล้องกับภาพที่ 20 แสดงขนาดของหยดวัฏภาคหลังออกจากเครื่องปฏิกิริยาแบบไมโครชาแนล สำหรับสถานะที่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 5, 10, 15 และ 20 วินาที โดยมีขนาด

หยดวิภาคที่เกิดขึ้นดังนี้ 0.050, 0.079, 0.157 และ 0.171 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยผลการทดลองที่ได้ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Dias *et al.* (2009) ซึ่งได้ทำการทดลองลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันหมูใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันซึ่งมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความเป็นกรดของน้ำมันหมูใช้แล้วลดลง ทั้งนี้ผลการทดลองที่ขัดแย้งกันอาจเป็นเพราะการใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่ต่างชนิดกัน เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นท่อที่มีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของผู้อื่น จากผลการทดลองศึกษาในปัจจุบันนี้แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวสัมผัสของวิภาคมีอิทธิพลต่อการลดลงของค่าความเป็นกรดมากกว่าเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน แม้ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากขนาดหยดวิภาคที่ใหญ่และมีการกระจายตัวที่หนาแน่นน้อยลงจึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ไม่ดี โดยพบว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 วินาทีจะส่งผลให้ได้ค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้วต่ำที่สุด ดังนั้นในการทดลองเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้วให้มีค่าต่ำกว่า 0.5 เปอร์เซนต์หรือมีค่าความเป็นกรดต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จึงเลือกใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่ 5 วินาที



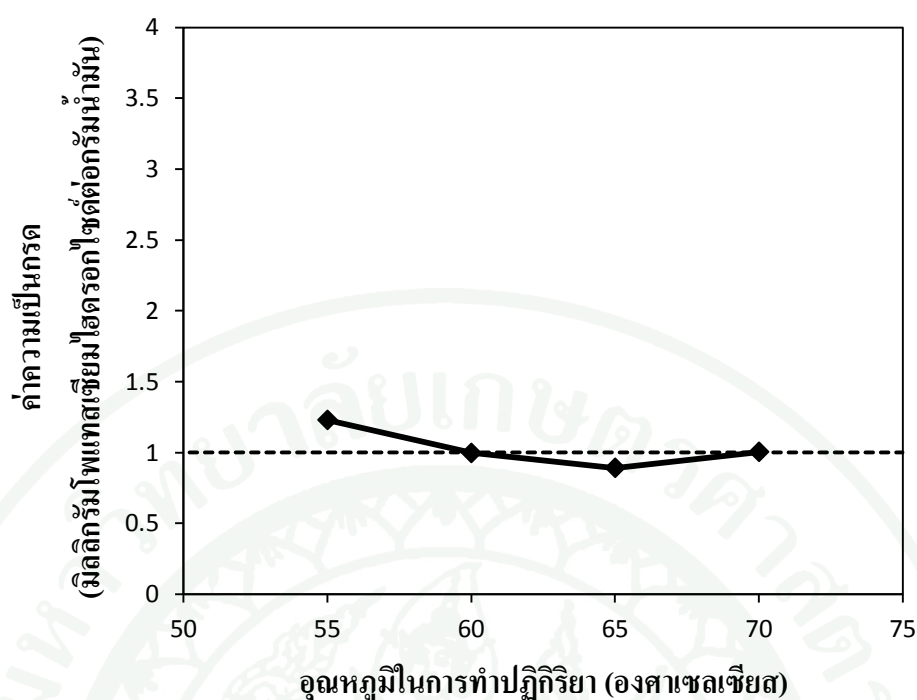
ภาพที่ 19 ขนาดของหยดวิภาคหลังจากตัวช่วยการผสมแบบที (T mixer) ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ในขั้นตอนที่ 1 : a) 5 วินาที, b) 10 วินาที, c) 15 วินาที, d) 20 วินาที โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักน้ำมันและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 20 ขนาดของหยดวิภาคหลังออกจากเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ในขั้นตอนที่ 1 : a) 5 วินาที, b) 10 วินาที, c) 15 วินาที, d) 20 วินาที โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส

2.4 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1

จากการศึกษาค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้ว เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันในขั้นตอนที่ 1 โดยทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ 55, 60, 65 และ 70 องศาเซลเซียส โดยกำหนดให้สภาวะการทดลองอื่นๆ คงที่ ดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 วินาที ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 วินาที

จากผลการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรดลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นสำหรับช่วงอุณหภูมิ 55-65 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้น้ำมันมีความหนืดลดลงและมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันสูงขึ้น ดังนั้นจึงทำให้กรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้วมีปริมาณลดลงหรือส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้วมีค่าลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงกว่า 65 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้วจะเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิดังกล่าวมีค่าสูงกว่าจุดเดือดของเมทานอลซึ่งเป็นสารตั้งต้น จึงส่งผลให้เมทานอลเกิดการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวกลายเป็นไอ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ด้วยเหตุนี้การทดลองในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้วให้มีค่าต่ำกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์หรือมีค่าความเป็นกรดต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จึงเลือกใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ 65 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ต่ำที่สุด

จากการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในขั้นตอนที่ 1 สามารถสรุปสถานะที่เหมาะสมในการลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลได้ดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส

3. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลและเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

จากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลและเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยกำหนดให้สภาวะการทดลองต่างๆที่ ดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลและเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

ชนิดเครื่องปฏิกรณ์	เวลาในการทำปฏิกิริยา(นาท)	การเปลี่ยนแปลง (%)	อัตราการไหลหรือปริมาตร
เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล	0.083 นาท (5 วินาที)	77.53	2.92 มิลลิลิตรต่อนาที
เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	30 นาท	76	42.43 มิลลิลิตร

จากผลการทดลองพบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลซึ่งใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน 5 วินาที จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง 77.53 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะจะต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากถึง 30 นาท จึงจะให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระไปเป็นกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ที่ใกล้เคียงกัน โดยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 76 เปอร์เซ็นต์เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาท ทั้งนี้พบว่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลมีระยะเวลาสั้นกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ 360 เท่า จากผลการทดลองดังกล่าวจะเห็นว่าเครื่องปฏิกรณ์

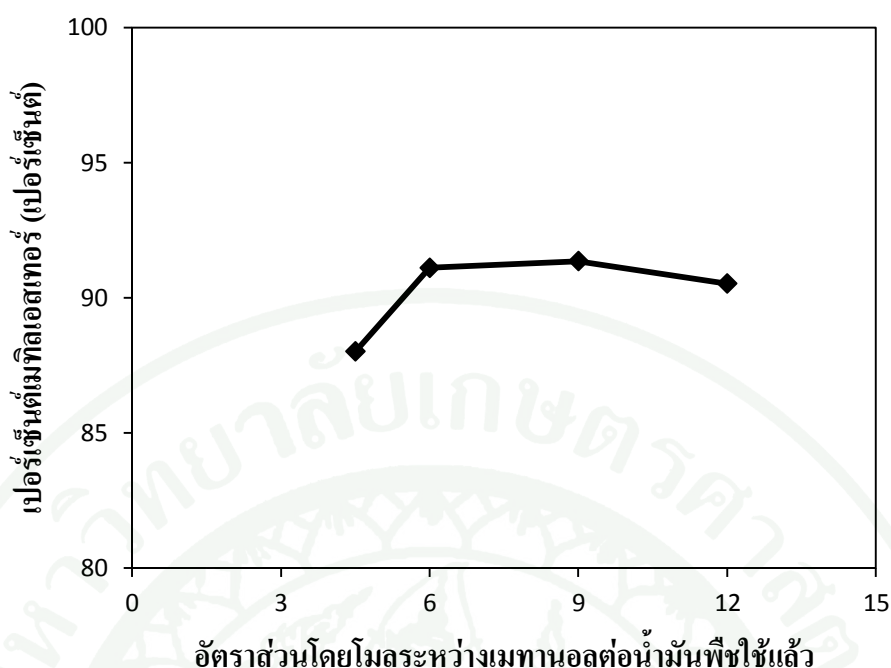
แบบไมโครชาแนลมีประสิทธิภาพสูงมากในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลมีอัตราส่วนระหว่างปริมาตรต่อพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูง มีระยะทางในการแพร่ที่สั้นและมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ดี (Kobayashi, 2006)

4. ผลของการทดลองในขั้นตอนที่ 2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล

น้ำมันพืชใช้แล้วซึ่งถูกลดค่าความเป็นกรดให้มีค่าต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมันจากสภาวะที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1 ถูกนำมาใช้เป็นน้ำมันตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซลในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอลเพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังนี้ ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

4.1. ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วในขั้นตอนที่ 2

ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันไบโอดีเซล อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วที่ใช้ในการทดลองคือ 4.5:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 โดยมีสภาวะการทดลองอื่นๆ คงที่ ดังต่อไปนี้ ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 22



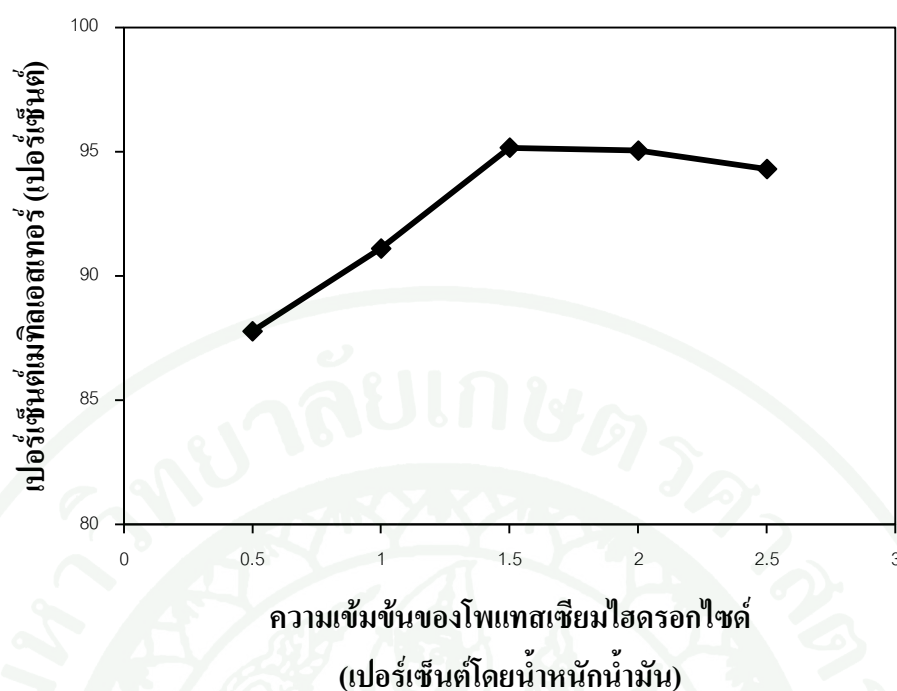
ภาพที่ 22 ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซล เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 4.5:1 ถึง 6:1 เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสำหรับ 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์ ต้องการใช้เมทานอลอย่างน้อย 3 โมลเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้อย่างสมบูรณ์ แต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยาผันกลับมาเป็นสารตั้งต้นได้ ดังนั้นหากมีการเพิ่มแอลกอฮอล์ในปริมาณที่มากขึ้นจะสามารถผลักดันให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าเพื่อเกิดเป็นไบโอดีเซลได้มากขึ้น (Dennis *et al.*, 2010) และเมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเพิ่มขึ้นมากกว่า 6:1 จะมีค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ค่อนข้างคงที่ เนื่องจากไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นถูกเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาที่ดำเนินไปข้างหน้าอย่างสมบูรณ์แล้ว ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเมทานอลจึงไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาอีก แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วมากกว่า 9:1 ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะเมทานอลที่มากเกินไปจะส่งผลให้กลีเซอรอลมีความสามารถในการละลายในเมทิลเอสเทอร์ได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมทานอลมีหมู่ไฮดรอกซิลที่รูปร่างสามารถทำหน้าที่เป็นตัวอิมัลซิฟายเออร์ได้ (Xin Deng *et al.*, 2010) ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์

เมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลง ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Meng *et al.* (2008) ซึ่งทำการศึกษการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเมทานอลและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วคือ 6:1 ซึ่งให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของไตรกลีเซอไรด์เป็นเมทิลเอสเทอร์ 89.8 เปอร์เซ็นต์ ในการศึกษาปัจจุบันนี้เลือกใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีค่าสูงสุด

4.2 ผลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2

จากการศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันไบโอดีเซล เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 โดยทดลองที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน และกำหนดให้สภาวะการทดลองอื่นๆ คงที่ ดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 23



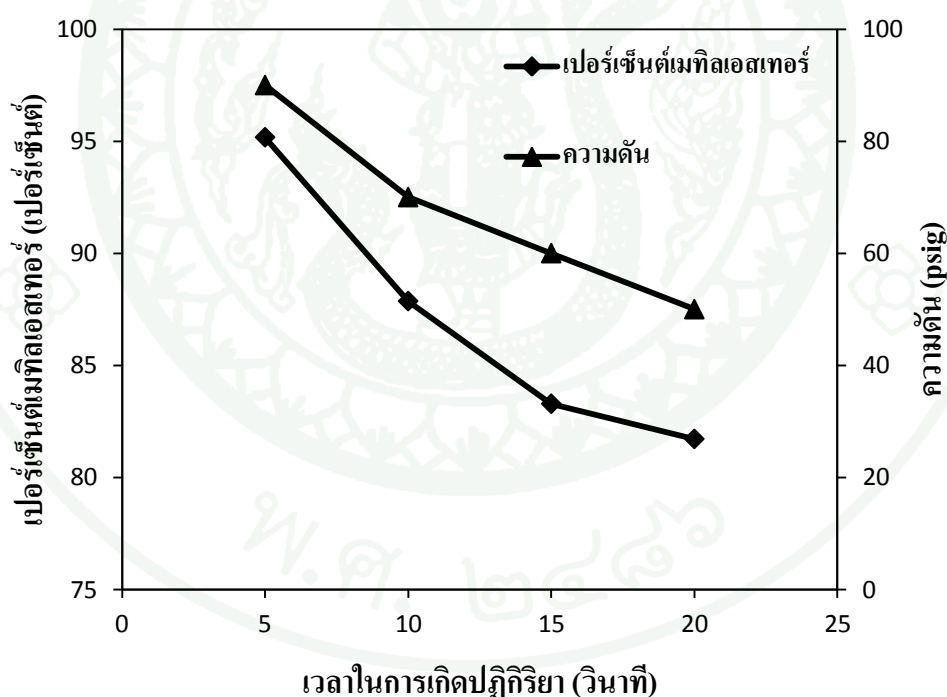
ภาพที่ 23 ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซล เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส

การใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ระหว่าง 0.5 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันจะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากขึ้นจะช่วยให้อัตราการเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้ไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในน้ำมันเปลี่ยนไปเป็นเมทิลเอสเทอร์ได้มากขึ้น (Leung and Guo, 2006) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 1.5 ถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน จะพบว่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไปจะทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสบู่ที่มากขึ้น (Eevera *et al.*, 2009) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Piyanuch and Sasiwimol (2010) ที่ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว โดยทำการทดลองแบบสองขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ จากผลการทดลองในขั้นตอนที่สองโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่เมื่อที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่า 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน จะส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์

เมทิลเอสเทอร์ลดลง จากการทดลองศึกษาในปัจจุบันนี้พบว่าค่าเมทิลเอสเทอร์มีค่าสูงสุด เมื่อใช้ปริมาณความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณความเข้มข้นดังกล่าวเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล

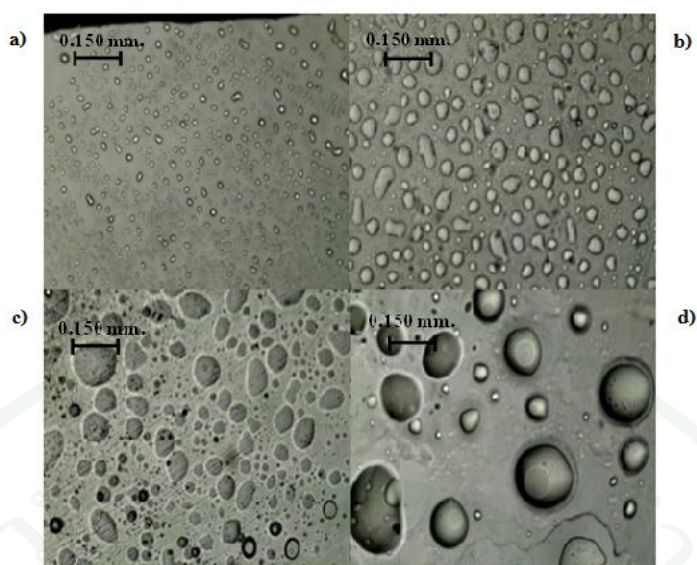
4.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2

การศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันไบโอดีเซลทำโดยกำหนดให้เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 วินาที ในขณะที่มีสถานะการทดลองอื่นๆ คงที่ ดังต่อไปนี้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลและความดันที่เกิดขึ้นภายในระบบ เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส

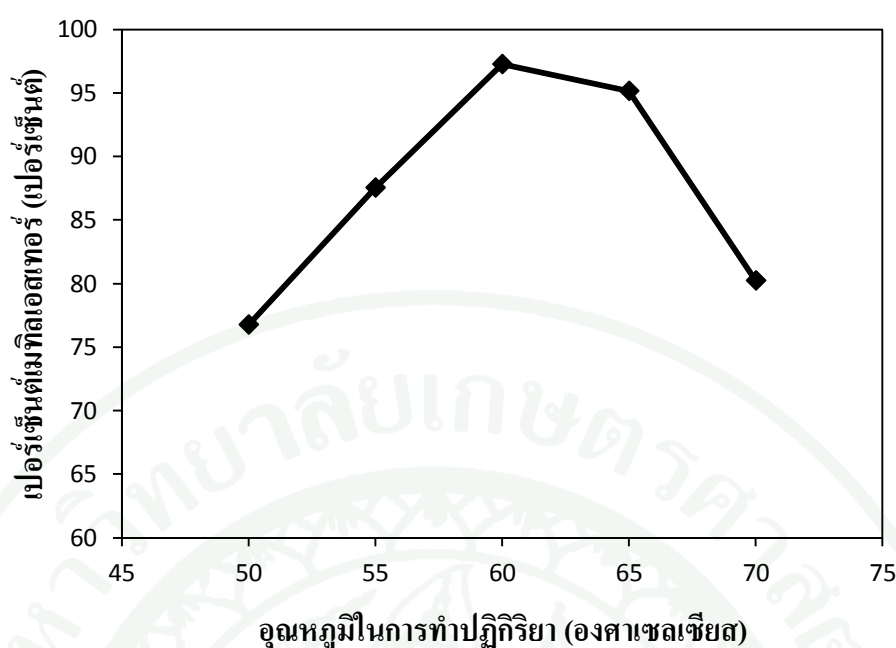
จากผลการทดลองพบว่าการใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันไบโอดีเซลลดลง ทั้งนี้การกำหนดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาทำโดยการปรับอัตราการใช้ของสารละลายเมทานอลและน้ำมันพืชให้แล้ว ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่สั้นหมายถึงอัตราการป้อนที่เร็ว ซึ่งส่งผลให้ความดันภายในระบบ (วัดความดันจากปั๊มที่ป้อนสายเมทานอล) สูงขึ้นและทำให้สารตั้งต้นเหล่านี้เข้าไปผสมกันได้ดีขึ้นในตัวช่วยการผสมและในท่อเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล จากภาพที่ 25 แสดงขนาดของหยดวัฏภาคหลังออกจากตัวช่วยการผสมแบบที (T mixers) ซึ่งเกิดจากการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5, 10, 15 และ 20 วินาที โดยมีขนาดของหยดวัฏภาค 0.013, 0.036, 0.71 และ 0.121 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีจะเห็นได้ว่าขนาดของหยดวัฏภาคหลังออกจากตัวช่วยการผสมแบบทีมีขนาดเล็กที่สุดและมีความหนาแน่นของวัฏภาคสูงจากความดันภายในระบบที่สูง จึงส่งผลให้มีการเกิดปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันที่ดีกว่าการเลือกใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานกว่า ซึ่งได้ขนาดของหยดวัฏภาคที่ใหญ่ขึ้นและมีความหนาแน่นลดลง ผลการทดลองที่ได้ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sun *et al.* (2010) ที่ทำการทดลองผลิตน้ำมันไบโอดีเซลแบบขั้นตอนเดียวจากน้ำมันเมล็ดฝ้ายด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกับเมทานอลและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลและใช้ตัวช่วยในการผสมแบบ RIMM ทำการทดลองด้วยการกำหนดอัตราการใช้ให้คงที่แล้วปรับความยาวท่อขนาดต่างๆเพื่อให้ได้เวลาในการทำปฏิกิริยาตามต้องการ พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มีค่าสูงขึ้นเมื่อเลือกใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้น ผลการทดลองที่ไม่สอดคล้องกันนี้อาจเป็นเพราะวิธีในการทดลอง ขนาดและความยาวของท่อปฏิกรณ์ที่ต่างกัน จากการทดลองศึกษาในปัจจุบันนี้แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวสัมผัสของวัฏภาคมีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มากกว่าเวลาการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน แม้ให้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 20 วินาที แต่เนื่องจากขนาดหยดวัฏภาคที่ใหญ่ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ไม่ดี โดยพบว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 วินาทีจะส่งผลให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันไบโอดีเซลสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ 5 วินาทีเป็นเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชให้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล



ภาพที่ 25 ขนาดของหยดวิภาคหลังจากออกจากตัวช่วยการผสมแบบที (T mixer) ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ในขั้นตอนที่ 2 : a) 5 วินาที, b) 10 วินาที, c) 15 วินาที, d) 20 วินาที โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส

4.4 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2

จากการศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันไบโอดีเซลเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในขั้นตอนที่ 2 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 50, 55, 60, 65 และ 70 องศาเซลเซียส โดยกำหนดให้สภาวะการทดลองอื่นๆ คงที่ ดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 วินาที ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซล เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 วินาที

จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในช่วง 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส ทำให้มีค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้น้ำมันมีความหนืดลดลง ไตรกลีเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับเมทานอลได้ดีขึ้น (Dennis, 2010) นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงยังทำให้ความถี่ของการชนกันของโมเลกุลน้ำมันกับเมทานอลสูงขึ้น (Noureddini and Zhu, 1997; Darnoko and Cheryan, 2000) จึงส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น และทำให้มีค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาสaponification ของไตรกลีเซอไรด์ขึ้น (Leung and Guo, 2006) อุณหภูมิที่เหมาะสมดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่า 65 องศาเซลเซียสซึ่งมากกว่าจุดเดือดของเมทานอลจะส่งผลให้เมทานอลซึ่งเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่ได้มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ผลการทดลองที่ได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Ramadhas *et al.* (2005) ซึ่งศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนจากน้ำมันเมล็ดยางด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยขั้นตอนแรกใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและ

ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 ผลการทดลองในขั้นตอนที่ 2 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มีค่าสูงสุดเมื่อทำปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส จากการทดลองศึกษาในปัจจุบันพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลให้มีค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงสุด จึงเลือกใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในขั้นตอนที่ 2 สามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลได้ดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส

5. ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลและเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

จากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลและเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยกำหนดให้สภาวะการทดลองต่างๆคงที่ ดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลและเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ชนิดเครื่องปฏิกรณ์	เวลาในการทำปฏิกิริยา(นาทื)	เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ (เปอร์เซ็นต์)	อัตราการไหลหรือปริมาตร
เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล	0.083 นาทื (5 วินาที)	97.19	2.92 มิลลิลิตรต่อนาที
เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	15 นาทื	85.11	42.74 มิลลิลิตร
เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	45 นาทื	91.93	42.74 มิลลิลิตร
เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	75 นาทื	92.43	42.74 มิลลิลิตร

จากผลการทดลองพบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลซึ่งใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพียง 5 วินาที ให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงถึง 97.19 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เครื่องปฏิกรณ์แบบกะให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ 85.11, 91.93 และ 92.43 เปอร์เซ็นต์ โดยต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 15, 45 และ 75 นาทื ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลมีการถ่ายเทมวลและความร้อนที่ดี มีระยะทางในการแพร่ที่สั้นและมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรที่สูง จึงส่งผลให้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้ดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่สั้นกว่า (Guoqing *et al.*, 2009) ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jachuck *et al.* (2009) ที่ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลและเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันคาโนลาร์ เมทานอลและโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลซึ่งใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน 3 นาทื ให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ 99.8 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ 98.7 เปอร์เซ็นต์ ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานถึง 180 นาทื

7. ศึกษาคุณสมบัติของไบโอดีเซล

เนื่องจากไบโอดีเซลที่ผลิตได้ควรมีคุณสมบัติต่างๆอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำไบโอดีเซลที่ผลิตได้มาตรวจสอบ

คุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น จุดหมอกควัน จุดไหลเทและค่าความเป็นกรด โดยไบโอดีเซลที่นำมาตรวจสอบคุณสมบัตินี้ได้ผลิตจากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดดังนี้ ขั้นตอนแรกใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 5 วินาที และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 65 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำมันที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ไปทำการทดลองต่อในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 เท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 5 วินาที และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของไบโอดีเซลที่ได้แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานไบโอดีเซล

คุณสมบัติ	ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว	ไบโอดีเซลตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน	
		อัตราสูงสุด	วิธีทดสอบ
เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์	97.19	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN 14103
ค่าความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส (มิลลิเมตร ² ต่อวินาที)	4.58	3.5-5.0	ASTM D 445
ความหนาแน่นที่ 15 องศาเซลเซียส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	878	860 - 900	ASTM D 1298
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	160	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D93
จุดหมอกควัน (องศาเซลเซียส)	5	-	-
จุดไหลเท (องศาเซลเซียส)	2	-	-
ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน)	0.42	ไม่สูงกว่า 0.5	ASTM D 664

จากตารางที่ 9 พบว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ 97.19 เปอร์เซ็นต์ ค่าความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียสเท่ากับ 4.58 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที ความหนาแน่นที่ 15 องศาเซลเซียสเท่ากับ 878 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จุดวาบไฟเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส จุดหมอกควัน

เท่ากับ 5 องศาเซลเซียส จุดไหลเทเท่ากับ 2 องศาเซลเซียสและมีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 0.42 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน ซึ่งผ่านตามมาตรฐานของข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ประกาศโดยกรมธุรกิจพลังงาน



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลเชิงเดี่ยว โดยท่อของเครื่องปฏิกรณ์ทำมาจากท่อ PTFE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.508 มิลลิเมตร และมีความยาวในส่วนท่อปฏิกรณ์ 1.2 เมตร กระบวนการผลิตไบโอดีเซลเป็นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน เนื่องจากน้ำมันพืชใช้แล้วที่ใช้เป็นน้ำมันตั้งต้นมีค่าความเป็นกรดสูงถึง 3.96 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน จึงไม่เหมาะกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสในขั้นตอนเดียว ดังนั้นในขั้นตอนที่ 1 จึงทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันให้มีค่าต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาผลิตเป็นไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นจึงนำไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากสภาวะที่เหมาะสมไปตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ จากการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การทดลองในขั้นตอนที่ 1 โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล

เมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลในการทำการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้วจาก 3.96 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน ให้มีค่าต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 วินาที และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส โดยสามารถลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็น 0.89 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน

2. การทดลองในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล

นำน้ำมันจากสภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนที่ 1 มาทำการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส เพื่อให้ได้

ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลสูงสุด จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันจากขั้นตอนที่ 1 เท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 วินาทีและ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส โดยไบโอดีเซลที่ได้มีค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ 97.19%

3. คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้

เมื่อทดสอบหาคุณสมบัติบางประการของไบโอดีเซลที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น จุดวาบไฟ จุดหมอกควัน จุดไหลเทและค่าความเป็นกรด พบว่าผ่านตาม มาตรฐานของข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรมฯ ไขมันที่ ประกาศโดยกรมธุรกิจพลังงานปี พ.ศ. 2550

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แบบสองขั้นตอน มีข้อเสนอแนะ ดังต่อไปนี้

1. ควรพัฒนาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์ แบบไมโครชาแนล เนื่องจากสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่ายและสามารถนำ กลับมาใช้ใหม่ได้ อีกทั้งยังช่วยรักษาสภาพแวดล้อมได้อีกด้วย นอกจากนี้ควรทดลองเพิ่มความยาว ของเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล เพราะเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพไบโอดีเซลที่ผลิต ได้

2. ควรทำการปรับปรุงวิธีการบำบัดน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้ว ให้มีสิ่งเจือปนน้อยที่สุด เช่น ระบบการกลั่นหรือการดูดซับ เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณภาพสูงสุด แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึง ต้นทุนในการผลิตด้วย

3. ควรทำการศึกษาถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่อง ปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

จุฑาเกศ เทียนเมธางกูร. 2551. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้วโดยกระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นิธิยา รัตนานนท์ และ วิบูลย์ รัตนานนท์. 2543. สารพิษในอาหาร. โอ.เอส.พรีนติ้ง เฮาส์ กรุงเทพฯ.

กรมธุรกิจพลังงาน. 2550. เรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550. แหล่งที่มา: <http://www.ptplc.com>, 15 กันยายน 2554.

พุทธชาติ เมฆทอง, สุทธินันท์ นันทจิต, สุวิน อภิชาติพัฒนศิริ และ วนิดา คูอมรพัฒนะ. 2546. การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำน้ำมันพืชใช้แล้วจากอุตสาหกรรมอาหารมาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงาน. เอกสารประกอบการสัมมนา เผยแพร่ผลงานวิจัยด้านพลังงานทดแทน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. โรงแรมรามาร์คเดन्ส์, กรุงเทพฯ.

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2548. การสำรวจน้ำมันพืชใช้แล้วเพื่อนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซล. แหล่งที่มา: <http://www.erdi.or.th/index.php?r=site/index>, 15 เมษายน 2555.

Adeeb, H., A. Zahangir, M. Mohamed and K. Nassereldeen. 2011. Reduction of high content of free fatty acid in sludge palm oil via acid catalyst for biodiesel production. **Fuel Processing Technology**. 92: 920–924.

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

Clark, W. L. and G.W. Serbia. 1991. Safty Aspects of Frying Fats and Oils. **Food Technol**, 45 (2): 84-94.

- Darnoko, D. and M. Cheryan. 2000. Kinetic of palm oil transesterification in a batch reactor. **J Am Oil Chem Soc.** 77: 1263-1267.
- Demirbas, A. 2002. Biodiesel from Vegetable Oils via Transesterification in Supercritical Methanol. **Energy Conversion and Management.** 43: 2349-2356.
- Dennis Leung, Y.C., W. Xuan and M.K.H. Leung. 2010. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. **Applied Energy.** 87: 1083–1095
- Dorado, M.P., E. Ballesteros, J.A. Almeida, C. Schellert, H.P. Lohrlein and R. Krause. 2003. Exhaust Emissions from a Diesel Engine Fuelled with Transesterified Waste Olive Oil. **Fuel.** 82: 1311-1315.
- 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. **Renew Energy.** 34: 762–5.
- Felizardo, P., M.J. Neiva Correia, I. Raposo, J.F. Mendes, R. Berkemeier and J.M. Bordado. 2006. Production of biodiesel from waste frying oils. **Waste Manage.** 26: 487–94.
- Freedman, B., E.H. Pryde and T.L. Mounts. 1984. Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. **J Am Oil Chem Soc.** 61: 1638–43.
- Fukuda, H., A. Kondo and H. Noda. 2001. Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils. **J. Biosci. Bioeng.** 92 (5): 405-416.
- George Doku, N., V. Willem, N. David Reinhoudt and B. Albert van den. 2005. On – microchip multiphase chemistry – a review of microreactor design principles and reagent contacting modes. **Tetrahedron report number.** 708: 2733 – 2742.

- Guoqing, G., K. Katsuki, M. Kimiko and S. Nozomi. 2009. Transesterification of Sunflower Oil with Methanol in a Microtube Reactor. **Ind. Eng. Chem. Res.** 48: 1357–1363.
- Hanny Johanes, B. and H. Shizuko. 2008. Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. **Bioresource Technology**. 99: 1716–1721.
- Jachuck, R., G. Pherwani and S. M. Gorton. 2009. Green engineering: continuous production of biodiesel using an alkaline catalyst in an intensified narrow channel reactor. **J. Environ. Monitoring**. 11: 642–647.
- Joana Dias, M., C.M. Maria Alvim Ferraz and F. Manuel Almeida. 2009. Production of biodiesel from acid waste lard. **Bioresource Technology**. 100: 6355–6361
- Khan, A.K. 2002. **Research into Biodiesel Kinetics & Catalyst Development**. Available Source:http://www.cheque.uq.edu.au/ugrad/chee4001/CHEE400102/Adam_Khan_Thesis.pdf, October 4, 2011.
- Kobayashi, J., Y. Mori and S. Kobayashi. 2006. Multiphase organic synthesis in microchannel reactors. **Chem. Asian J.** 1: 22–35.
- Kusdiana and Saka. 2004. Effects of Water on Biodiesel Fuel Production By Supercritical Methanol Treatment. **Bioresource Technology**. 91: 289–295.
- Laurila, K. and M. Bohlen. 2007. **Biopolymer as protection during transport of construction material**. Available Source :<http://dspace.bib.hb.se:8080/dspace/bitstream/dspace/bitstream/2320/2805/1/BohlenLaurilaKandUppsats.pdf>, October 20, 2011.
- Leung, D. and Y. Guo. 2006. Transesterification of neat and used frying oil: optimization for biodiesel production. **Fuel Process Technol.** 87: 883–90.

- Ma, F. and M.A. Hanna. 1999. Biodiesel production: a review. **Bioresource Technology**. 70: 1-15.
- Ma, F., L.D. Clements and M.A. Hanna. 1998. The Effect of Catalyst Free Fatty Acids and Water on Transesterification of Beef Tallow. **Trans ASAE**. 41(5): 1261-1264.
- Man Kee, L., L. Keat Teong and M. Abdul Rahman. 2010. Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review. **Biotechnology Advances**. 28: 500–518
- Marchetti, M.J., V.U. Miguel and A.F. Errazu. 2005. Possible methods for biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 11: 1300-1311.
- Meng, X., G. Chen and Y. Wang. 2008. Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test. **Fuel Process Technol.** 89: 851–7.
- Noureddini, H. and D. Zhu. 1997. Kinetic of transesterification of soybean oil. **J Am Oil Chem Soc.** 74: 457-1463.
- Peiyong, S., W. Bin, Y. Jianfeng, Z. Lixiong and X. Nanping. 2010. Fast Synthesis of Biodiesel at High Throughput in Microstructured Reactors. **Ind. Eng. Chem. Res.** 49: 1259–1264.
- Peiyong, S., S. Juan, Y. Jianfeng, Z. Lixiong and X. Nanping. 2010. Continuous production of biodiesel from high acid value oils in microstructured reactor by acid-catalyzed reactions. **Chemical Engineering Journal**. 364 – 370.
- Piyanuch, N. and W. Sasiwimol. 2010. High free fatty acid coconut oil as a potential feedstock for biodiesel production in Thailand. **Renewable Energy**. 35: 1682–1687.
- Ramadhass, A.S., S. Jayaraj and C. Muraleedharan. 2005. Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. **Fuel**. 84: 335–40.

Rosana, G. M., M.E. Castell Perez and A.M. Barrufet. 1999. Deep-Fat Frying, Fundamental and Application. **Aspen Publishers, Inc. Maryland. USA.** 350 p.

Schuchardt, U., R. Sercheli and R.M. Vargas. 1998. Transesterification of Vegetable Oils: a Review. **Journal of the Brazilian Chemical Society.** 9(1): 199-210.

Sontag, N.O.V. 1979. Reactions of fats and fatty acids. Bailey's industrial oil and fat products 4th ed. 1: 99. Swern, **D. John Wiley & Sons.** New York.

Srivastava, A. and R. Prasad. 2000. Triglycerides-based Diesel Fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** 4: 111-133.

Supple, B., R. Holward Hildige., E. Gonzalez Gomez and J.J. Leahy. 2002. The Effect of Steam Treating Waste Cooking Oil on the Yield of Methyl Ester. **JAOCs.** 79 (2): 175-178.

Tyson, K.S. 2004. Biodiesel Handling and Use Guidelines. National Renewable Energy Laboratory. **U.S. Department of Energy:** 17-18.

Wang, Y., S. Ou, P. Liu, F. Xue and S. Tang. 2006. Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical.** 252: 107-112.

Weisz, P.B., W.O. Haag and P.G. Rodeweld. 1979. Catalytic production of high grade fuel (gasoline) from biomass compound by shape-selective catalysis. **Science.** 206: 57-58.

Xin, D., F. Zhen and L. Yun hu. 2010. Ultrasonic transesterification of *Jatropha curcas* L. oil to biodiesel by a two-step process. **Energy Conversion and Management.** 51: 2802-2807.

- Zhang, Y., M.A. Dube, D.D. McLean and M. Kates. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil : 2. Economic assessment and sensitivity analysis. **Bioresour Technol.** 90: 229–40.
- Zhang, L.X., W.J. Guo, D. Liu, J.F. Yao, L. Ji, N.P. Xu and E.Z. Min. 2008. Low boiling point organic amine-catalyzed transesterification for biodiesel production. **Energy Fuel.** 22: 1353–1357.
- Zheng, S., M. Kates, M.A. Dube and D.D. Mc Lean. 2006. Acid-catalyzed production of biodiesel from waste frying oil. **Biomass and Bioenergy.** 30: 267–272.
- Zhenzhong, W., Y. Xinhai, T. Shan, Y. Jinyue and D. Erik. 2009. Intensification of biodiesel synthesis using zigzag micro-channel reactors. **Bioresource Technology.** 100: 3054-3060.





1. การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันพืชใช้แล้ว

จากการวิเคราะห์ชนิดและสัดส่วนกรดไขมันของน้ำมันพืชใช้แล้วจากโรงอาหารภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ด้วยเครื่องGC/MS พบว่ามีกรดไขมันอยู่ 8 ชนิด ดังแสดงผลในตารางผนวกที่ ก1

ตารางผนวกที่ ก1 ปริมาณและชนิดของกรดไขมันของน้ำมันพืชใช้แล้ว

กรดไขมัน		น้ำหนักโมเลกุล	สัดส่วนของกรดไขมัน ในน้ำมันพืชใช้แล้ว (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
ชื่อ	โครงสร้าง		
Lauric	C12:0	200.32	4.20
Myristic	C14:0	228.38	7.55
Palmitic	C16:0	256.43	30.08
Palmitoleic	C16:1	254.41	0.32
Stearic	C18:0	284.43	3.56
Oleic	C18:1 n-9 cis	282.47	37.61
Linoleic	C18:2 n-6 cis	280.45	16.26
Linolenic	C18:3 n-3	278.44	0.42

หมายเหตุ วิธีทดสอบ Inhouse Method : based on Lepage, G. and Roy, C.C.,1986

จากการวิเคราะห์พบว่า น้ำมันพืชใช้แล้วประกอบด้วย ไตรกลีเซอไรด์ 98.01 เปอร์เซ็นต์ และกรดไขมันอิสระ 1.99 เปอร์เซ็นต์ จากโครงสร้างโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์แสดงดังภาพ สามารถนำมาคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันพืชใช้แล้วจากสมการดังนี้ (สุกัญญา, 2545)

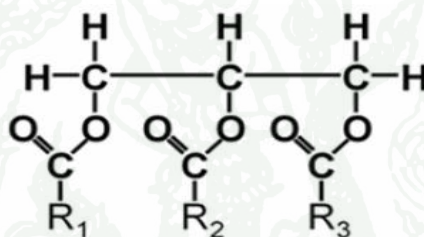
1.1 คำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้ว

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

โดยที่ MW_{FFA} = น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมันอิสระ
 FA_n = ปริมาณของกรดไขมัน
 MW_n = น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมัน

จะได้ $MW_{FFA} = (4.20/100 \times 200.32) + (7.55/100 \times 228.38) + (30.08/100 \times 256.43) +$
 $(0.32/100 \times 254.41) + (3.56/100 \times 284.43) + (37.61/100 \times 282.47) +$
 $(16.26/100 \times 280.45) + (0.42/100 \times 278.44)$
 $MW_{FFA} = 266.74 \text{ กรัม/โมล}$

1.2 คำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชใช้แล้ว



ภาพผนวกที่ ก1 โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์

$$MW_{TG} = 41 + (3 \times (MW_{FFA} - 1))$$

โดยที่ MW_{TG} = น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของไตรกลีเซอไรด์

จะได้ $MW_{TG} = 41 + (3 \times (266.74 - 1))$
 $= 838.21 \text{ กรัม/โมล}$

1.3 คำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันพืชใช้แล้ว

$$MW_{\text{waste oil}} = MW_{TG} + MW_{FFA}$$

โดยที่ $MW_{\text{waste oil}}$ = น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันพืชใช้แล้ว

$$\begin{aligned}\text{จะได้ } MW_{\text{waste oil}} &= (98.01/100 \times 838.21) + (1.99/100 \times 266.74) \\ &= 826.84 \text{ กรัม/โมล}\end{aligned}$$

2. การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันพืชใช้แล้วหลังจากทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องGC/FID เพื่อหาชนิดและสัดส่วนของเมทิลเอสเทอร์ในน้ำมันพืชใช้แล้วหลังจากทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน แสดงผลในตารางผนวกที่ ก2

ตารางผนวกที่ ก2 ปริมาณและชนิดของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ในน้ำมันพืชใช้แล้วหลังจากทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

ชื่อเมทิลเอสเทอร์	น้ำหนักโมเลกุล	สัดส่วนของเมทิลเอสเทอร์จาก ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
methyl decanoate	186.29	0.043
methyl laurate	214.35	0.792
methyl myristate	242.40	1.058
methyl palmitate	270.45	28.135
methyl palmitoleate	268.43	0.885
methyl stearate	298.50	4.644
cis-9-oleic methyl ester	296.49	40.038
methyl linoleate	294.47	20.606
methyl linolate	292.46	1.100
methyl arachidate	326.56	0.400
methyl behenate	354.61	0.144
methyl erocate	352.59	0.084
methyl lignocerate	382.66	0.152
อื่นๆ	-	1.919

จากการวิเคราะห์พบว่า น้ำมันพืชใช้แล้วจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันมีค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ 27.23 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสามารถนำมาคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันพืชใช้แล้วหลังจากทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันได้ดังนี้

2.1 คำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเมทิลเอสเทอร์ในน้ำมันพืชใช้แล้วจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

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

โดยที่ MW_{FAME} = น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเมทิลเอสเทอร์

$FAME_n$ = ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิด

MW_n = น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิด

จะได้ $MW_{FAME} = 287.49$ กรัม/โมล

2.2 คำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันพืชใช้แล้วหลังจากทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

$$MW_{\text{waste oil after esterification}} = MW_{\text{waste oil}} + MW_{FAME}$$

โดยที่ $MW_{\text{waste oil after esterification}}$ = น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันพืชใช้แล้วหลังจากทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

$MW_{\text{waste oil}}$ = น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันพืชใช้แล้ว

จะได้ $MW_{\text{waste oil after esterification}} = (72.77/100 \times 826.84) + (27.23/100 \times 287.49)$
 $= 679.97$ กรัม/โมล

3. การคำนวณอัตราการไหลและปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง

กำหนด :

ความยาวในส่วนของท่อปฏิกิริยาแบบไมโครชาแนล	1.2 เมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อปฏิกิริยาแบบไมโครชาแนล	0.000508 เมตร
มวลโมเลกุลของเมทานอล	32.04 กรัม/โมล
มวลโมเลกุลของน้ำมันพืชใช้แล้ว	826.84 กรัม/โมล
ความหนาแน่นของเมทานอล	0.79 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
ความหนาแน่นของน้ำมันพืชใช้แล้ว	0.871 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ตัวอย่างการคำนวณ

ถ้าต้องการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 9:1 โดยเลือกใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 วินาที (0.08333 นาที) และต้องการไปโอดีเซล 50 มิลลิลิตร

3.1 การคำนวณหาอัตราการไหลของสายป้อนเมทานอลและน้ำมันพืชใช้แล้วที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรในส่วนของท่อปฏิกิริยา} &= \pi \times \frac{\text{เส้นผ่านศูนย์กลาง}^2}{4} \times \text{ความยาวท่อ} \\
 &= \pi \times \frac{0.000508^2}{4} \times 1.2 \\
 &= 2.433 \times 10^{-7} \text{ เมตร}^3 \\
 (\text{แปลงหน่วย } 1 \text{ เมตร}^3 &= 1,000,000 \text{ มิลลิลิตร}) &= 0.2433 \text{ มิลลิลิตร}
 \end{aligned}$$

$$\text{อัตราการไหลรวมภายในท่อ} = \frac{0.2433}{0.08333} = 2.9196 \text{ มิลลิลิตร/นาที}$$

$$\text{เมทานอล 9 โมล มีน้ำหนัก} = 32.04 \times 9 = 288.36 \text{ กรัม}$$

$$\text{คิดเป็น} = 288.36 / 0.79 = 365.01 \text{ มิลลิลิตร}$$

น้ำมันพืชใช้แล้ว 1 โมล มีน้ำหนัก = $826.84 \times 1 = 826.84$ กรัม

คิดเป็น = $826.84 / 0.871 = 949.30$ มิลลิลิตร

ปริมาตรรวมของเมทานอลและน้ำมันพืชใช้แล้วที่ต้องใช้ = $365.01 + 949.30$

= 1,314.31 มิลลิลิตร

อัตราการไหลของสายป้อนเมทานอล = $\frac{2.9196 \times 365.01}{1314.31} = 0.81$ มิลลิลิตร/นาที่

อัตราการไหลของสายป้อนน้ำมันพืชใช้แล้ว = $\frac{2.9196 \times 949.30}{1314.31} = 2.11$ มิลลิลิตร/นาที่

3.2 การคำนวณหาปริมาณเมทานอลและน้ำมันพืชใช้แล้วในการทำปฏิกิริยา สามารถคำนวณได้ดังนี้

อัตราการไหลรวมของสายป้อนเมทานอลและน้ำมันพืชใช้แล้ว = $0.81 + 2.11$
= 2.92 มิลลิลิตร/นาที่

เวลาที่ใช้ทั้งหมดในการเก็บไบโอดีเซลที่ได้ = $50 / 2.92 = 17.12$ นาที

ปริมาตรของเมทานอลที่ต้องใช้ = $0.81 \times 17.12 = 13.87$ มิลลิลิตร

คิดเป็น = $13.87 \times 0.79 = 10.96$ กรัม

ปริมาตรของน้ำมันพืชใช้แล้วที่ต้องใช้ = $2.11 \times 17.12 = 36.12$ มิลลิลิตร

คิดเป็น = $36.12 \times 0.871 = 31.46$ กรัม

4. ค่าความเป็นกรด

ซึ่งน้ำมันประมาณ 5 กรัมใส่ขวดรูปชมพู่ เติมสารละลายโพพานอล 50 มิลลิลิตร หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์ 2-3 หยด จากนั้นนำสารละลายผสมที่ได้มาไทเทรตด้วยสารละลาย

โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 N สารละลายจะเปลี่ยนจากไม่มีสีไปเป็นสีชมพูที่จุดยุติ
จดปริมาตรสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เพื่อคำนวณหาค่าความเป็นกรดตามสมการ
ดังนี้

$$\text{ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)} = \frac{V \times 56.1 \times 0.1}{m}$$

โดยที่ V = ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)

m = น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ใช้ในการหาค่าความเป็นกรด (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความเป็นกรดของน้ำมัน

ปริมาตรสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้	3.55 มิลลิลิตร
น้ำหนักของน้ำมัน	5.034 กรัม

ดังนั้น ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลเท่ากับ

$$\frac{3.55 \times 56.1 \times 0.1}{5.034} = 3.96 \text{ มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน}$$

5. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระไปเป็นกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ (% Conversion)

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้ว
เปลี่ยนเป็นกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ (% Conversion) โดยสามารถคำนวณตามวิธีของ Peiyong Sun
et al. (2010) ได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง (\% Conversion)} = \left(1 - \frac{AV_2}{AV_1} \right) \times 100$$

โดยที่ AV_1 = ค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้วก่อนทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน)

AV_2 = ค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้วหลังทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน)

ตัวอย่างการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง

ค่าความเป็นกรดก่อนทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน 3.96 มิลลิกรัมโพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน

ค่าความเป็นกรดหลังทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน 0.89 มิลลิกรัมโพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน

ดังนั้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเท่ากับ

$$\left(1 - \frac{0.89}{3.96}\right) \times 100 = 77.53 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

6. การวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) โดยใช้ Methyl Heptadecanoate (C17:0) เป็นสารมาตรฐานภายใน (Internal Standard) ตามมาตรฐาน EN 14103 สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์โดยใช้สมการ

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

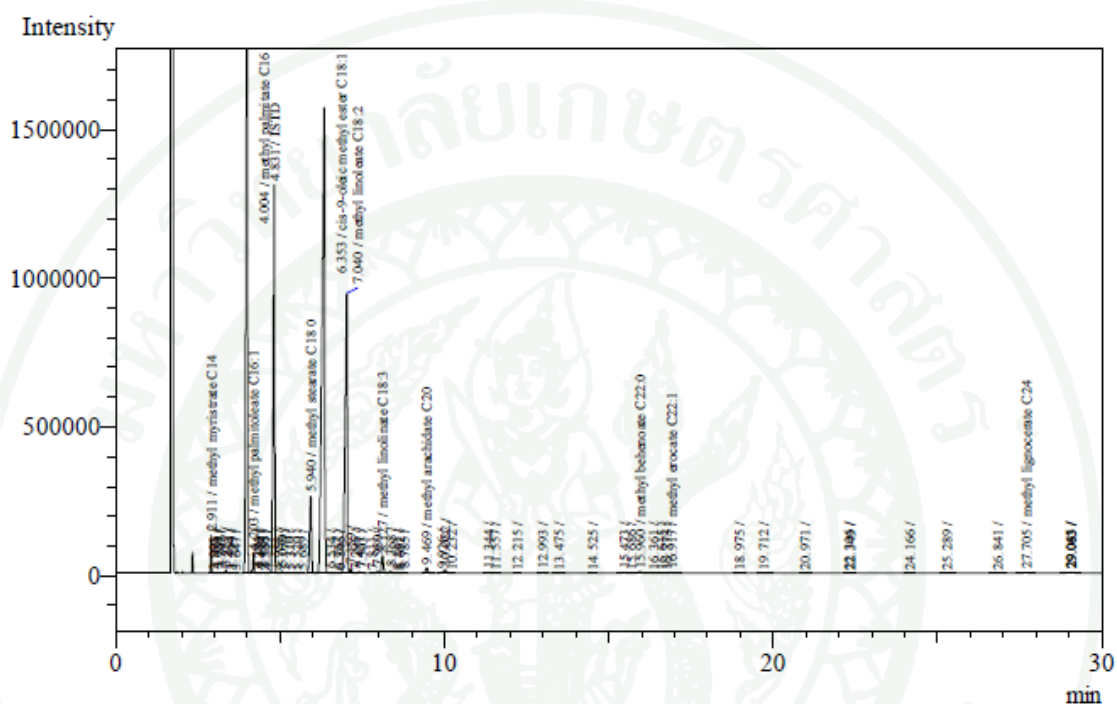
โดยที่ $\sum A$ = ผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟตั้งแต่ C14:0 ถึง C24:1

A_{EI} = พื้นที่ใต้กราฟของสารละลายมาตรฐาน Methyl Heptadecanoate (C17:0)

C_{EI} = ความเข้มข้นของ Methyl Heptadecanoate (C17:0) ที่ใช้ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

V_H = ปริมาตรของ Methyl Heptadecanoate (C17:0) ที่ใช้ (ไมโครลิตร)
 M = น้ำหนักไบโอดีเซลที่ใช้ (มิลลิกรัม)

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์



ภาพผนวกที่ ก2 ตัวอย่างโครมาโทแกรมของตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์

ตารางผนวกที่ ก3 ตัวอย่างค่าจากโครมาโทแกรมของตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Name
1	2.911	224617	126598	0.852%	methyl myristate
2	2.998	1343	705	0.005	
3	3.089	2537	1409	0.010	
4	3.124	2617	1406	0.010	
5	3.202	3072	1289	0.012	
6	3.357	16190	7987	0.061	
7	3.464	1656	755	0.006	

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Name
8	3.539	2232	781	0.008	
9	3.647	2329	791	0.009	
10	4.004	6615947	2327633	25.081%	methyl palmitate
11	4.203	171915	65932	0.652%	methyl palmitoleate
12	4.294	3828	1614	0.015	
13	4.360	4827	1757	0.018	
14	4.414	1140	464	0.004	
15	4.536	9192	1741	0.035	
16	4.597	2013	966	0.008	
17	4.831	4050361	1304449	15.355%	ISTD
18	4.958	1379	435	0.005	
19	5.070	18432	6101	0.070	
20	5.170	2088	642	0.008	
21	5.310	1276	331	0.005	
22	5.520	1298	339	0.005	
23	5.689	2469	633	0.009	
24	5.940	1017787	259133	3.858%	methyl stearate
25	6.353	9018485	1566458	34.189%	cis-9-oleic methyl ester
26	6.534	6302	2014	0.024	
27	6.767	3502	671	0.013	
28	6.846	1664	567	0.006	
29	7.040	4397466	941529	16.671%	methyl linoleate
30	7.159	43019	13290	0.163	
31	7.295	1672	383	0.006	
32	7.427	19297	5102	0.073	
33	7.503	5347	1706	0.020	
34	7.811	2778	674	0.011	
35	7.980	28639	6650	0.109	

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Name
36	8.127	229013	57235	0.868%	methyl linolate
37	8.368	26128	6279	0.099	
38	8.561	3875	727	0.015	
39	8.652	2645	588	0.010	
40	8.785	5602	1287	0.021	
41	9.469	86568	18279	0.328%	methyl arachidate
42	9.926	8276	2118	0.031	
43	10.022	61621	11856	0.234	
44	10.232	2159	488	0.008	
45	11.344	14117	2419	0.054	
46	11.557	1352	199	0.005	
47	12.215	7001	1151	0.027	
48	12.993	12930	2027	0.049	
49	13.475	7195	634	0.027	
50	14.525	2323	353	0.009	
51	15.473	25034	3192	0.095	
52	15.686	2083	288	0.008	
53	15.960	35914	4440	0.136%	methyl behenoate
54	16.361	7807	817	0.030	
55	16.615	3584	419	0.014	
56	16.773	2871	469	0.011	
57	16.917	14361	1296	0.054%	methyl erocate
58	18.975	8805	963	0.033	
59	19.712	8765	667	0.033	
60	20.971	6249	573	0.024	
61	22.306	1545	328	0.006	
62	22.343	1991	354	0.008	
63	24.166	3329	318	0.013	

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Name
64	25.289	13072	1127	0.050	
65	26.841	15576	1066	0.059	
66	27.705	24941	1705	0.095%	methyl lignocerate
67	29.045	20093	2767	0.076	
68	29.063	4453	2801	0.017	
69	29.083	18533	2752	0.070	
Total		26378527	6784917		

จากตารางผนวกที่ ก3 สามารถคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \sum A &= 25887375 \text{ (พื้นที่ใต้กราฟรวมของเมทิลเอสเทอร์ตั้งแต่ C14 ถึง C24)} \\
 A_{EI} &= 4050361 \\
 C_{EI} &= 10.032 \text{ มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร} \\
 V_{EI} &= 1 \text{ มิลลิลิตร} \\
 M &= 55.6 \text{ มิลลิกรัม}
 \end{aligned}$$

จากสมการ

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

ดังนั้น

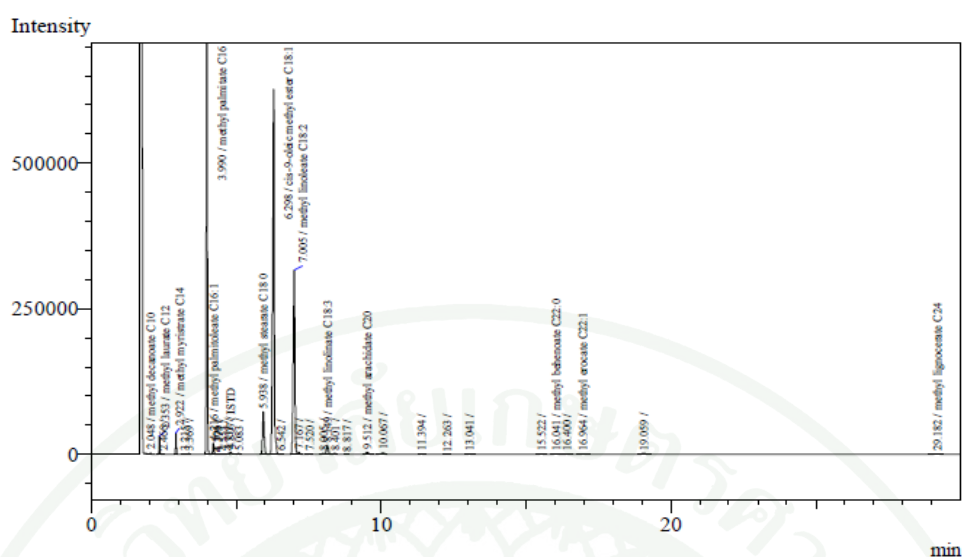
$$\text{เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์} = \frac{(25887375) - 4050361}{4050361} \times \frac{10.032 \times 1}{55.6} \times 100\% = 97.28\%$$

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

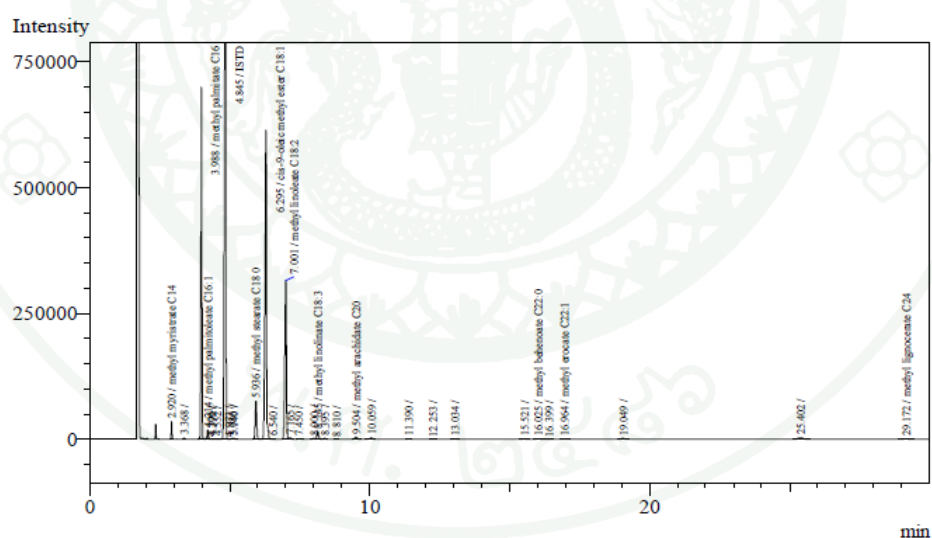
ภาคผนวก ข

โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ

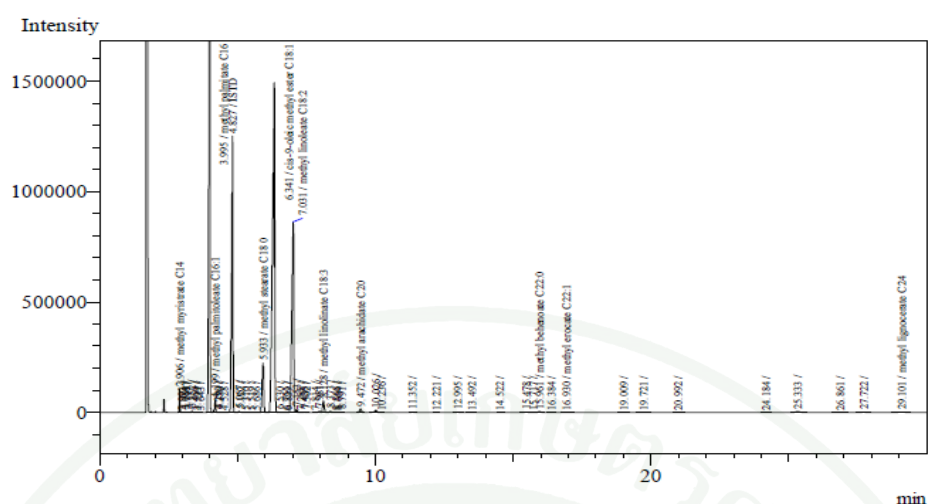
พ.ศ. ๒๕๕๖



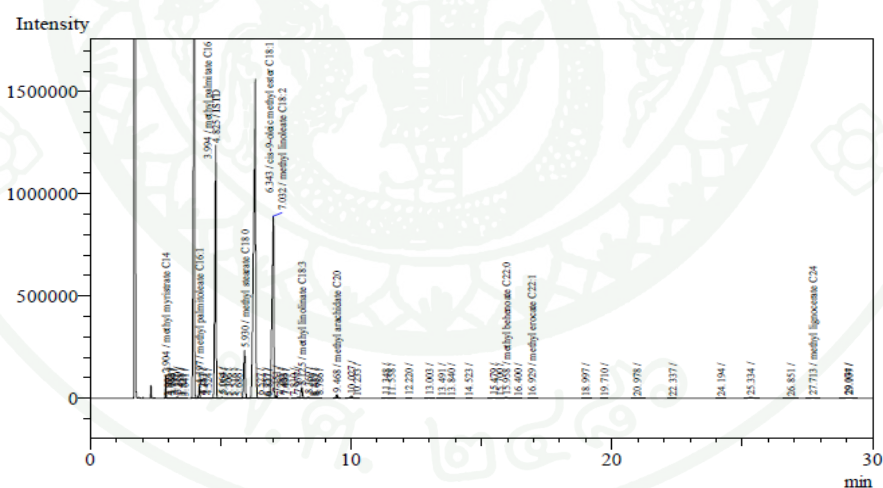
ภาพผนวกที่ ข1 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลที่สภาวะอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



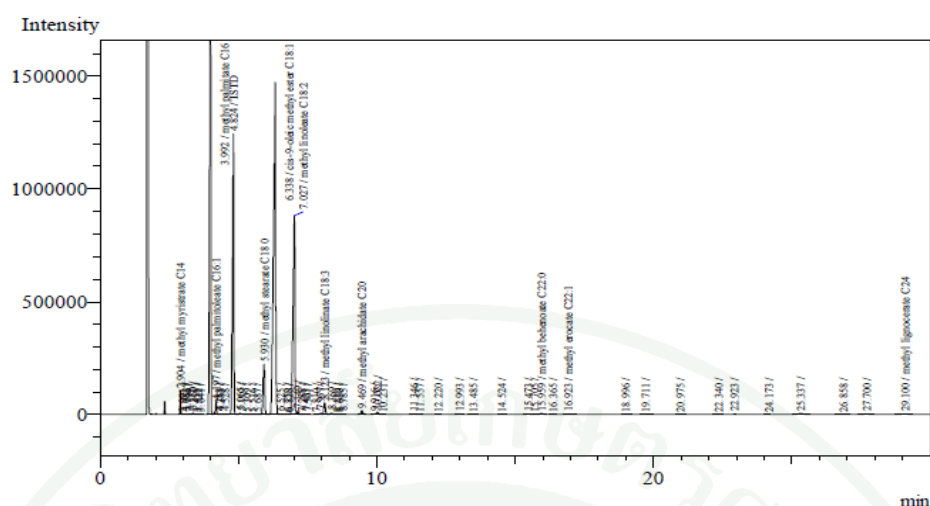
ภาพผนวกที่ ข2 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลที่สภาวะอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 9:1 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



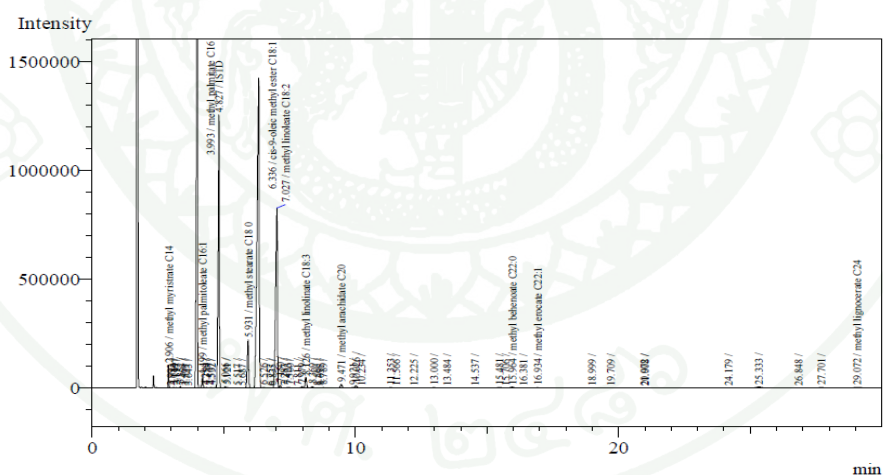
ภาพผนวกที่ ข3 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 4.5:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



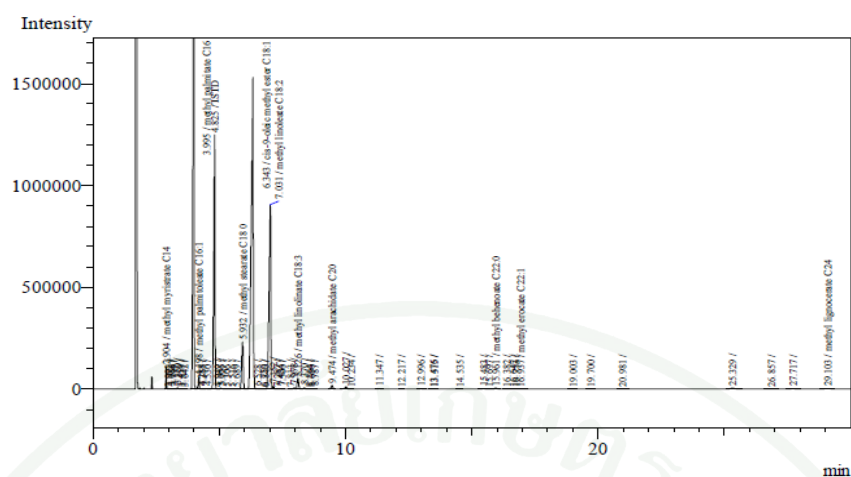
ภาพผนวกที่ ข4 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 4.5:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



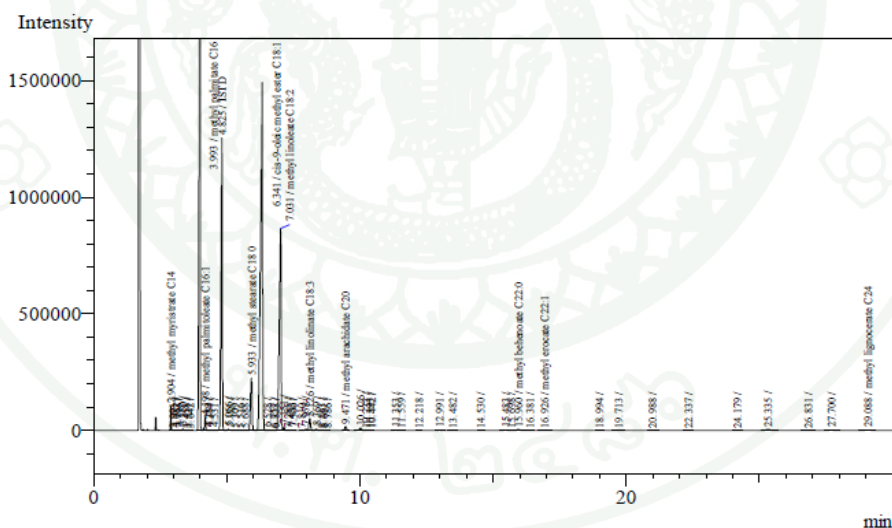
ภาพผนวกที่ ข5 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



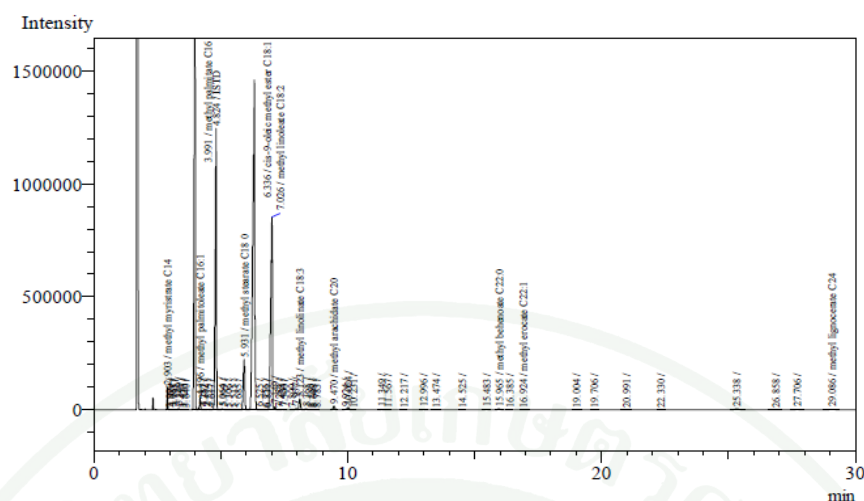
ภาพผนวกที่ ข6 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



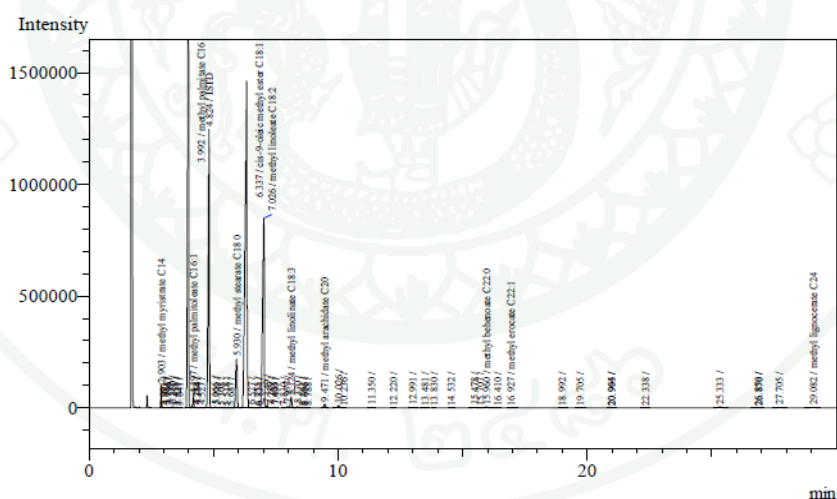
ภาพผนวกที่ ข7 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



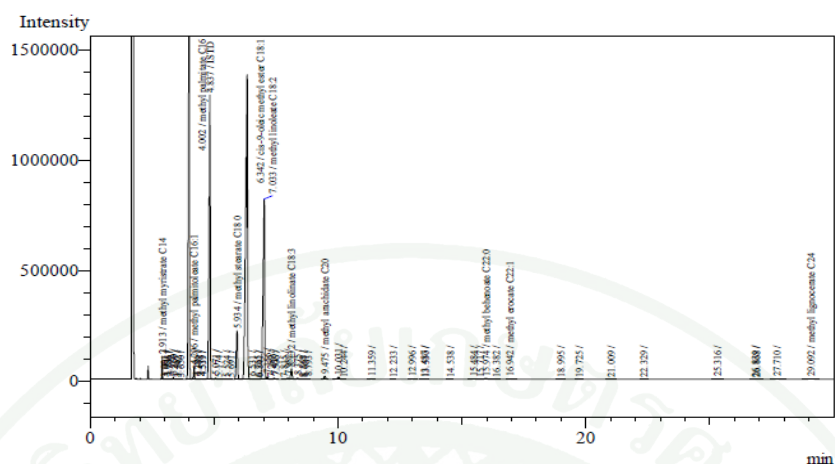
ภาพผนวกที่ ข8 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



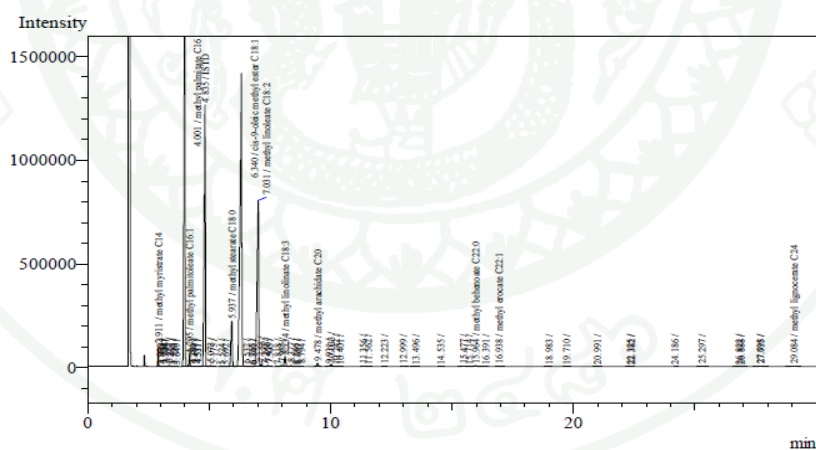
ภาพผนวกที่ ข9 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 12:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



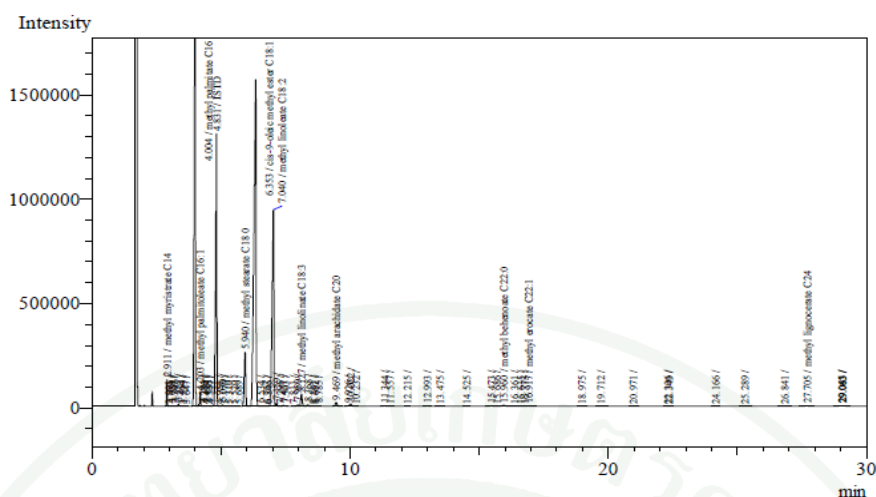
ภาพผนวกที่ ข10 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 12:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



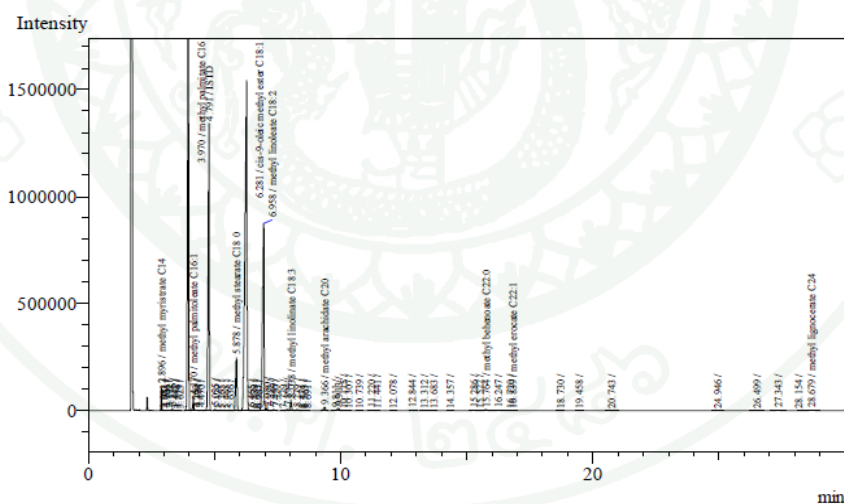
ภาพผนวกที่ ข11 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



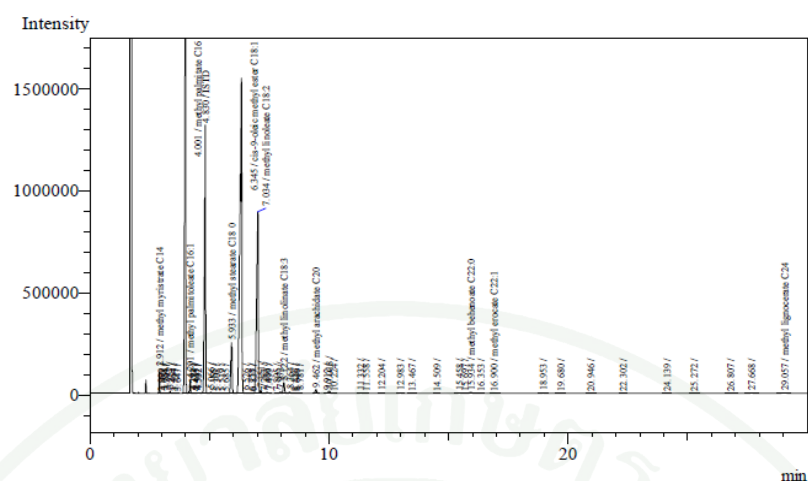
ภาพผนวกที่ ข12 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



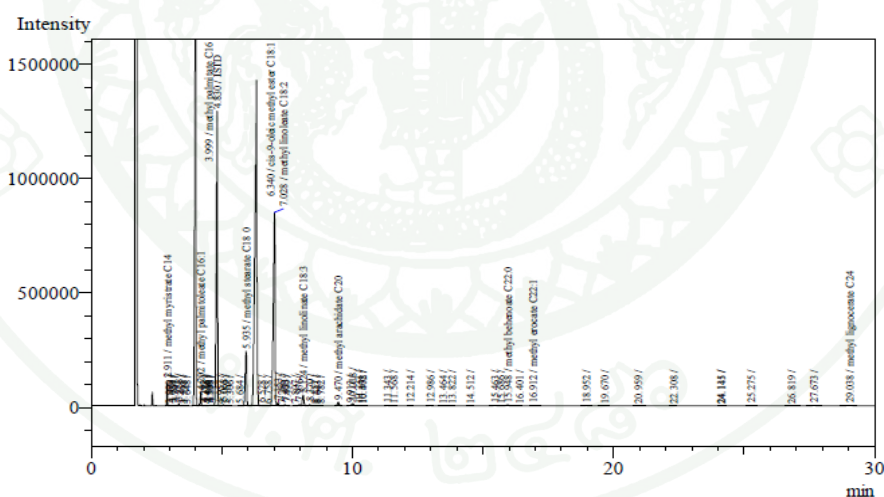
ภาพผนวกที่ ข13 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



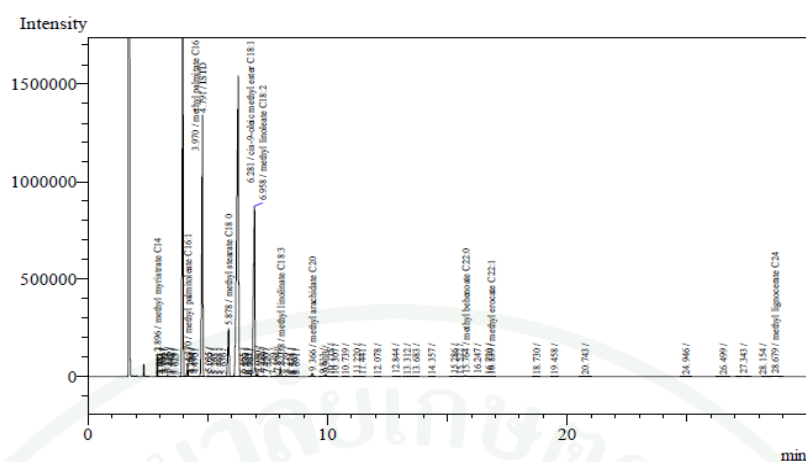
ภาพผนวกที่ ข14 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



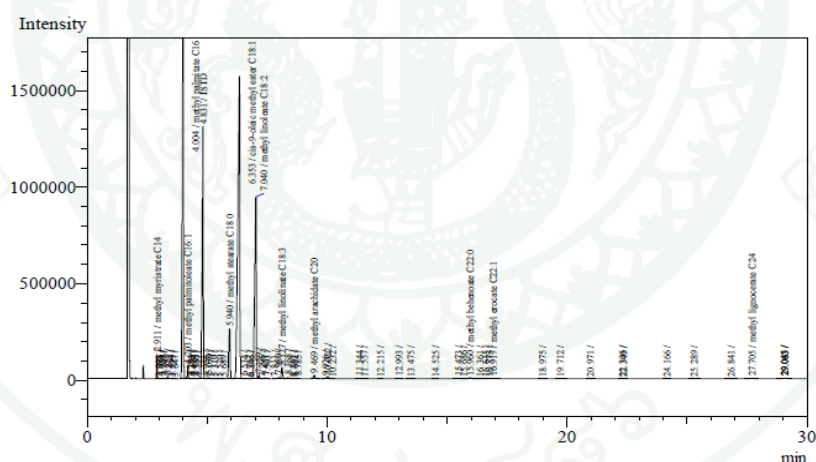
ภาพผนวกที่ ข15 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



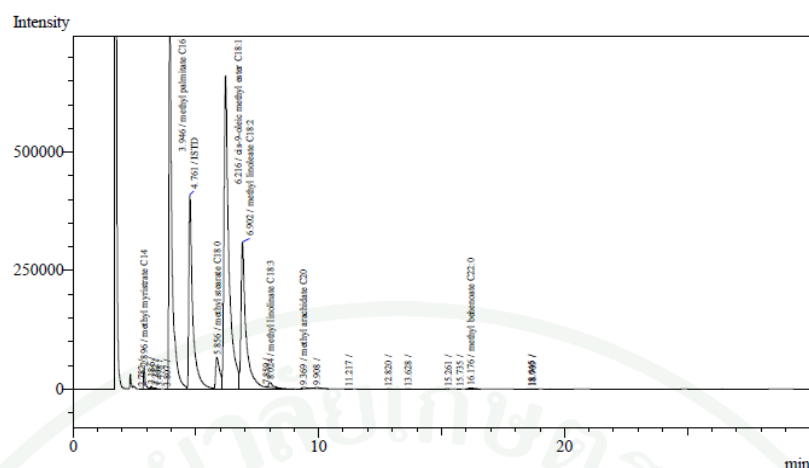
ภาพผนวกที่ ข16 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



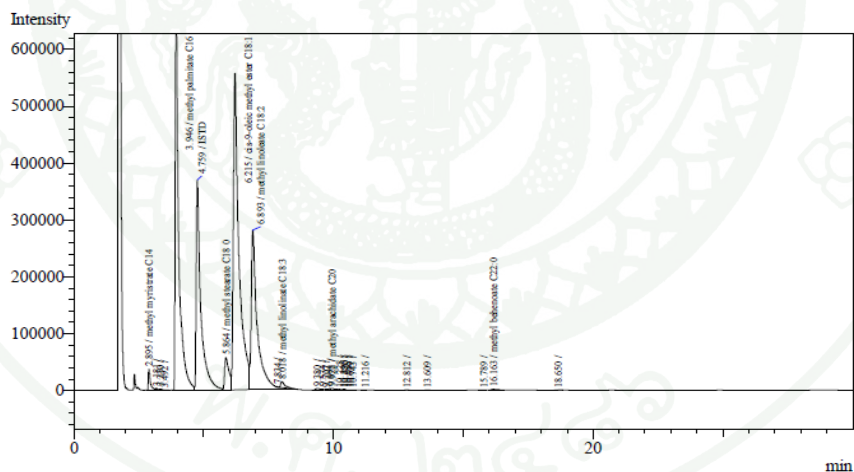
ภาพผนวกที่ ข19 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส



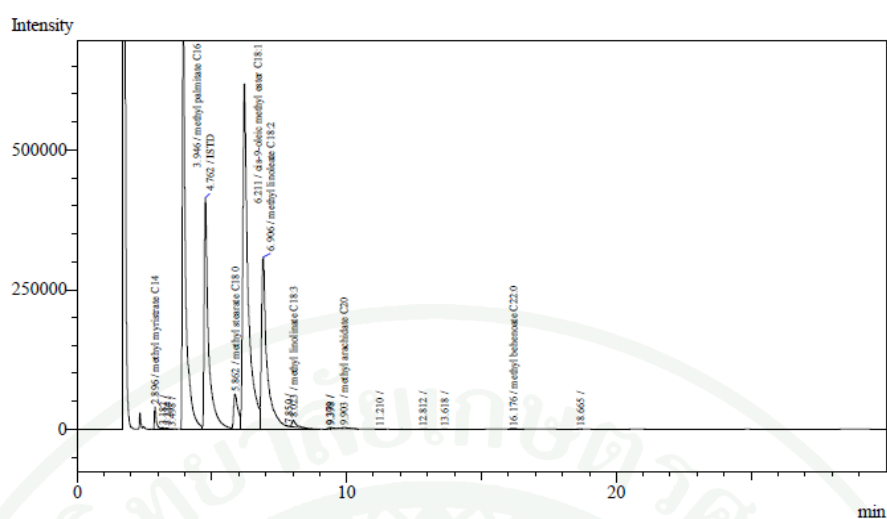
ภาพผนวกที่ ข20 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส



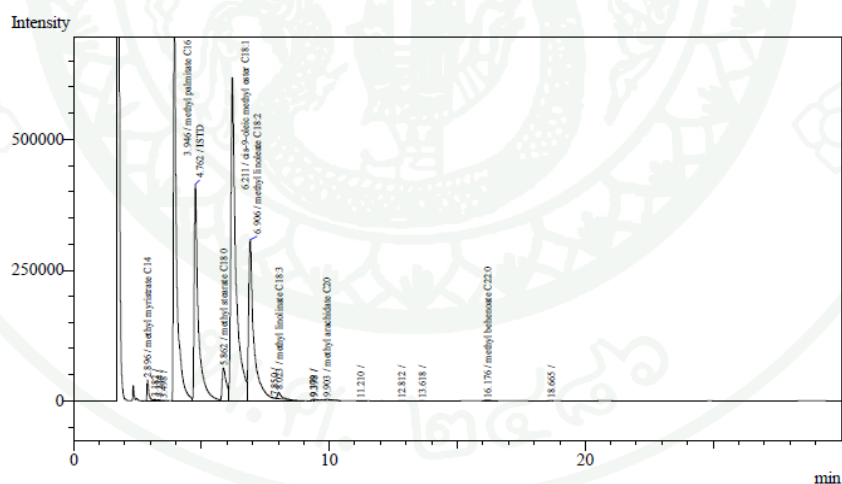
ภาพผนวกที่ ข21 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



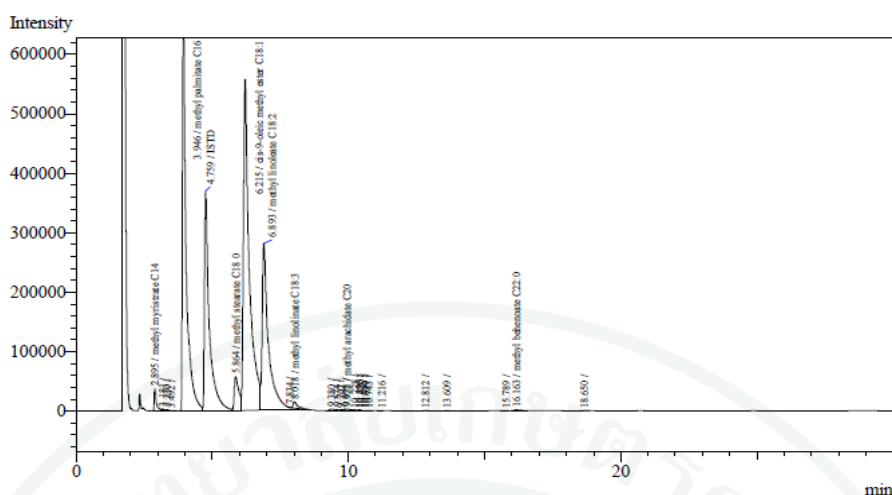
ภาพผนวกที่ ข22 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



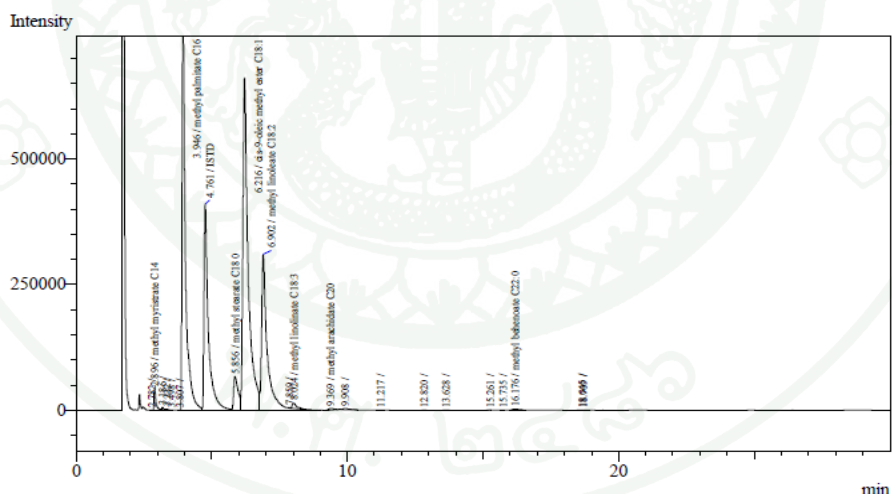
ภาพผนวกที่ ข23 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



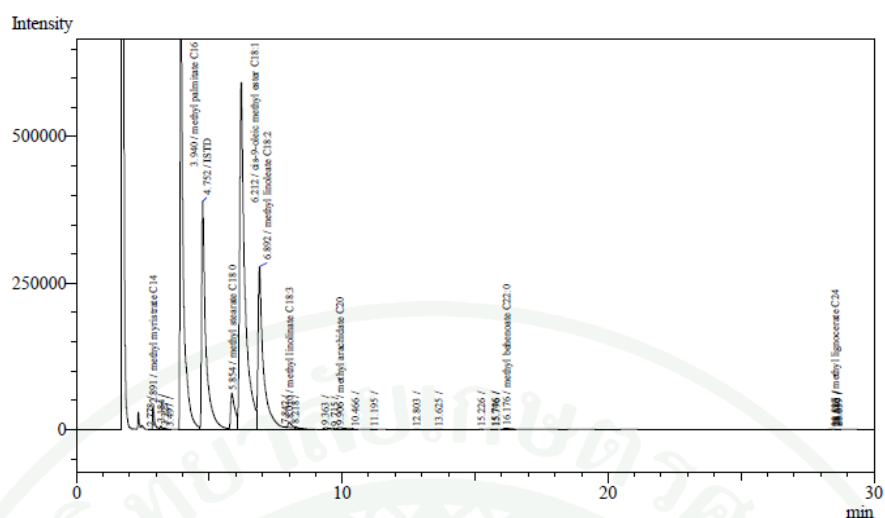
ภาพผนวกที่ ข24 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



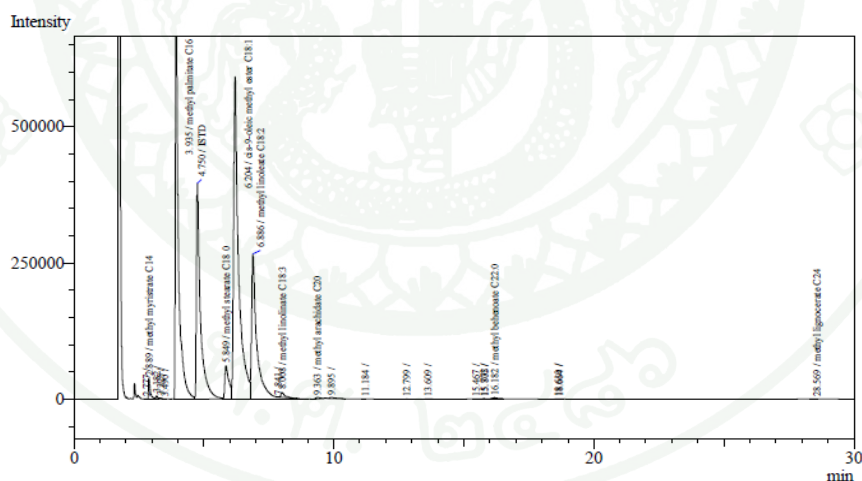
ภาพผนวกที่ ข25 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



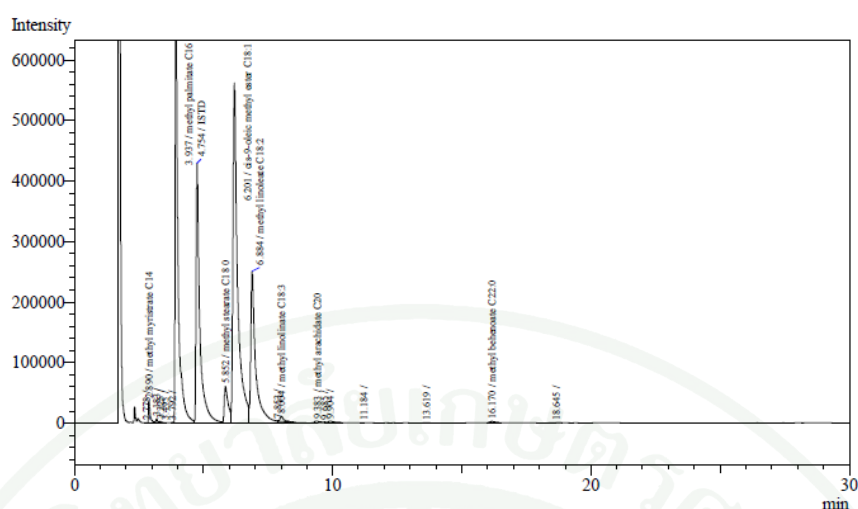
ภาพผนวกที่ ข26 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส



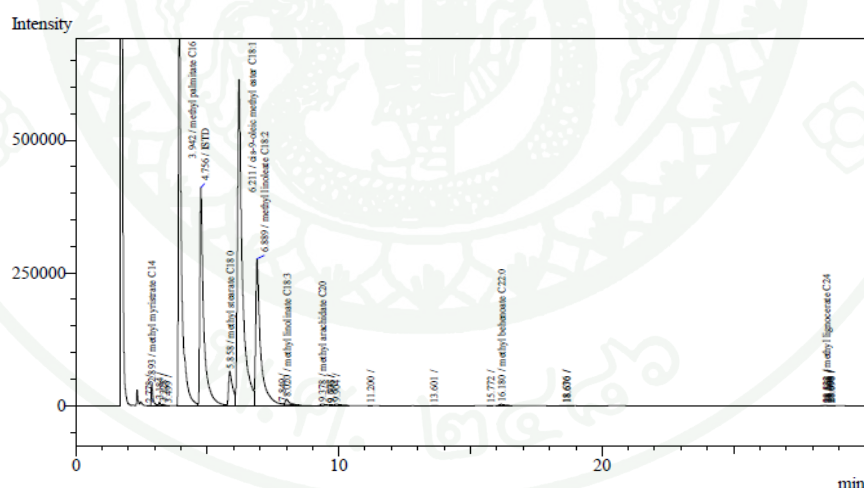
ภาพผนวกที่ ข27 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส



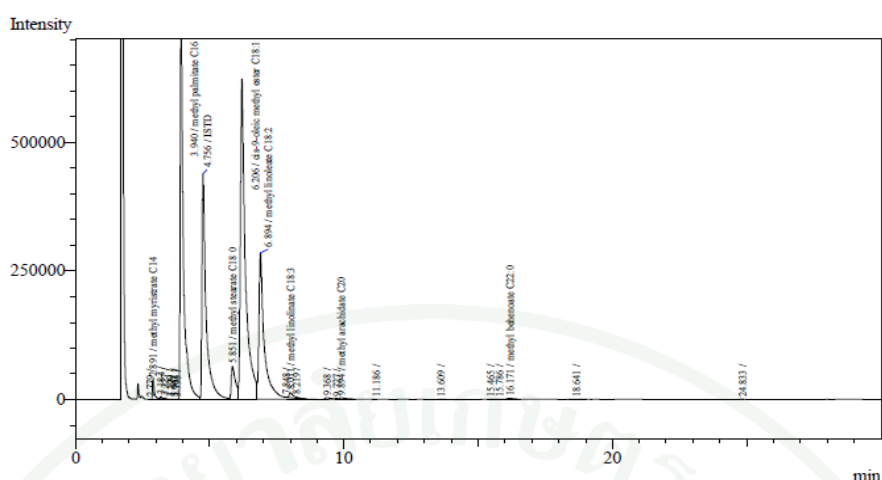
ภาพผนวกที่ ข28 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส



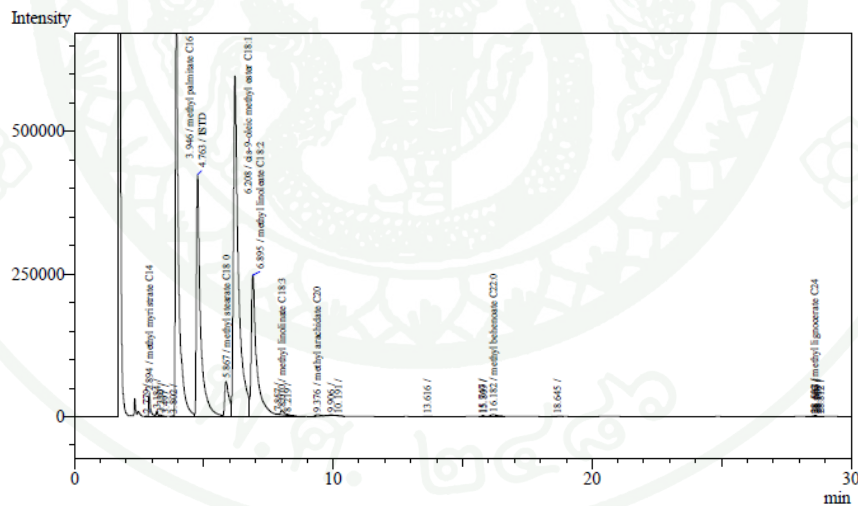
ภาพผนวกที่ ข29 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส



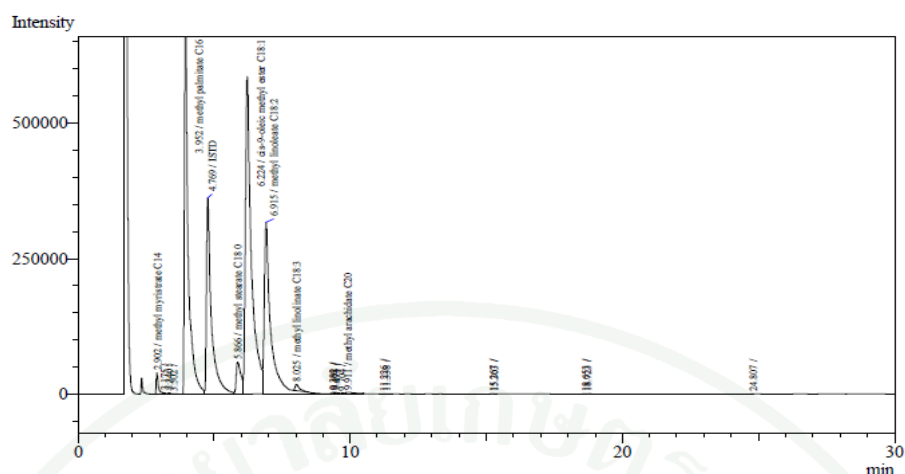
ภาพผนวกที่ ข30 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ข31 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ข32 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ข33 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่สภาวะในขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาทีและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ค

ค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้วหลังจากทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน
โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล

ตารางผนวกที่ ค1 ค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้วหลังจากทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล

การทดลอง ที่	เมทานอล ต่อ น้ำมัน	ความเข้มข้น ของ H_2SO_4 (wt %)	เวลาในการ ทำปฏิกิริยา (วินาที)	อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา (°C)	ค่าความเป็นกรด	
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	4.5	1	5	65	1.23	1.25
2	6	1	5	65	1.07	1.04
3	9	1	5	65	0.89	0.88
4	12	1	5	65	0.67	0.65
5	15	1	5	65	0.56	0.55
6	18	1	5	65	0.67	0.67
7	9	0.5	5	65	1.11	1.13
8	9	1	5	65	0.89	0.88
9	9	1.5	5	65	0.67	0.68
10	9	2	5	65	0.61	0.63
11	9	1	5	65	0.89	0.9
12	9	1	10	65	1.23	1.25
13	9	1	15	65	1.42	1.45
14	9	1	20	65	1.56	1.58
15	9	1	5	55	1.23	1.23
16	9	1	5	60	0.99	0.99
17	9	1	5	65	0.89	0.91
18	9	1	5	70	1.00	0.99

ภาคผนวก ง

ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล

ตารางผนวกที่ ๑1 ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบ
ไมโครชาแนล

การ ทดลอง ที่	เมทานอล ต่อ น้ำมัน	ความเข้มข้น ของ KOH (wt %)	เวลาใน การทำ ปฏิกิริยา (วินาที)	อุณหภูมิใน การทำ ปฏิกิริยา (°C)	เปอร์เซ็นต์ เมทิลเอสเทอร์		ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	
1	4.5	1	5	65	88.02	87.9	0.06
2	6	1	5	65	91.11	91.22	0.055
3	9	1	5	65	91.36	91.3	0.03
4	12	1	5	65	90.53	90.01	0.26
5	6	0.5	5	65	87.78	86.68	0.55
6	6	1.5	5	65	95.17	95.11	0.03
7	6	2	5	65	95.05	94.54	0.255
8	6	2.5	5	65	94.31	94.91	0.3
9	6	1.5	10	65	87.29	87.86	0.285
10	6	1.5	15	65	82.27	83.28	0.505
11	6	1.5	20	65	81.64	81.71	0.035
12	6	1.5	5	50	76.78	76.96	0.09
13	6	1.5	5	55	87.56	88.33	0.385
14	6	1.5	5	60	97.28	97.1	0.09
15	6	1.5	5	70	80.25	81.29	0.52

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายยุทธพงษ์ ธนวรรณพงศ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ.2530
สถานที่เกิด	จังหวัดสมุทรสาคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (พ.ศ.2552)
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

