



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
ปริญญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน
โดยใช้ไมโครเวฟ

Biodiesel Production of Jatropha Oil by Transesterification Using Microwave Irradiation

นามผู้วิจัย นางสาวพณีย์ แซ่อ่อง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรูญ นัตรमानพ, วศ.ด.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ไพศาล คงกาญจนาย, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้ไมโครเวฟ

Biodiesel Production of Jatropha Oil by Transesterification Using Microwave Irradiation

โดย

นางสาวพนีย์ แซ่อ่อง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2551

พจนีย์ แซ่อ่อง 2551: การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสนูปดำด้วยกระบวนการทรานส์
เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ไมโครเวฟ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรูญ ฉัตรมานพ, D. Eng. 126 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสนูปดำ และใช้
ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน เพื่อลดเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยศึกษาผลของการลดปริมาณ
น้ำที่มีอยู่ในน้ำมัน ที่มีผลกระทบต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์และผลได้ของไบโอดีเซล ซึ่งใช้
โซเดียมคลอไรด์ดูดซับน้ำที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์จาก 0 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
พบว่าเมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดูดซับน้ำในน้ำมันเริ่มต้น
นำไปผลิตไบโอดีเซล สามารถเพิ่มปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 3.37 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มผลได้ของไบ
โอดีเซล 4.60 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ใช้น้ำมันที่ผ่านการดูดซับน้ำแล้วมาผลิตไบโอดีเซล อีกทั้งยัง
ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอก
ไซด์จาก 0.5 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันจาก 6:1
ถึง 9:1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจาก 1 ถึง 5 นาที และอัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟจาก
90 ถึง 360 วัตต์ พบว่าสภาวะที่ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุด คือ การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้
ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทา
นอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 4 นาที และอัตราการให้ความร้อนของ
ไมโครเวฟ 90 วัตต์ ซึ่งในสภาวะดังกล่าวให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงถึง 99.97 เปอร์เซ็นต์
นอกจากนั้นนำไบโอดีเซล ณ สภาวะที่เหมาะสมมาวิเคราะห์คุณสมบัติพบว่า ความหนืดที่ 40
องศาเซลเซียสเป็น 4.51 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที จุดวาบไฟ 196 องศาเซลเซียส จุดหมอกควัน
4.0 องศาเซลเซียส จุดไหลเท 1.5 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด 0.28 มิลลิกรัม
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม โดยคุณสมบัติทั้งหมดผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจ
พลังงาน และมาตรฐาน ASTM D 6751-02

Potjanee Saeong 2008: Biodiesel Production of *Jatropha* Oil by Transesterification Using Microwave Irradiation. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Jarun Chutmanop, D. Eng. 126 pages.

This research investigated the optimum conditions of the biodiesel production from *Jatropha curcus* oil by microwave irradiation to reduce reaction time. The effect of water content in oil raw material on methyl ester content and biodiesel yield was studied by using sodium chloride concentration from 0-30 % by weight as an absorben. The results showed that the 20 % sodium chloride concentration by weight increased methyl ester content by 3.37 % and biodiesel yield by 4.60 %. In addition the effect of sodium methoxide concentration varied from 0.5-1.5 % by weight, molar ratio of methanol to oil from 6:1-9:1, reaction time ranged 1-5 minute and heat rate of microwave from 90-360 watt was investigated. It was found that the conditions which the highest methyl ester was achieved were 1.5% by weight of sodium methoxide, methanol to oil ratio of 7.5:1, reaction time of 4 minutes and heat rate of microwave at 90 watt. The percentage of methyl ester in the obtained product was 99.97%. The property of biodiesel at the optimization conditions was 4.51 mm²/s at 40 ° C of viscosity, 196 ° C of flash point, 4.0 ° C of cloud point, 1.5 ° C of pour point, 0.28 mg KOH/g of acid value and 99.97% of methyl ester content according to the department of energy business and ASTM D 6751-02 Standards.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

การที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จขึ้นมาได้ โดยได้รับความช่วยเหลือและความกรุณาจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรัญ ฉัตรมานพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ กรรมการที่ปรึกษา ที่ให้ความดูแลเอาใจใส่ ให้คำปรึกษา แนะนำ และตรวจสอบแก้ไขจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี อีกทั้งขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว และรองศาสตราจารย์ ดร.อภิญญา ดวงจันทร์ ที่กรุณาสละเวลาเพื่อเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำแนะนำและแนวคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้จัดทำ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง และบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนในด้านทุนวิจัยและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ วิศวกรรมเคมี และบุคคลรอบข้างทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และมีมิตรภาพที่ดีตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยให้กำลังใจ คอยอยู่เคียงข้าง ช่วยเหลือสนับสนุน และห่วงใย ข้าพเจ้าเสมอมา

ประโยชน์อันใดอันจะเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ วงศ์ตระกูล และคณาจารย์ทุกท่าน ที่กรุณาเมตตาอบรมสั่งสอน ให้ความรู้ คำแนะนำต่างๆ จนถึงปัจจุบัน

พจนีย์ แซ่อ่อง
กันยายน 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	42
อุปกรณ์	42
วิธีการ	44
ผลและวิจารณ์	48
สรุปและข้อเสนอแนะ	66
สรุป	66
ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	69
ภาคผนวก	76
ภาคผนวก ก การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน	77
ภาคผนวก ข การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของไบโอดีเซล	79
ภาคผนวก ค การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์	81
ภาคผนวก ง การคำนวณค่าความเป็นกรด	85
ภาคผนวก จ ลักษณะโครมาโตแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการ วิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี	87
ภาคผนวก ฉ ผลการวิเคราะห์ต่างๆ	120
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	126

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมัน	5
2	ปริมาณกรดไขมันในน้ำมันพืชชนิดต่างๆในประเทศไทย	6
3	องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดสบู่ดำ	8
4	สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันสบู่ดำ	10
5	กำหนดลักษณะ คุณภาพและวิธีทดสอบของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	24
6	การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล โดยการให้ความร้อนจากไมโครเวฟและการให้ความร้อนโดยตรง	58
7	ผลของอุณหภูมิไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำ หรือน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำมันหรือน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที และอัตราการให้ความร้อนเป็น 90 320 และ 360 วัตต์ตามลำดับ	61
8	คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน	62
9	ค่าผลได้ของไบโอดีเซลและค่าความเป็นกรด	64
ตารางผนวกที่		
ฉ1	ผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์	121
ฉ2	ผลการวิเคราะห์ผลได้ของไบโอดีเซล	123
ฉ3	ปริมาณน้ำในน้ำมันสบู่ดำที่ผ่านการดูดซับน้ำด้วยโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นเป็น 0 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหรือน้ำมัน ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Karl Fischer Coulometer	125

สารบัญญาน

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์	4
2 ลักษณะเมล็ดของสบู่ดำ	8
3 เครื่องบิบบอัดน้ำมันสบู่ดำ	9
4 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน	12
5 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์	12
6 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์	13
7 ปฏิกิริยาสaponification จากกรดไขมันอิสระ	14
8 ปฏิกิริยาสaponification จากเอสเทอร์	14
9 ปฏิกิริยาการผลิตคัลคอกไซค์	15
10 กลไกปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	15
11 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	16
12 กลไกปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	17
13 สมบัติของคลีนไมโครเวฟ	27
14 การจัดเรียงตัวของไอออนทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า	28
15 ชุดอุปกรณ์การผลิตไบโอดีเซล	45
16 ผลกระทบของปริมาณเมทิลเมทิลเอสเทอร์และผลได้ของไบโอดีเซล ที่ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เป็น 0 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันตามลำดับ	49
17 ผลกระทบของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ และความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์เป็น 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันตามลำดับ	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
18 ผลกระทบของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 7.5:1 และ 9:1 ตามลำดับ	54
19 ผลกระทบของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 7.5:1 อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ และเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 1 2 3 4 และ 5 นาที ตามลำดับ	56
20 ผลกระทบของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที และอัตราการให้ความร้อนเป็น 90 320 และ 360 วัตต์ ตามลำดับ	59
21 ผลกระทบของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที และอัตราการให้ความร้อนเป็น 90 320 และ 360 วัตต์ ตามลำดับ	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง	83
จ1 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 1)	88
จ2 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 2)	88
จ3 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 3)	89
จ4 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 1)	89
จ5 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 2)	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

- | | | |
|-----|--|----|
| จ6 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3) | 90 |
| จ7 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1) | 91 |
| จ8 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2) | 91 |
| จ9 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3) | 92 |
| จ10 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1) | 92 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

- จ11 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2) 93
- จ12 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3) 93
- จ13 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1) 94
- จ14 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2) 94
- จ15 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3) 95

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

- | | | |
|-----|--|----|
| จ16 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1) | 95 |
| จ17 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2) | 96 |
| จ18 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3) | 96 |
| จ19 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1) | 97 |
| จ20 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2) | 97 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

- | | | |
|-----|--|-----|
| จ21 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3) | 98 |
| จ22 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 6:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1) | 98 |
| จ23 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 6:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2) | 99 |
| จ24 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 6:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3) | 99 |
| จ25 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1) | 100 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
จ26 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)	100
จ27 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)	101
จ28 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)	101
จ29 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)	102
จ30 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)	102

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

- | | | |
|-----|--|-----|
| จ31 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1) | 103 |
| จ32 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2) | 103 |
| จ33 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3) | 104 |
| จ34 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1) | 104 |
| จ35 | โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2) | 105 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
จ36 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)	105
จ37 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)	106
จ38 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)	106
จ39 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)	107
จ40 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)	107

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
จ41 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)	108
จ42 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)	108
จ43 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)	109
จ44 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)	109
จ45 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)	110

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
จ46 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)	110
จ47 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)	111
จ48 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)	111
จ49 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที อัตราการให้ความร้อน 320 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)	112
จ50 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที อัตราการให้ความร้อน 320 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)	112

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
จ51 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที่ อัตราการให้ความร้อน 320 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 3)	
จ52 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที่ อัตราการให้ความร้อน 360 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 1)	113
จ53 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที่ อัตราการให้ความร้อน 360 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 2)	113
จ54 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที่ อัตราการให้ความร้อน 360 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 3)	114
จ55 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที่ อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 1)	114

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
จ56	โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)	
จ57	โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)	115
จ58	โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 320 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)	116
จ59	โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 320 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)	116
จ60	โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 320 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)	117

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
จ61 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 360 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 1)	118
จ62 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 360 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 2)	118
จ63 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 360 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 3)	119

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยใช้ไมโครเวฟ

Biodiesel Production of Jatropha Oil by Transesterification Using Microwave Irradiation

คำนำ

ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการเป็นพลังงานทดแทนน้ำมันดีเซล เนื่องจากไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความหนืดใกล้เคียงน้ำมันดีเซล และมีความคงตัว โดยความหนืดของไบโอดีเซลเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน อีกทั้งจุดวาบไฟของไบโอดีเซลมีค่าสูง ทำให้มีความปลอดภัยในการใช้งานและการขนส่ง นอกจากนี้ค่าซีเทนซึ่งเป็นดัชนีบอกถึงคุณสมบัติในการติดไฟของไบโอดีเซล ยังสูงกว่าน้ำมันดีเซลอีกด้วย (คณะกรรมการพลังงาน, 2545)

ไบโอดีเซลหรือสารประกอบเอสเทอร์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม เช่น กรด เบส หรือเอนไซม์ (Vicente *et al.*, 2004) โดยไบโอดีเซลที่ได้ สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ซึ่งมีคุณภาพแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต

ประเทศไทยมีการเพาะปลูกพืชน้ำมันหลายชนิด คือ สบู่ดำ ถั่วเหลือง ปาล์มน้ำมัน ถั่วลิสง มะพร้าว ละหุ่ง และงา นอกจากพืชน้ำมันที่เกษตรกรทำการเพาะปลูกแล้ว ยังมีแหล่งน้ำมันอื่นๆ เช่น น้ำมันสัตว์ น้ำมันพืชใช้แล้ว และน้ำมันสัตว์ใช้แล้ว ซึ่งแหล่งน้ำมันเหล่านี้สามารถใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลได้ทั้งสิ้น แต่กรณีของสบู่ดำแตกต่างจากพืชน้ำมันดังกล่าว คือ น้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำไม่สามารถบริโภคได้ รวมถึงกากหลังจากที่บีบน้ำมันออกแล้ว ก็ไม่เหมาะสมที่ใช้เป็นอาหารสัตว์ เนื่องจากในเมล็ดสบู่ดำมีสารพิษประเภท curcine หรือ curcasin อยู่ ดังนั้นราคาของสบู่ดำจึงไม่เปลี่ยนแปลงตามสภาวะการของโลก (คณะกรรมการพลังงาน, 2545)

สบู่ดำมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha Curcas* Linn. ซึ่งอยู่ในวงศ์ไมยางพารา มีลักษณะเป็นไม้พุ่มยืนต้นขนาดกลาง สูงประมาณ 2 ถึง 7 เมตร การสกัดน้ำมันสบู่ดำสามารถทำได้โดย นำ

เมล็ดสบู่ดำแห้ง มาทุบให้แตก แล้วนำไปตากแดด จากนั้นนำเมล็ดสบู่ดำเข้าเครื่องบีบอัดไฮดรอลิก หรือเครื่องอัดเกลียว โดยเมล็ดสบู่ดำ 4 กิโลกรัม สกัคน้ำมันได้ 1 ลิตร ซึ่งน้ำมันสบู่ดำในสภาพพร้อมใช้จะมีสีเหลืองอ่อนใสแม้ที่อุณหภูมิต่ำ (วรพล, 2551)

การผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่ากรด (Vicente *et al.*, 2004) แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตเบสจะทำให้เกิดสบู่ จากการทำปฏิกิริยากับเมทิลเอสเทอร์ ในปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน โดยมีน้ำเป็นส่วนร่วม ซึ่งสบู่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ แต่เราสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการกำจัดน้ำที่มีอยู่ในน้ำมันก่อนนำมาผลิตไบโอดีเซล

โซเดียมคลอไรด์มีชื่อเรียกทั่วไปว่าเกลือแกง สามารถรับประทานได้ ราคาถูก และหาง่าย ดังนั้นจึงถูกใช้อย่างกว้างขวางในการเป็นเครื่องปรุงรส และการถนอมอาหาร นอกจากคุณสมบัติดังกล่าวแล้ว โซเดียมคลอไรด์ยังสามารถดูดความชื้นได้ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โซเดียมคลอไรด์ในการดูดซับน้ำในน้ำมันก่อนนำมาผลิตไบโอดีเซล เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชันในการผลิตสบู่ (วิกิพีเดีย, 2551; สุจิตรา และอาทิตยา, 2550)

การผลิตไบโอดีเซลส่วนใหญ่นิยมให้ความร้อนโดยตรง แต่วิธีนี้ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน ดังนั้นเพื่อลดเวลาในการทำปฏิกิริยา งานวิจัยนี้จึงเปลี่ยนการให้ความร้อนโดยตรงมาเป็นการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และกระตุ้นขั้วของโมเลกุลให้จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นลักษณะเช่นเดียวกันนี้ทุกโมเลกุล (Polarization) และขณะที่โมเลกุลเคลื่อนที่เพื่อจัดเรียงตัวนั้น ทำให้มีความร้อนเกิดขึ้น จึงช่วยเร่งปฏิกิริยาเคมี และลดเวลาในการทำปฏิกิริยา (Lidstrom *et al.*, 2001; Saifuddin and Chua, 2004)

งานวิจัยนี้ให้ความสนใจใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน เพื่อลดเวลาในการทำปฏิกิริยา ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อพัฒนาสู่ระดับอุตสาหกรรมต่อไป

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและเมทานอล ด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน โดยใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน

2. ศึกษาปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ดูดซับน้ำในน้ำมันสบู่ดำ

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและเมทานอล ด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน โดยใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน

1.1 ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมเมทอกไซด์จาก 0.5 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน

1.2 ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันจาก 6:1 ถึง 9:1

1.3 ศึกษาผลกระทบของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจาก 1 ถึง 5 นาที

1.4 ศึกษาผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟจาก 90 ถึง 360 วัตต์

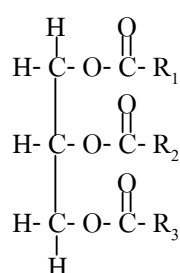
2. ใช้โซเดียมคลอไรด์ดูดซับน้ำในน้ำมันสบู่ดำ และนำมาผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน โดยศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์จาก 0 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน

3. ทดสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซลได้แก่ ค่าความเป็นกรด ความหนืด จุดไหลเท จุดหมอกควัน และจุดวาบไฟ

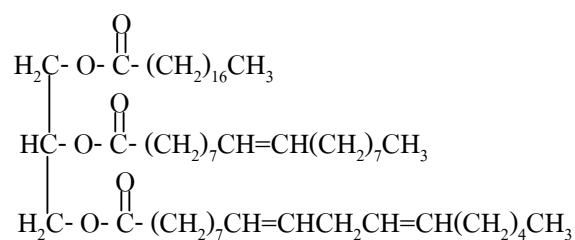
การตรวจเอกสาร

ไขมันและน้ำมัน

น้ำมันพืชและไขมันจากสัตว์เป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งโครงสร้างของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์สามารถแสดงดังภาพที่ 1 โดยสารประกอบไตรกลีเซอไรด์มีกรดไขมันหลายชนิดเป็นองค์ประกอบหลัก ที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 10 ถึง 30 โมเลกุล และมีปริมาณของกรดไขมันอยู่ในโครงสร้างถึง 94-96 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ ทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันแต่ละชนิด แตกต่างกันไปตามสมบัติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ ซึ่งในน้ำมันพืชส่วนใหญ่จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในกรดไขมัน ระหว่าง 12 ถึง 18 โมเลกุล (นิรนาม, 2551) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมี และองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันแสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



ไตรกลีเซอไรด์



ตัวอย่างโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์

ภาพที่ 1 โครงสร้างของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์

ที่มา: Srivastava and Prasad (2000)

ตารางที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมัน

Fatty acid	Systematic	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	<i>cis</i> -9- Octadecenoic	18:1	$C_{18}H_{34}O_2$
Linoleic	<i>cis</i> -9, <i>cis</i> -12- Octadecadienoic	18:2	$C_{18}H_{32}O_2$
Linolenic	<i>cis</i> -9, <i>cis</i> -12, <i>cis</i> -15- Octadecatrienoic	18:3	$C_{18}H_{30}O_2$
Erucic	<i>cis</i> -13-Docosenoic	22:1	$C_{22}H_{42}O_2$

ที่มา: Srivastava and Prasad (2000)

ตารางที่ 2 ปริมาณกรดไขมันในน้ำมันพืชชนิดต่างๆในประเทศไทย

Fatty acid	Crude palm oil	Crude coconut oil	Jatropha oil	Palm stearin	Palm olein	Soybean oil	Sunflower oil
Caprylic acid (C ₈ /0)	-	7.42	-	-	-	-	-
Capric acid (C ₁₀ /0)	-	5.78	-	-	-	-	-
Lauric acid (C ₁₂ /0)	0.35	49.75	-	0.25	0.37	0.1	-
Myristic acid (C ₁₄ /0)	0.92	18.75	-	1.27	0.91	0.2	0.1
Palmitic acid (C ₁₆ /0)	44.11	8.60	14.85	59.19	38.53	10.7	6.0
Stearic acid (C ₁₈ /0)	4.36	2.63	7.43	4.43	0.08	3.9	4.0
Arachidic acid (C ₂₀ /0)	0.09	0.18	0.08	0.31	0.13	0.2	1.2
Sum of saturated FA	49.83	93.13	22.36	65.45	40.02	15.1	11.2
Palmitoleic acid (C ₁₆ /1)	-	-	-	0.08	-	0.3	< 1.0
Oleic acid (C ₁₈ /1)	38.97	5.53	47.65	28.61	58.13	22.8	16.5
Linoleic acid (C ₁₈ /2)	11.21	1.26	29.80	5.86	1.78	50.8	72.4
Linolenic acid (C ₁₈ /3)	-	0.07	0.19	-	0.07	6.8	0.6
Sum of unsaturated FA	50.18	6.86	77.64	34.55	59.98	80.7	90.5

ที่มา: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2550)

สบู่ดำ

สบู่ดำเป็นพืชน้ำมันชนิดหนึ่ง มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha Curcas Linn.* ซึ่งอยู่ในวงศ์ไม้ยางพารา Euphorbiaceae สบู่ดำเป็นพืชพื้นเมืองของทวีปอเมริกาใต้ โดยชาวโปรตุเกสนำเข้ามาปลูกในประเทศไทย ในช่วงปลายสมัยกรุงศรีอยุธยา เพื่อนำเมล็ดไปบีบเอาน้ำมันมาทำสบู่สำหรับทำความสะอาดผิวกาย ปัจจุบันสบู่ดำมีปลูกอยู่ทั่วทุกภาคของประเทศไทย มีชื่อเรียกแตกต่างกันไปตามแต่ภูมิภาค เช่น ภาคเหนือเรียกว่ามะหุ้งฮั่ว ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเรียกว่ามะเขือหรือสีหลอด ภาคใต้เรียกว่ามาเคาะ เป็นต้น พืชสกุลนี้จัดเป็นไม้สกุลใหญ่ กระจายอยู่ทั่วไปในพื้นที่เขตร้อนและกึ่งร้อน

1. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์สบู่ดำ

สบู่ดำเป็นไม้พุ่มยืนต้นขนาดกลาง สูงประมาณ 2-7 เมตร มีอายุไม่น้อยกว่า 20 ปี จัดอยู่ในวงศ์ Euphorbiaceae เช่นเดียวกับยางพารา สบู่แดง ปัตตาเวีย มะละกอฝรั่ง หนุมานนั่งแท่น ไป้ยเซียน มันสำปะหลัง มะยม มะขามป้อม ผักหวานบ้าน เป็นต้น ลำต้น มีเปลือกลำต้นเรียบ มีสีเทาน้ำตาล ลำต้นเกลี้ยง อวบน้ำ เป็นไม้เนื้ออ่อน ไม่มีแก่น หักง่าย มีน้ำยางสีขาวใส ใบเป็นใบเดี่ยวรูปไข่ กว้างหรือค่อนข้างกลม จัดเรียงแบบสลับ โคนใบเว้าเป็นรูปหัวใจ ปลายใบแหลม ขอบใบเรียบหรือหยักเว้า 3-5 หยัก ดอกมีช่อดอกแบบ Panicle หรือ Panicle cyme ประกอบด้วยดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในช่อดอกเดียวกัน ดอกทั้ง 2 ชนิด มีกลีบรองและกลีบดอกอย่างละ 5 กลีบ ดอกตัวผู้มีเกสรเรียงเป็นวง 2 วง วงละ 5 อัน ดอกตัวเมียมีรังไข่ ก้านเกสรตัวเมียมี 6 แฉก ดอกมีขนาดเล็กสีเขียวแกมเหลือง มีกลิ่นหอมอ่อนๆ ออกเป็นช่อที่ซอกใบหรือปลายยอด ในช่อดอกเดียวกันมีดอกตัวผู้มากกว่าดอกตัวเมียมีอัตราดอกตัวผู้:ดอกตัวเมียเท่ากับ 6-7:1 ดอกแต่ละช่อบานไม่พร้อมกัน มีช่อดอกประมาณ 15-30 ช่อต่อต้น แต่ละช่อดอกมีดอกย่อย 70-120 ดอก แต่ละช่อติดผลเพียง 8-14 ผล ผลที่เกิดจากช่อดอกเดียวกันจะสุกแก่ไม่พร้อมกัน ผลอ่อนมีสีเขียว เมื่อแก่มีสีเหลืองคล้ายลูกจันทน์ ผลมีลักษณะกลมรีเล็กน้อย ขนาดปานกลาง กว้าง 2-3 เซนติเมตร ยาว 2.5-3.5 เซนติเมตร ผลมี 3 พลู พลูละ 1 เมล็ด เมื่อสุกแก่ผลจะปริแตก ผลสด 1 กิโลกรัมมีจำนวน 85-90 ผล เมล็ดมีลักษณะกลมรีเปลือกนอกสีดำ เนื้อในสีขาว ภายในมีสารพิษ (curcin) หากบริโภคจะเกิดอาการอาเจียนและท้องเสีย เมล็ดกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร ยาวประมาณ 2 เซนติเมตร น้ำหนัก 100 เมล็ด ประมาณ 70 กรัม เมล็ด 1 กิโลกรัม มีประมาณ 1,300-1,500 เมล็ด (อนุวัฒน์, 2550) โดยลักษณะของเมล็ดสบู่ดำ และองค์ประกอบทางเคมีแสดงดังภาพที่ 2 และตารางที่ 3 ตามลำดับ



ภาพที่ 2 ลักษณะเมล็ดของสบู่ดำ

ที่มา: สุจินันท์ (2549)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดสบู่ดำ

องค์ประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
ความชื้น	5.05 ± 0.09
ไขมัน	46.34 ± 0.87
โปรตีน	22.00 ± 0.29
เส้นใย	14.80 ± 0.57
กากถ่าน	5.00 ± 0.06

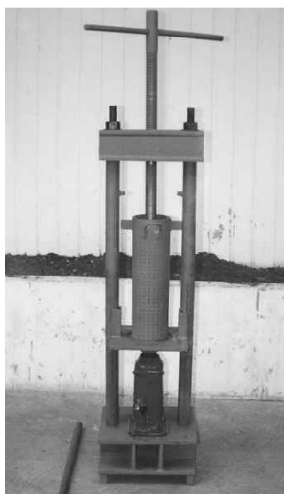
ที่มา: ปฐม และคณะ (2548)

2. การสกัดน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำ

การสกัดแยกน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำที่นิยมทำกันมากคือ วิธีการบีบอัด ซึ่งสามารถใช้เครื่องอัดแบบไฮดรอลิก หรือเครื่องอัดเกลียว ปริมาณน้ำมันที่ได้ขึ้นกับแรงอัด โดยถ้าใช้แรงอัดสูงจะได้ปริมาณน้ำมันมาก แต่น้ำมันที่ได้มีคุณภาพลดลง เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจะเร่งปฏิกิริยาเคมี ทำให้น้ำมันเสื่อมสภาพได้เร็ว โดยสามารถแบ่งการสกัดน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำได้ 2 วิธี (สุปรียา, 2550)

2.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย วิธีนี้นิยมใช้สกัดน้ำมันในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ปิโตรเลียมอีเทอร์เป็นตัวทำละลาย และได้น้ำมัน 54.68 เปอร์เซ็นต์ จากเนื้อเมล็ด

2.2 การสกัดด้วยเครื่องบีบอัด ทำได้โดยนำผลสดบดแห้ง (ผลสีเหลืองถึงสีดำ) ที่แก่จากต้นมะกะเทาะเปลือกออกให้เหลือเฉพาะเมล็ด จากนั้นนำไปล้างน้ำทำความสะอาด และนำมาผึ่งลมให้เมล็ดแห้ง แล้วนำไปบดเมล็ดให้แตก โดยการทุบหรือบดหยาบ นำเมล็ดที่บดแล้วไปตากแดดเพื่อรับความร้อนประมาณ 30 นาที แล้วนำเข้าเครื่องอัดเกลียว หรือเครื่องอัดไฮดรอลิก แสดงเครื่องบีบอัดน้ำมันสบู่ดำดังภาพที่ 3 น้ำมันที่สกัดได้จะมีสีน้ำตาลเข้ม จากนั้นนำน้ำมันไปกรองเพื่อแยกเศษผง โดยจะได้น้ำมันประมาณ 25-30 เปอร์เซ็นต์ มีน้ำมันตกค้างในกาก 10-15 เปอร์เซ็นต์ โดยเมล็ดสบู่ดำ 4 กิโลกรัม สกัดน้ำมันได้ 1 ลิตร ซึ่งน้ำมันสบู่ดำในสภาพพร้อมใช้จะมีสีเหลืองอ่อนใส (วรพล, 2551)



ภาพที่ 3 เครื่องบีบอัดน้ำมันสบู่ดำ

ที่มา: ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร (2549)

3. คุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำ

น้ำมันสบู่ดำมีลักษณะสีเหลืองใสแม้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยแสดงสมบัติดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันสบู่ดำ

สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันสบู่ดำ	ผลการวิเคราะห์
ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)	2.13
ปริมาณกรดไขมันอิสระ (เปรียบเทียบกับกรดโอเลอิก, เปอร์เซ็นต์)	1.07
ค่าเปอร์ออกไซด์ (มิลลิกรัมสมมูลย์เปอร์ออกไซด์ออกซิเจนต่อกิโลกรัม)	1.31
ค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัม)	97.17
ค่าสaponifiเคชัน (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)	189.87
สารที่สaponifiเคชันไม่ได้ (เปอร์เซ็นต์)	5.01
ความหนืดที่ 30 องศาเซลเซียส (ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที)	46.6
ความหนาแน่นที่ 15 องศาเซลเซียส (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.903
ค่าซีลเฟต (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	0.0078

ที่มา: ปฐม และคณะ (2548)

ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (Biodiesel) คือ น้ำมันที่ผลิตได้จากการนำน้ำมันพืชชนิดต่างๆ หรือน้ำมันที่ใช้ปรุงอาหารแล้วมาแปรสภาพ โดยผ่านกระบวนการเคมีกับแอลกอฮอล์ ได้เป็นน้ำมันชนิดใหม่อยู่ในรูปของเอสเทอร์ ที่มีความคุณภาพแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของกรดไขมัน และจำนวนพันธะคู่ ซึ่งจะมีผลต่อค่าซีเทน ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ได้ (บริษัท พาราไซ แอนด์ฟีก จำกัด, 2547)

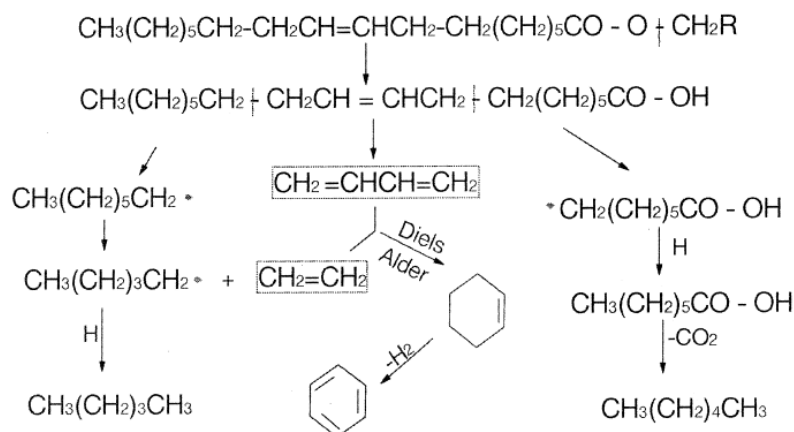
1. กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

1.1 การใช้โดยตรง (Direct use and blending) เป็นการใช้น้ำมันพืชโดยตรง หรือผสมลงในน้ำมันดีเซลในสัดส่วนต่างๆ เพื่อต้องการลดความหนืดของน้ำมันพืช เมื่อนำมาใช้จะก่อปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์ ถึงแม้ว่าเครื่องยนต์ดีเซลบางประเภทจะสามารถทำงานได้กับน้ำมันพืชบริสุทธิ์ก็ตาม แต่ก็มีปัญหามากมายเกิดขึ้นตามมา เช่น มียางเหนียวเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันอิสระในระหว่างการเก็บรักษา หรือเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) จากขั้นตอนการ

เผาไหม้ ซึ่งลักษณะการเผาผลาญพลังงานระหว่างน้ำมันพืชบริสุทธิ์ และน้ำมันดีเซลพบว่าเป็นไปในแบบเดียวกัน และมีรายงานการทดลองว่าการผสมน้ำมันพืชลงในน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 1:10 ถึง 2:10 สามารถนำไปใช้งานได้ (ปวีณา, 2548)

1.2 ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) คือคอลลอยด์ที่อยู่ในสถานะสมดุลของระบบที่ใช้เอมิัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) หรือใช้สารที่มีส่วนที่มีประจุและไม่มีประจุอยู่ร่วมกันเป็นตัวประสานของสารสองชนิดที่ไม่ละลายกัน ให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งวิธีนี้ใช้แก้ปัญหาความหนืดของน้ำมัน โดยการผสมน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์แล้วทำให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน และใช้เอมิัลซิไฟเออร์เป็นตัวประสาน คอลลอยด์ที่ได้จะมีขนาดอนุภาคระหว่าง 1-150 นาโนเมตร (Ma and Hanna, 1999) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Goering *et al.* (1982) พบว่าเมื่อนำน้ำมันถั่วเหลืองผสมกับเอทานอล ด้วยวิธีไมโครอิมัลชัน เพื่อใช้กับเครื่องยนต์ในเวลาสั้นๆ พบว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลหมายเลขสอง แม้ว่าจะให้ค่าซีเทนและค่าพลังงานต่ำกว่าก็ตาม แต่จากการศึกษาของ Ziejewski *et al.* (1984) พบว่าเมื่อใช้น้ำมันจากการผลิตโดยวิธีนี้กับเครื่องยนต์เป็นเวลานาน จะทำให้เกิดการสะสมของสารโลหะหนัก และคราบเขม่าจำนวนมาก การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และน้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดเพิ่มขึ้น

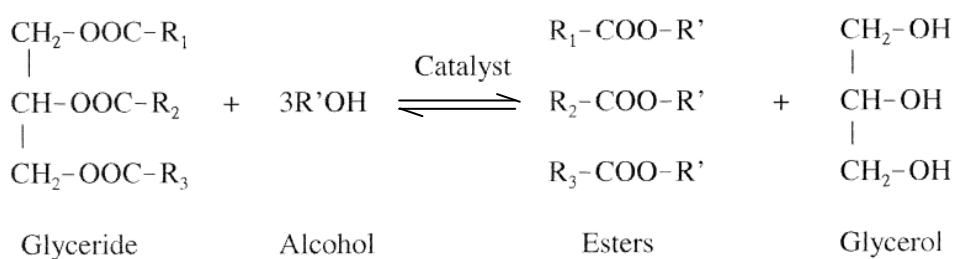
1.3 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Thermal cracking or Pyrolysis) เป็นการเปลี่ยนสารหนึ่งไปเป็นอีกสารหนึ่งที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง โดยใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว หรือใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งความร้อนที่ใช้จะมีอุณหภูมิ 550-850 องศาเซลเซียส วัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนได้แก่ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรดไขมันธรรมชาติ และเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน เป็นต้น ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นโดยวิธีนี้มีหลายรูปแบบ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีหลายแบบเช่น แอลเคน แอลคีน อะโรมาติก และกรดคาร์บอกซิลิก เป็นต้น แต่การผลิตไบโอดีเซลโดยวิธีนี้มีข้อเสียคือ เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตมีราคาแพง น้ำมันที่ผลิตได้โดยวิธีนี้มีลักษณะคล้ายก๊าซโซลีนมากกว่าไบโอดีเซล และกระบวนการผลิตที่มีการดึงออกซิเจนออกจึงเป็นผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย กลไกของกระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Ma and Hanna, 1999) แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน

ที่มา: Schwab *et al.* (1988)

1.4 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification or Alcoholysis) เป็นการผลิตไบโอดีเซล หรือสารประกอบเอสเทอร์ จากการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็น 3:1 เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์คือเอสเทอร์ 3 โมล และกลีเซอรอล 1 โมล (Vicente *et al.*, 2004) และสมการปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันสามารถเขียนได้ดังภาพที่ 5



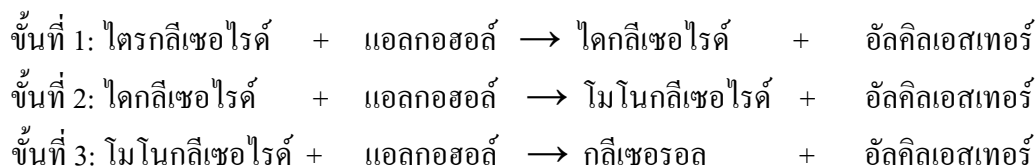
ภาพที่ 5 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์

ที่มา: Ma and Hanna (1999)

กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน โดยในขั้นตอนแรก เมื่อไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ จะถูกเปลี่ยนไปเป็นไดกลีเซอไรด์

จากนั้นไตรกลีเซอไรด์จะถูกเปลี่ยนต่อไปเป็นโมโนกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นกลีเซอรอล ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะผลิตเอสเทอร์ 1 โมเลกุล (Fukuda *et al.*, 2001)

แสดงดังภาพที่ 6



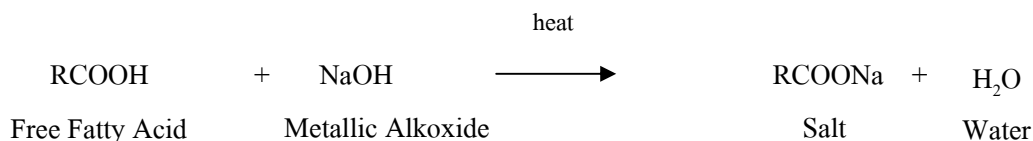
ภาพที่ 6 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์

ที่มา: Fukuda *et al.* (2001)

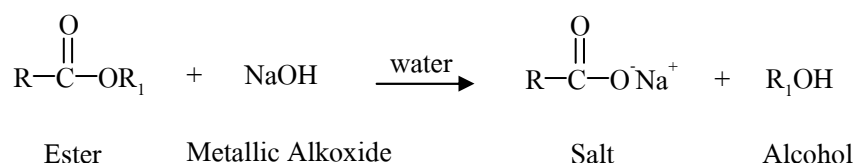
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

2.1 การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Leung and Guo, 2006; Vicente *et al.*, 2004) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด อีกทั้งยังต้องการอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าอีกด้วย แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีข้อจำกัดคือ น้ำมันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีค่าความเป็นกรดน้อยกว่า 1 (Freedman *et al.*, 1984; Ma and Hana, 1999) หรือมีปริมาณกรดไขมันอิสระน้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ (Freedman *et al.*, 1984; Wang *et al.* 2006) นอกจากนั้นสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาควรมีน้ำเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากน้ำเพียง 0.3 เปอร์เซ็นต์สามารถลดผลได้ของไบโอดีเซล (Freedman *et al.*, 1984) เนื่องจากน้ำมีส่วนช่วยให้เบสทำปฏิกิริยากับเอสเทอร์ในปฏิกิริยาสaponifiเคชันเพื่อเกิดเป็นสบู่ อีกทั้งสบู่ที่เกิดขึ้นยังเป็นการเพิ่มความหนืดกับน้ำมัน และเกิดการรวมตัวกันเป็นเจล ทำให้เกิดความยุ่งยากในการแยกชั้นกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลอีกด้วย ซึ่งสามารถแสดงปฏิกิริยาสaponifiเคชันได้ดังภาพที่ 7 และภาพที่ 8



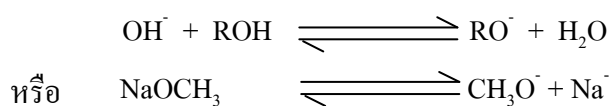
ภาพที่ 7 ปฏิกิริยาสaponification จากกรดไขมันอิสระ



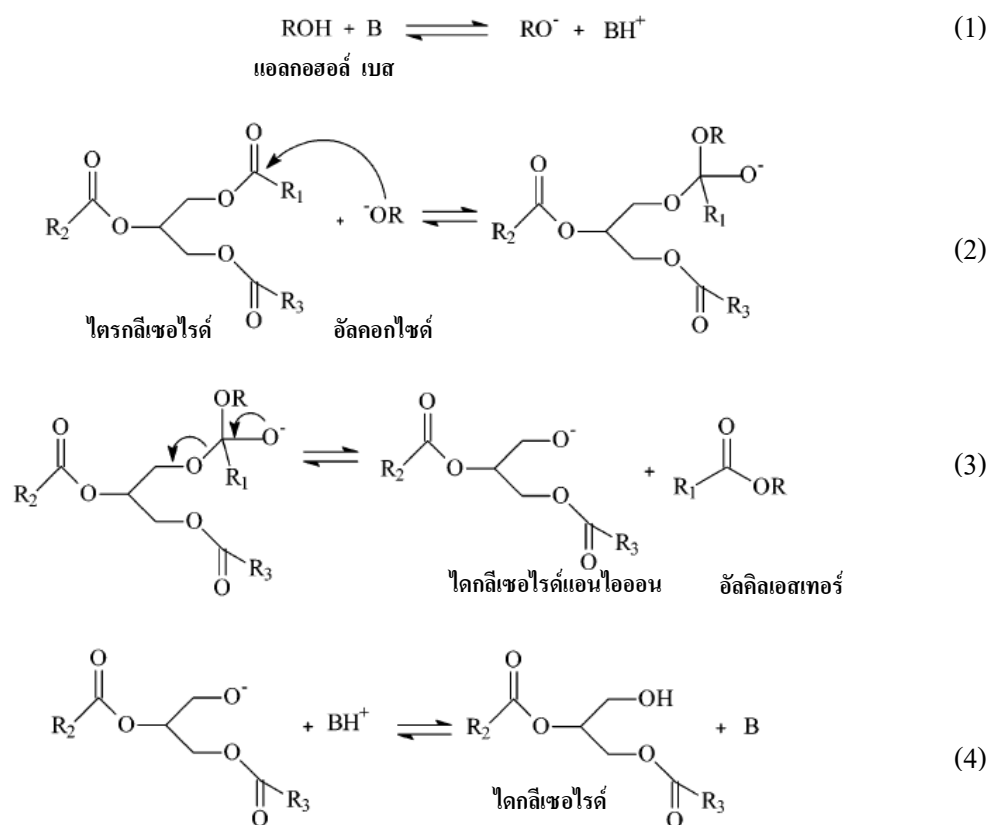
ภาพที่ 8 ปฏิกิริยาสaponification จากเอสเทอร์

การผลิตไบโอดีเซลผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วยปฏิกิริยาผันกลับได้ 3 ขั้นตอน โดยอัลคอกไซด์ (Alkoxide) จะทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ตามลำดับ เพื่อผลิตกลีเซอรอล โดยแต่ละขั้นตอนผลิตเมทิลเอสเทอร์ 1 โมเลกุล (Mahajan *et al.*, 2007)

การผลิตอัลคอกไซด์แบ่งเป็น 2 วิธี ได้แก่ กรณีที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดจากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลงในแอลกอฮอล์ แล้วผลิตอัลคอกไซด์และน้ำ โดยน้ำที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับน้ำมัน เกิดเป็นสบู่ในปฏิกิริยาสaponification ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการลดผลได้ของไบโอดีเซล แต่กรณีการใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมเมทอกไซด์ที่ละลายในแอลกอฮอล์ จะเกิดการแตกตัวเป็นอัลคอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยปราศจากการเกิดน้ำ จึงไม่ลดผลได้ของไบโอดีเซล (Leung and Guo, 2006) แสดงได้ดังภาพที่ 9 และสามารถแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันได้ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 9 ปฏิริยาการผลิตอัลคอกไซด์



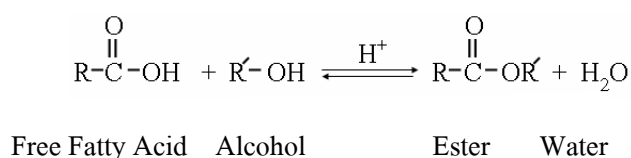
ภาพที่ 10 กลไกปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Lotero *et al.* (2005)

กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเริ่มจาก (1) สร้างอัลคอกไซด์ (2) อัลคอกไซด์ เมื่อสูญเสียโปรตอนจะเข้าทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ ณ ตำแหน่งหมู่คาร์บอนิล (3) ผลิตอัลคิลเอสเทอร์และไตรกลีเซอไรด์แอนไอออน (4) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับโปรตอนจะเข้าทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์แอนไอออนเพื่อผลิตไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกันนี้อีก 2 ครั้ง จนสุดท้ายได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และกลีเซอรอล

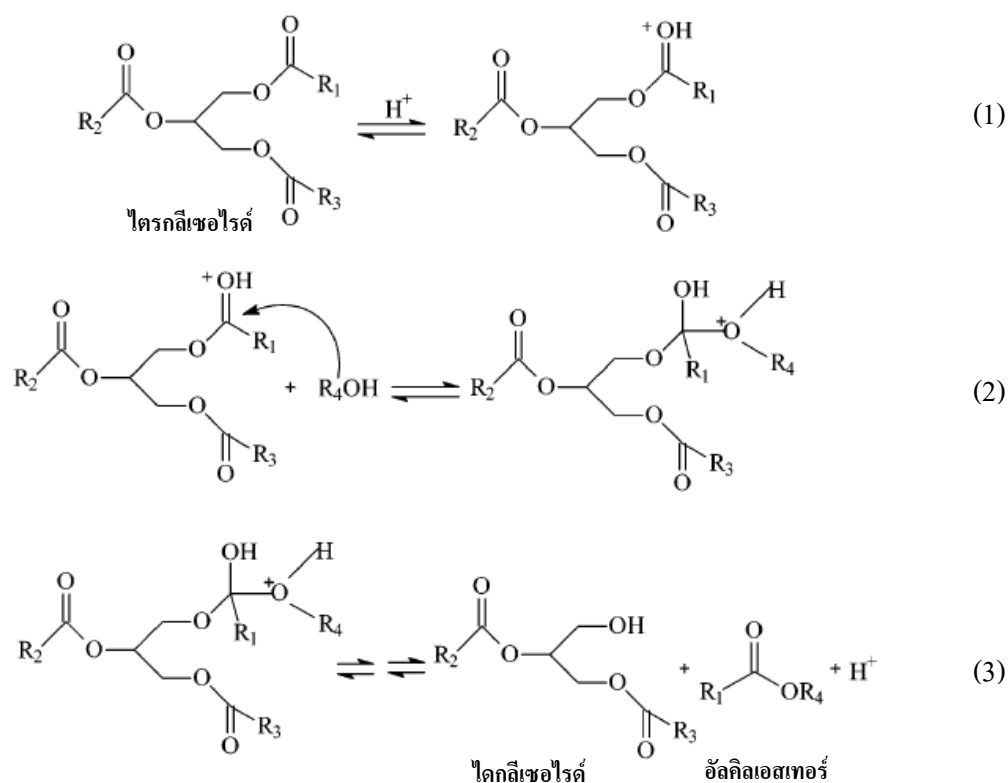
2.2 การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดที่นิยมใช้ได้แก่ กรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลโฟนิก เป็นต้น (Vicente *et al.*, 2004) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ นิยมใช้น้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง เช่น น้ำมันทอดอาหาร ซึ่งน้ำมันชนิดนี้มีราคาถูก อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดสามารถผลิตไบโอดีเซล ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน และเอสเทอริฟิเคชันได้พร้อมๆ กัน (Lotero *et al.*, 2005) โดยการเปลี่ยนกรดไขมันอิสระในน้ำมันเป็นเอสเทอร์ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 11 แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีข้อเสียคือ ต้องการเวลาในการทำปฏิกิริยานานกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (Lopez *et al.*, 2007) อีกทั้งยังต้องใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสอีกด้วย (Freedman *et al.*, 1984)



ภาพที่ 11 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันซึ่งมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังนี้ (1) โปรตอนจากตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าทำปฏิกิริยาไตรกลีเซอไรด์ ณ ตำแหน่งหมู่คาร์บอนิล (2) แอลกอฮอล์เข้าทำปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งเดียวกัน (3) เกิดการแตกพันธะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไตรกลีเซอไรด์อัลคิลเอสเทอร์ และโปรตอนซึ่งจะทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกันนี้อีก 2 ครั้ง จนสุดท้ายได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และกลีเซอรอล แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กลไกปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Lotero *et al.* (2005)

2.3 การใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ เมื่อใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะไม่ก่อให้เกิดสบู่มากจากปฏิกิริยาสaponification (Vicente *et al.*, 2004) อีกทั้งเอนไซม์ไลเปสยังสามารถเปลี่ยนกรดไขมันอิสระในน้ำมันเป็นเอสเทอร์ และยังไม่ต้องการขั้นตอนการล้างไบโอดีเซล เพื่อกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาอีกด้วย แต่เอนไซม์ไลเปสมีราคาแพงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เบสและกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตไบโอดีเซลระดับอุตสาหกรรม (Hanh *et al.*, 2007) อีกทั้งยังเสียเสถียรภาพได้ง่ายเมื่อใช้เมทานอลในปริมาณมาก นอกจากนั้นกลีเซอรอลที่เกิดขึ้น จะไปดูดซับบนผิวหน้าของเอนไซม์ไลเปสได้ง่าย จึงเป็นการลดกิจกรรมเอนไซม์อีกด้วย (Xu *et al.*, 2005)

2.4 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์ (Heterogeneous catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซล เนื่องจากเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) ชนิดกรดและเบสในการผลิตไบโอดีเซล จะก่อให้เกิดมลพิษจากน้ำล้างในขั้นตอนการล้าง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์ไม่ต้องการขั้นตอนนี้ อีกทั้งยังไม่ก่อให้เกิดความยุ่งยากในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากไบโอดีเซล และสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ จึงลดค่าใช้จ่าย (Anton *et al.*, 2006)

3. ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

3.1 ผลของกรดไขมันอิสระในน้ำมัน

กรดไขมันอิสระเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสำคัญสำหรับการผลิตไบโอดีเซลผ่านกระบวนการ ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเบสจะถูกใช้ไปกับการทำปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชันกับกรดไขมันอิสระ และมีผลิตภัณฑ์เป็นสบู่ ดังนั้นจึงลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา และลดผลได้ของไบโอดีเซลอีกด้วย นอกจากนี้สบู่ที่เกิดขึ้นจะเพิ่มความหนืดให้กับน้ำมัน และเกิดความยุ่งยากในขั้นตอนการแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซล

Lertsathapornsuk *et al.* (2005) พบว่าน้ำมันทอดอาหารที่ใช้แล้ว ซึ่งมีค่าความเป็นกรดสูงกว่าน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันรำข้าว เมื่อนำมาผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะการทดลองเดียวกัน โดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ให้ปริมาณเอทิลเอสเทอร์ต่ำกว่าทั้งสองชนิด

สำหรับน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง สามารถแก้ไขโดยการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปลี่ยนกรดไขมันอิสระไปเป็นเอสเทอร์โดยผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน แล้วจึงใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไป

3.2 ผลของน้ำในน้ำมัน

ปริมาณน้ำเป็นปัจจัยสำคัญทั้งการผลิตไบโอดีเซลแบบใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในน้ำมัน เมทานอล หรือตัวเร่งปฏิกิริยาควรเลือกใช้ชนิดที่ไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ

เนื่องจากน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสปอนิฟิเคชัน โดยพบว่าปริมาณน้ำที่อยู่ในสารตั้งต้นมีผลกระทบโดยตรงกับการลดผลได้ของไบโอดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ (Fukuda *et al.*, 2001)

จากการศึกษาของ Kusdiana and Saka (2004) ทำการทดลองผลของน้ำที่มีอยู่ในปฏิกิริยา จากการผลิตไบโอดีเซล 3 วิธี คือ การใช้สภาวะเหนือจุดวิกฤต และการใช้กรดและเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลได้ของไบโอดีเซล พบว่าการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำมีผลกระทบมากที่สุดโดยน้ำเพียง 0.1 เปอร์เซ็นต์ก็ลดผลได้ของไบโอดีเซล และน้ำ 5 เปอร์เซ็นต์ก็สามารถลดผลได้ของไบโอดีเซลลง 6 เปอร์เซ็นต์ โดยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีผลกระทบรองลงมา ส่วนกรณีการผลิตไบโอดีเซลแบบการใช้สภาวะเหนือจุดวิกฤต น้ำไม่มีผลกระทบ

โดยเราสามารถกำจัดน้ำในน้ำมันได้โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ จากการศึกษาศุจิตรา และ อาทิตยา (2550) ซึ่งนำน้ำมันพืชใช้แล้วทั้งหมดมาผ่านคอลัมน์เกลือโซเดียมคลอไรด์ จำนวน 5 รอบ แล้วนำมาวัดหาปริมาณน้ำที่ลดลงด้วยเครื่อง Karl Fischer Coulometer พบว่าปริมาณน้ำลดลง 59.48 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการดูดซับน้ำของเกลือเป็นแบบการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งโมเลกุลของน้ำจะเข้าไปแทรกอยู่ในรูพรุนเกลืออย่างไม่เฉพาะเจาะจง และอาศัยแรงวาลเดอร์วาลส์ในการยึดเกาะ (ชาวริน และคณะ, 2549)

3.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน

ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันต้องการอัตราส่วนโดยมวลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 3:1 เพื่อผลิตเมทิลเอสเทอร์ 3 โมลและกลีเซอรอล 1 โมล แต่เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นจึงควรใช้อัตราส่วนโดยมวลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันมากกว่า 3:1 เพื่อให้สมดุลของปฏิกิริยาไปทางด้านผลิตภัณฑ์ แต่อย่างไรก็ตามการใช้อัตราส่วนโดยมวลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันมากเกินไปจะผลให้เกิดความยุ่งยากในการแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซล ทั้งนี้เนื่องจากเมทานอลมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งจะทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ให้กับไบโอดีเซลและกลีเซอรอลเกิดเป็นอิมัลชันนั่นเอง นอกจากนี้ยังเป็นการสิ้นเปลืองอีกด้วย

3.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลได้แก่ ชนิดกรดและเบส โดยชนิดเบสสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่ากรด อีกทั้งยังต้องการอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันและอุณหภูมิน้อยกว่าอีกด้วย แต่มีข้อจำกัดคือน้ำมันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคควรมีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำและปราศจากน้ำ โดยถ้าในน้ำมันมีกรดไขมันอิสระสูงควรเลือกใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากกรดสามารถผลิตไบโอดีเซลจากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและเอสเทอร์ฟิเคชันได้พร้อมๆ กัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่นิยมใช้ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ และโพแทสเซียมเมทอกไซด์ แต่ถ้าเลือกใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อละลายตัวเร่งปฏิกิริยาลงในเมทานอลจะเกิดการแตกตัวให้อัลคอกไซด์และน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งในการเกิดปฏิกิริยาสaponification และลดผลได้ของไบโอดีเซล โดยที่เมื่อโซเดียมเมทอกไซด์ หรือโพแทสเซียมเมทอกไซด์ลงในเมทานอลจะไม่ทำให้เกิดน้ำขึ้น อีกทั้งหมู่ทอกไซด์มีความเป็นเบสน้อยกว่าหมู่ไฮดรอกไซด์ ดังนั้นจึงเกิดสบู่ได้น้อยกว่าอีกด้วย (Leung and Guo, 2006)

จากการศึกษาของ Freedman *et al.* (1984) ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมเมทอกไซด์ เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที พบว่าเพื่อให้ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เท่ากัน ต้องใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์เพียง 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

การเพิ่มความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาสูงขึ้น ซึ่งเมื่อเพิ่มจนถึงถึงสมดุลของปฏิกิริยา อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้าลง โดยจากการทดลองของ Narvaez *et al.*, (2007) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 0.2 เป็น 0.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันมีผลให้อัตราการเกิดเร็วขึ้น และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 0.6 เป็น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง นอกจากนี้ถ้าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินไปนอกจากจะไม่ทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาสูงขึ้นแล้ว ยังทำให้เกิดความยุ่งยากในขั้นตอนการล้างเพื่อกำจัดโซเดียมไฮดรอกไซด์ออก อีกทั้งยังเกิดสบู่และลดผลได้ของไบโอดีเซลอีกด้วย

3.5 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลให้ปริมาณเอสเทอร์สูงขึ้น และอุณหภูมิก็ให้ผลเช่นเดียวกัน แต่การเพิ่มอุณหภูมิมีข้อเสียคือ อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยเร่งปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน ในการผลิตสบู่ (Encinar *et al.*, 2007) ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบ และชนิดของแอลกอฮอล์ (Ma and Hana, 1999) โดยปกติอุณหภูมิที่ใช้สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเมทานอล ในการผลิตไบโอดีเซล อยู่ระหว่าง 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส (Srivastava and Prasad, 2000)

4. มาตรฐานของไบโอดีเซล (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2550)

4.1 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล และการเกิดปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลที่สมบูรณ์ ซึ่งส่งผลต่อความหนืดของไบโอดีเซล

4.2 ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส เป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง ซึ่งเมื่อค่าความหนาแน่นมีค่ามาก ส่งผลให้พลังงานความร้อนมากขึ้นตามไปด้วยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณเดียวกัน

4.3 ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งเกี่ยวข้องกับการไหล และการฉีดเป็นฝอยของหัวฉีดในห้องเผาไหม้ โดยการฉีดเป็นฝอยขนาดเล็กจะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์

4.4 จุลควบไฟ เป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุด ที่ทำให้เปลวไฟผ่านเหนือไอของน้ำมัน แล้วน้ำมันติดไฟ ซึ่งจุควบไฟมีผลต่อการขนส่ง การเคลื่อนย้าย และการจัดเก็บ นอกจากนี้ปริมาณเมทานอลที่คงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล ในปริมาณมากกว่า 0.2 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้จุควบไฟมีค่าต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส

4.5 กำมะถัน เมื่อถูกเผาไหม้จะเปลี่ยนเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แล้วถูกปล่อยออกมาพร้อมไอเสียจากเครื่องยนต์ เมื่อฝนตกจะชะล้างมลพิษนี้ไปเป็นฝนกรดได้ โดยในไบโอดีเซลจะมีกำมะถันต่ำ เนื่องจากน้ำมันพืชที่ใช้ในการผลิตมักมีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำกว่า 15 ส่วนในล้านส่วน

4.6 กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) แสดงถึงปริมาณกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ สบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ตกค้างอยู่ในไบโอดีเซล นอกจากนั้นยังแสดงถึงปริมาณกากถ่านที่เหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ โดยกากถ่านมีผลต่อการอุดตันในหัวฉีดหรือลูกสูบ ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง เครื่องยนต์สกปรก และต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องบ่อยครั้ง

4.7 แก๊สซัลเฟต ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของสบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ตกค้างในไบโอดีเซล โดยมีผลต่อการอุดตันในเครื่องยนต์

4.8 น้ำ เป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ระหว่างน้ำกับเอสเทอร์ เพื่อผลิตกรดไขมันอิสระ มีผลให้เกิดการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ และเป็นตัวเร่งให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเก็บน้ำมัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หัวฉีดอุดตัน

4.9 สารปนเปื้อนในไบโอดีเซล ส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และปฏิกิริยาสaponification ซึ่งมีผลต่อความเสถียรของไบโอดีเซลระหว่างการเก็บรักษา โดยทั่วไปสิ่งปนเปื้อนจะถูกกำจัดออกในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซล

4.10 การกัดกร่อนแผ่นทองแดง แสดงการกัดกร่อนของน้ำมันต่อโลหะ ที่ใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ดีเซลเนื่องจากปริมาณกรดเช่น กรดไขมันอิสระ และสารประกอบซัลเฟอร์ในน้ำมัน ซึ่งค่าการกัดกร่อนนี้มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์

4.11 ค่าความเป็นกรดในน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งเกิดจากปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันเริ่มต้น และปริมาณกรดที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีผลต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ ทำให้อายุการใช้งานของปั๊ม และไส้กรองน้ำมันลดลง นอกจากนี้ยังแสดงถึงการเสื่อมสภาพของน้ำมันเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำที่ปนอยู่ในน้ำมัน เพื่อผลิตกรดไขมันอิสระ และผลของสถานะในการจัดเก็บ

4.12 กรดคลอโรเลนิกเมทิลเอสเทอร์ แสดงถึงพันธะคู่หรือความไม่อิ่มตัวของไบโอดีเซล ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดพอลิเมอร์ในเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการอุดตัน และการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง ปริมาณกรดคลอโรเลนิกเมทิลเอสเทอร์ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เลือกมาใช้เป็นวัตถุดิบ

4.13 เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวในไบโอดีเซล โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดเมื่อน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ โดยที่ความร้อนและแสงแดดช่วยเร่งปฏิกิริยา ทำให้คุณสมบัติของไบโอดีเซลเปลี่ยนแปลงไป และมีผลต่อการเก็บรักษา

4.14 ค่าไอโอดีน บ่งบอกถึงปริมาณพันธะคู่ในน้ำมัน ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล โดยค่าไอโอดีนต่ำ แสดงว่ามีสัดส่วนกรดไขมันอิ่มตัวในโครงสร้างไบโอดีเซลสูง ทำให้ไม่มีแนวโน้มในการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังมีความสัมพันธ์กับจุดหมอกควัน โดยไบโอดีเซลมีค่าไอโอดีนต่ำจะทำให้ค่าจุดหมอกควันสูง มีผลต่อการเก็บรักษาในสภาพอากาศเย็น

4.15 เมทานอล เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล ถ้ามีเมทานอลหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลมีผลให้จุดวาบไฟต่ำ ซึ่งมีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษา การขนส่งและการนำมาใช้ในเครื่องยนต์

4.16 ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีด กระบอกสูบ และวาล์วภายในเครื่องยนต์

4.17 ปริมาณกลีเซอรินที่หลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการแยกกลีเซอรินไม่สมบูรณ์ ทำให้มีปัญหาการแยกชั้นของกลีเซอรินในการจัดเก็บไบโอดีเซล รวมถึงการสะสมที่บริเวณด้านล่างของถังน้ำมัน ส่งผลต่อการอุดตันที่หัวฉีดและระบบลำเลียงน้ำมัน

4.18 กลีเซอรินทั้งหมด คือปริมาณของกลีเซอรินอิสระ และปริมาณกลีเซอรินในโมเลกุลโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ที่เจือปนในองค์ประกอบไบโอดีเซล ซึ่งเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันไม่สมบูรณ์ มีผลก่อให้เกิดการอุดตันที่บริเวณหัวฉีดและไส้กรอง และปัญหาการใช้งานในสภาพอากาศอากาศเย็น

4.19 โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) และโลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียม และแมกนีเซียม) เป็นการวัดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส สบู่ และโลหะหนักจากน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการ

ล้างไบโอดีเซล ที่หลงเหลืออยู่ แคลเซียมยังมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีสำหรับกระบวนการพอลิเมอไรซ์ของเอสเทอร์อีกด้วย

4.20 ฟอสฟอรัสเป็นสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันพืชเริ่มต้น หากไม่กำจัดออกจากระบบจะทำให้ไบโอดีเซลมีฟอสฟอรัสปะปนอยู่ด้วย ซึ่งจะทำความเสียหายให้กับอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการแพร่มลพิษในเครื่องยนต์ดีเซล โดยข้อกำหนดลักษณะ คุณภาพ และวิธีทดสอบของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 กำหนดลักษณะ คุณภาพและวิธีทดสอบของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

รายการ	ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ ⁿ
1	เมทิลเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า 860 900	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C	เซนติสโตกส์	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า 3.5 5.0	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
5	กำมะถัน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.0010	ASTM D 2622
6	กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.3	ASTM D 4530
7	จำนวนซีเทน		ไม่ต่ำกว่า 51	ASTM D 613
8	เถ้าซัลเฟต	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D 874

ตารางที่ 5 (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ ^ก
9	น้ำ	ร้อยละโดย น้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	ASTM D 2709
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด	ร้อยละโดย น้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	ASTM D 5452
11	การกัดกร่อนแผ่น ทองแดง		ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1
	เสถียรภาพต่อการ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 ° C	ชั่วโมง	ไม่ต่ำกว่า	6
12				
13	ค่าความเป็นกรด	mg KOH/g	ไม่สูงกว่า	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน	g Iodine/100g	ไม่สูงกว่า	120
15	กรดลิโนเลนิกเมทิล เอสเทอร์	ร้อยละโดย น้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	12.0
16	เมทานอล	ร้อยละโดย น้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20
17	โมนอกลิเซอไรด์	ร้อยละโดย น้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.80
18	ไดกลิเซอไรด์	ร้อยละโดย น้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20
19	ไตรกลิเซอไรด์	ร้อยละโดย น้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20
20	กลีเซอรินอิสระ	ร้อยละโดย น้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.02
21	กลีเซอรินทั้งหมด	ร้อยละโดย น้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.25

ตารางที่ 5 (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูงต่ำ		วิธีทดสอบ ^๑
22	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและ โพแทสเซียม)	มิลลิกรัมต่อ กิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14105 และ EN 14109
	โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและ แมกนีเซียม)	มิลลิกรัมต่อ กิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14538
23	ฟอสฟอรัส	ร้อยละโดย น้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 4951
24	สารเติมแต่ง (ถ้ามี)		ให้เป็นไปตามที่ได้รับเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน		

หมายเหตุ: ^๑ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดใน
รายละเอียดแนบท้ายประกาศนี้

ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน (2550)

ไมโครเวฟ

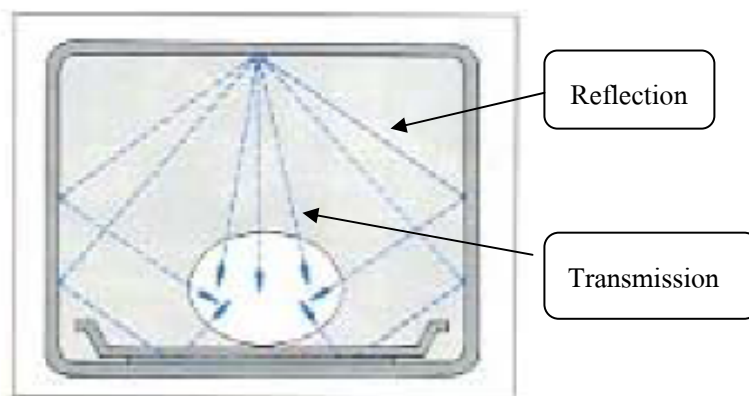
คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อใช้เป็นแหล่งให้ความร้อนในการผลิตไบโอดีเซล สามารถเร่งปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นเร็วกว่าการให้ความร้อนโดยตรง เนื่องจากไมโครเวฟทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก จึงเป็นการกระตุ้นในระดับโมเลกุลและไอออนของสารโดยตรง (Azcan and Danisman, 2008) นอกจากนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนของไมโครเวฟมีประสิทธิภาพสูงกว่าการให้ความร้อนโดยตรงอีกด้วย (Lertsathapornsuk, n.d.) ดังนั้นไมโครเวฟจึงช่วยเร่งปฏิกิริยาเคมี และลดเวลาในการทำปฏิกิริยา

1. สมบัติของคลื่นไมโครเวฟ

1.1 การสะท้อนกลับ (Reflection) เมื่อคลื่นไมโครเวฟไปกระทบกับภาชนะที่เป็นโลหะ หรือมีส่วนผสมของโลหะ คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านภาชนะดังกล่าวได้ และจะสะท้อนคลื่นไมโครเวฟกลับหมด และไม่เกิดความร้อน ดังนั้นภาชนะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจึงไม่ควรมีโลหะเป็นองค์ประกอบ และผนังของเครื่องไมโครเวฟควรมีโลหะเป็นองค์ประกอบ เพื่อสะท้อนคลื่นไมโครเวฟกลับมาสู่น้ำมันที่ใช้ทำปฏิกิริยา

1.2 การส่งผ่าน (Transmission) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านภาชนะที่ทำด้วยแก้ว กระดาษ ไม้ เซรามิกและพลาสติกได้ เพราะภาชนะดังกล่าวไม่มีส่วนผสมของโลหะ จึงเหมาะที่ใช้เป็นภาชนะในการทำปฏิกิริยา

1.3 การดูดซึม (Absorption) โมเลกุลของสารที่มีขั้วจะดูดซึมคลื่นไมโครเวฟได้ดี โดยโมเลกุลสารจะสั่นและชนโมเลกุลข้างเคียง ทำให้เกิดพลังงานจลน์ และผลิตความร้อนออกมา ซึ่งแสดงสมบัติของคลื่นไมโครเวฟดังภาพที่ 13 (ชวน, 2546)



ภาพที่ 13 สมบัติของคลื่นไมโครเวฟ

ที่มา: ชวน (2546)

2. ปัจจัยการผลิตความร้อนของไมโครเวฟ

2.1 กลไกโพราไรเซชันของโมเลกุลขั้วคู่ (Dipolar polarization mechanism) โมเลกุลสารที่มีขั้ว โดยปกติการจัดเรียงขั้วของโมเลกุลจะเป็นไปในลักษณะแบบสุ่ม แต่เมื่อโมเลกุลได้รับคลื่นไมโครเวฟ ไอออนของโมเลกุลจะพยายามจัดเรียงตัวให้อยู่ในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า โดยการหมุนและสั่น ซึ่งการเคลื่อนที่ของไอออนเช่นนี้ ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างไอออน อีกทั้งยังเกิดการชนกันระหว่างไอออนข้างเคียง และผลิตความร้อนออกมา ซึ่งโมเลกุลที่มีขั้วสูงจะเกิดกระบวนการโพราไรเซชันของโมเลกุลขั้วคู่ได้ดี โดยแสดงการจัดเรียงตัวของไอออนดังภาพที่ 14 (Lidstrom *et al.*, 2001; Saifuddin and Chua, 2004)



ภาพที่ 14 การจัดเรียงตัวของไอออนทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า

ที่มา: Lidstrom *et al.*, 2001

2.2 กลไกการนำความร้อน (Conduction mechanism) เมื่อสารได้รับคลื่นไมโครเวฟ และผลิตความร้อนจากกลไกโพราไรเซชันของโมเลกุลขั้วคู่ โดยการสั่นของไอออน และเกิดการชนกันระหว่างไอออนข้างเคียงต่อเนื่องกัน จนเกิดเป็นพลังงานจลน์ ซึ่งกลไกการนำความร้อนมีอิทธิพลมากกว่ากลไกโพราไรเซชันของโมเลกุลขั้วคู่ (Lidstrom *et al.*, 2001)

2.3 ค่าสูญเสียไดอิเล็กตริก (Loss angle) แสดงถึงความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟเพื่อเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน ดังนั้นสารที่มีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกสูง เมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเร็วกว่าสารที่มีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Vicente *et al.* (2004) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่มีค่าความเป็นกรดเริ่มต้น (Acid value) 0.45 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเมทานอล ด้วยการให้ความร้อนโดยตรง ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส 4 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียมเมทอกไซด์ (CH_3ONa) โพแทสเซียมเมทอกไซด์ (CH_3OK) ที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ผลได้ของไบโอดีเซล และคุณภาพของไบโอดีเซลเมื่อเทียบกับมาตรฐาน EN 14214, DIN 51606 และ NBB/ASTM โดยศึกษาที่สภาวะเดียวกันครั้งนี้ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 อัตราการกวนผสม 600 รอบต่อนาที ภายใต้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไบโอดีเซลที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 4 ชนิดที่ให้ค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์ใกล้เคียง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมเมทอกไซด์ ซึ่งมีค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็น 99.76 99.72 99.71 และ 99.52 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งมีค่าผลได้ของไบโอดีเซลเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ โซเดียมเมทอกไซด์ โพแทสเซียมเมทอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีค่าผลได้ของไบโอดีเซลเป็น 99.33 98.46 91.67 และ 86.71 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่มีหมู่ไฮดรอกไซด์ให้ผลได้ของไบโอดีเซลต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่มีหมู่เมทอกไซด์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่มีหมู่ไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยาสaponification กับไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นสบู่ นอกจากนี้สบู่ที่เกิดขึ้นยังช่วยเพิ่มการละลายของเมทิลเอสเทอร์ลงสู่ชั้นของกลีเซอรอลอีกด้วย อีกทั้งศึกษาคุณภาพของไบโอดีเซล พบว่าปริมาณ โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ พันธะกลีเซอรอล กลีเซอรอลอิสระ กลีเซอรอลทั้งหมด และค่าความเป็นกรดตรงตามมาตรฐานทั้ง 3 ชนิด ยกเว้นค่าไอโอดีนที่สูงกว่ามาตรฐาน

Azcan and Danisman (2008) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ โดยอาศัยการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเมทานอล ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส 2 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นจึงเลือกปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา แล้วนำไบโอดีเซลที่ได้

ไปวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี อีกทั้งทดสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้เทียบกับมาตรฐาน EN 14214 นอกจากนั้นยังเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และผลได้ของไบโอดีเซลระหว่างการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟกับการให้ความร้อนโดยตรง จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3 นาที ภายใต้อุณหภูมิ 313 เคลวิน โดยในสภาวะดังกล่าวสามารถให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 97.8 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าผลได้ของไบโอดีเซล 92.7 เปอร์เซ็นต์ และกรณีที่ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีสภาวะที่เหมาะสมดังนี้ ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 5 นาที ภายใต้อุณหภูมิ 323 เคลวิน ซึ่งในสภาวะดังกล่าวสามารถให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 97.8 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าผลได้ของไบโอดีเซล 93.7 เปอร์เซ็นต์ โดยเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาดังกล่าวการให้ความร้อนจากไมโครเวฟน้อยกว่า และให้ผลได้ของไบโอดีเซลสูงกว่าการให้ความร้อนโดยตรง จากนั้นทดสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซล พบว่าค่าความหนืด ความหนาแน่น จุดวาบไฟ และปริมาณเอสเทอร์ ตรงตามมาตรฐาน EN 14214 ยกเว้นค่าความร้อน (Heating value) ที่สูงกว่ามาตรฐาน

Encinar *et al.* (2007) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ซึ่งเกิดจากการผสมของน้ำมันมะกอกและน้ำมันทานตะวัน ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเอทานอล โดยอาศัยการให้ความร้อนโดยตรง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งได้เลือกศึกษาปัจจัยต่อไปนี้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลต่อน้ำมัน อุณหภูมิ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ และโพแทสเซียมเมทอกไซด์ ภายใต้อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา 120 นาที จากนั้นนำไบโอดีเซลที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลต่อน้ำมันเป็น 12:1 อุณหภูมิ 78 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 74.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งยังไม่ผ่านมาตรฐานของ EN 14214 ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำไบโอดีเซลที่ได้มาผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเอทานอลอีกครั้ง โดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งปัจจัยที่เลือกศึกษาคือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลต่อน้ำมัน และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลต่อน้ำมันเป็น 5:1 และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน จะได้ปริมาณเมทิล

เอสเทอร์ 94.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนนี้ สามารถเพิ่มปริมาณเอสทิล เอสเทอร์ขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์

Leung and Guo (2006) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันคาร์โนลาและน้ำมันพีชที่ใช้แล้ว ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเมทานอล โดยให้ความร้อนโดยตรง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งได้ศึกษาปัจจัยดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมเมทอกไซด์ หลังจากนั้นนำไบโอดีเซลที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี และวิเคราะห์หาปริมาณไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ที่หลงเหลืออยู่ด้วยวิธี Thin layer chromatography จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันคาร์โนลา ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 15 นาที ภายใต้อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็น 98.0 เปอร์เซ็นต์ และผลได้ของไบโอดีเซลเป็น 93.5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพีชใช้แล้ว ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7:1 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 15 นาที ภายใต้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็น 94.6 เปอร์เซ็นต์ และผลได้ของไบโอดีเซลเป็น 88.8 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้พบว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน และความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา มีอิทธิพลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์มากกว่าอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

USDA Nation Biodiesel Education Program (2006) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซล ด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเมทานอล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งปัจจัยที่เลือกทำการศึกษาคือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ โพแทสเซียมเมทอกไซด์ ที่มีต่อผลได้ของไบโอดีเซลและปริมาณสบู่ที่เกิดขึ้น จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติ ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5:1 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเมทอกไซด์ 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยโมลน้ำมัน ซึ่งให้ค่าผลได้ของไบโอดีเซลเป็น 95.8 เปอร์เซ็นต์ และเกิดสบู่

0.75 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีหมู่โพแทสเซียมให้ค่าผลได้ของไบโอดีเซลสูงกว่าหมู่โซเดียม และหมู่เมทอกไซด์ให้ค่าผลได้ของไบโอดีเซลสูงกว่าหมู่ไฮดรอกไซด์ อีกทั้งหมู่โพแทสเซียมยังเกิดปริมาณสบู่มากกว่าหมู่โซเดียม และหมู่ไฮดรอกไซด์เกิดปริมาณสบู่มากกว่าหมู่เมทอกไซด์อีกด้วย

Sukhawanit *et al.* (2004) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเมทานอลและอาศัยการให้ความร้อนโดยตรง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งปัจจัยที่เลือกทำการศึกษา ได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิ และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ด้วยวิธี Thin layer chromatography และหาผลได้ของไบโอดีเซลจากผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลคือ เลือกใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 10:1 โดยให้ผลได้ของไบโอดีเซลสูงสุดเป็น 92.07 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังทดสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซลได้แก่ ความหนาแน่น ความหนืด จุดไหลเท จุดหมอกควัน และจุดวาบไฟ ซึ่งไบโอดีเซลที่ได้ผ่านตามมาตรฐานของไบโอดีเซล

Jitiputti *et al.* (2006) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันมะพร้าว ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเมทานอล โดยเปรียบเทียบกิจกรรมของตัวเร่งปฏิกิริยาวิธีพ่นชั้นชนิดกรดและเบส จำนวน 6 ชนิด ได้แก่ ZrO_2 , ZnO , $\text{SO}_4^{2-}/\text{SnO}_2$, $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$, $\text{KNO}_3/\text{KL zeolite}$ และ $\text{KNO}_3/\text{ZrO}_2$ โดยการวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ใช้วิธี High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ซึ่งสามารถเรียงลำดับค่าผลได้ของเมทิลเอสเทอร์จากมากไปน้อยได้ดังนี้ กรณีของน้ำมันปาล์มคือ $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2 > \text{SO}_4^{2-}/\text{SnO}_2 > \text{ZnO} > \text{KNO}_3/\text{ZrO}_2 > \text{KNO}_3/\text{KL zeolite} > \text{ZrO}_2$ และกรณีของน้ำมันมะพร้าวคือ $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2 > \text{SO}_4^{2-}/\text{SnO}_2 > \text{ZnO} > \text{KNO}_3/\text{KL zeolite} > \text{KNO}_3/\text{ZrO}_2 > \text{ZrO}_2$ พบว่าทั้งสองกรณี $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ ให้ค่าผลได้ของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด โดยมีค่าผลได้ของน้ำมันปาล์มและน้ำมันมะพร้าวเป็น 90.3 และ 86.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อีกทั้งยังศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิธีพ่นชั้นชนิดกรด พบว่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมงและความเข้มข้นของ SO_4^{2-}

ZrO_2 เป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน นอกจากนั้นกิจกรรมของ $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ เมื่อถูกนำกลับมาใช้ใหม่โดยเปรียบเทียบกับค่าผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ พบว่าลดลง ซึ่งไม่เหมาะสมถ้า $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ มาใช้ซ้ำ แต่การปรับปรุง $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ ทำได้ง่ายและกิจกรรมของ $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ ที่ปรับปรุงแล้วก็มีผลเหมือนกับ $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ ใหม่

Rashid and Anwar (2008) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเมทานอล ซึ่งใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการให้ความร้อนโดยตรง โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาคือ หาสภาวะที่เหมาะสมต่อผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งมีปัจจัยที่ทำการศึกษได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ และโพแทสเซียมเมทอกไซด์ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และอัตราการกวนผสม จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์โดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง และอัตราการกวนผสม 600 รอบต่อนาที โดยที่สภาวะนี้ให้ผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ 95-96 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นคุณสมบัติของไบโอดีเซล ได้แก่ ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ ความหนืด ค่าความเป็นกรด จุดวาบไฟ จุดไหลเท จุดหมอกควัน เป็นต้น ตรงตามมาตรฐานของอเมริกาและยุโรป

Lertsathapornsuk *et al.* (2005) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันพืช 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันรำข้าว และน้ำมันพืชใช้แล้ว ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเอทานอล โดยอาศัยไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์เป็นแหล่งให้ความร้อน และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์โดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี โดยมีวัตถุประสงค์คือศึกษาการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟประจำบ้าน เพื่อผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง โดยเลือกศึกษาที่สภาวะดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลเอทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน พบว่าน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันรำข้าว ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 วินาที และให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับ 100 และ 93.1 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนกรณีของน้ำมันพืชใช้แล้ว ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 วินาที และให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับ 90.6 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้เมื่อผสมเคโรซีน (Kerosene) ในน้ำมันพืชใช้แล้ว ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างเคโรซีนต่อน้ำมันเป็น 1:1 พบว่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับ

91.6 เปอร์เซ็นต์ ภายใน 30 วินาที จากผลการศึกษาจึงสรุปได้ว่า สามารถประยุกต์ใช้ไมโครเวฟประจำบ้านในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องได้ และไมโครเวฟยังช่วยลดเวลาในการทำปฏิกิริยาอีกด้วย

Lertsathapornasuk *et al.* (n.d.) การศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเอทานอล โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอาศัยไมโครเวฟกำลัง 1100 วัตต์ เป็นการให้ความร้อน และวิเคราะห์หาปริมาณเอทิลเอสเทอร์โดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) ในน้ำมันพืชใช้แล้วกับน้ำมันพืชใหม่ มีปริมาณแตกต่างกันเล็กน้อย โดยใน น้ำมันพืชใช้ประกอบด้วยกรดไขมันอิสระชนิดไม่อิ่มตัวเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมี 56.74 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่าน้ำหนักโมเลกุล 851.59 กรัมต่อโมล และค่าไอโอดีนเป็น 55.19 กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัม อีกทั้งยังศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีปัจจัยที่ทำการศึกษาค้นคว้าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลต่อน้ำมัน และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยให้ผลการทดลองเป็นดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วินาที โดยให้ปริมาณเอทิลเอสเทอร์ 100 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งเมื่อทดสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้เหมาะสมตามมาตรฐาน ASTM PS121 และ High speed diesel อีกด้วย

ทรงพล และ พิภพ (2549) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเมทานอล โดยใช้ไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์เป็นแหล่งให้ความร้อน ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณเอทิลเอสเทอร์โดยวิธี Thin layer chromatography โดยวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลทั้งแบบกะ และแบบต่อเนื่อง ซึ่งมีปัจจัยที่ทำการศึกษาค้นคว้าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเปอร์เซ็นต์การใช้อัตราให้ความร้อนของไมโครเวฟ พบว่าให้ผลการศึกษาค้นคว้ากรณีการผลิตไบโอดีเซลแบบกะใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน และการใช้อัตราให้ความร้อนของไมโครเวฟ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ปริมาณเอทิลเอสเทอร์ 99.12 เปอร์เซ็นต์ และผลได้ของไบโอดีเซล 96.77 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในกรณีการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์

โดยน้ำหนักน้ำมัน และการใช้อัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟ 70 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 96.72 เปอร์เซ็นต์ และผลได้ของไบโอดีเซล 96.09 เปอร์เซ็นต์

Azcan and Danislan (2007) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดฝ้าย ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเมทานอล โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน และใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล โดยวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของไบโอดีเซล และเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล (Biodiesel purity) โดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี ซึ่งใช้อัตราส่วนโดย โมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลคือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 7 นาที อุณหภูมิ 333 เคลวิน ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน โดยมีค่าผลได้ของไบโอดีเซลเป็น 92.4 เปอร์เซ็นต์ และค่าความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลเป็น 99.8 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา และคุณสมบัติของไบโอดีเซล ได้แก่ ความหนาแน่น ความหนืด จุลวาวไฟ และปริมาณเอสเทอร์ ระหว่างการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไมโครเวฟเป็นตัวให้ความร้อน กับการให้ความร้อนโดยตรง พบว่าการให้ความร้อนโดยตรง ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานกว่า โดยใช้เวลา 30 นาที โดยมีค่าผลได้ของไบโอดีเซลเป็น 91.4 เปอร์เซ็นต์ และค่าความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลเป็น 99.9 เปอร์เซ็นต์ โดยคุณสมบัติของไบโอดีเซลจากกระบวนการผลิตทั้งสองวิธีใกล้เคียงกัน

Hernando *et al* (2007) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ และน้ำมันถั่วเหลือง ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเมทานอล โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้เมทิลทีบิวทิลอีเทอร์ (MTBE) เป็นสารละลายร่วม (Co solvent) อีกทั้งยังศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบกะ และแบบต่อเนื่อง โดยวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของไบโอดีเซลโดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี พบว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบกะที่สภาวะดังนี้ น้ำมัน 2.3 กรัม โซเดียมไฮดรอกไซด์ 30 มิลลิกรัม เมทานอล 1.27 มิลลิลิตร MTBE 2.1 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 นาที ให้ค่าผลได้ของไบโอดีเซล 95 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อศึกษาผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง โดยใช้ปริมาณน้ำมัน โซเดียมไฮดรอกไซด์ เมทานอล และ MTBE มากกว่าการผลิตไบโอดีเซลแบบกะ 8 เท่า ที่อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเดียวกัน ซึ่งมีการไหลวนน้ำมัน 3 และ 17 รอบ พบว่าให้ค่าผลได้ของไบโอดีเซล 96 และ 97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจนเข้าสู่สมดุล และผลได้ของไบโอดีเซลระหว่างการผลิตไบโอดีเซลแบบกะ โดย

ใช้ไมโครเวฟเป็นตัวให้ความร้อนกับการให้ความร้อนโดยตรง พบว่าการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ความร้อนโดยตรงใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานกว่า โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และให้ผลได้ของไบโอดีเซล 87 เปอร์เซ็นต์

Saifuddin and Chua (2004) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันทอดอาหาร ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเอทานอลโดยใช้ไมโครเวฟ เป็นแหล่งให้ความร้อน และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การแปลงผัน (Conversion) โดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที และใช้อัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟ 50 เปอร์เซ็นต์จากอัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟทั้งหมด 750 วัตต์ ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์การแปลงผันเป็น 87 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของการผลิตไบโอดีเซลระหว่างการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟกับการให้ความร้อนโดยตรง พบว่าการให้ความร้อนโดยตรง ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานกว่า โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 75 นาที และให้เปอร์เซ็นต์การแปลงผันน้อยกว่าการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ

Nicholas and Stencel (2006) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากไตรโอเลอิน (Triolein) ผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันด้วยเมทานอลโดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน และใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการผลิตไบโอดีเซลได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรโอเลอิน ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การแปลงผันโดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี นอกจากนี้ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสจากอัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟ 600 วัตต์ ปริมาณไตรโอเลอิน 1 มิลลิลิตร พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรโอเลอินเป็น 2:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 1 นาที โดยให้เปอร์เซ็นต์การแปลงผัน 98 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งเมื่อเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเพิ่มสเกลการผลิตไบโอดีเซล 10 เท่า พบว่าทั้งสองกรณีไม่มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์การแปลงผัน นอกจากนี้ได้ใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้มาศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้ปริมาณน้ำมันถั่วเหลือง 2.3 ลิตร

อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 พบว่าใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักน้ำมัน และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทนได้ โดยทั้งสองกรณีไม่มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์การแปลงผัน

Toukoniitty *et al.* (2005) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากกรดโพรพิโอนิก (Propionic acid) ผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันด้วยเอทานอล ซึ่งใช้ Amberlyst 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวិวิพันธ์ โดยใช้ไมโครเวฟอัตราการใช้ความร้อน 850-900 วัตต์ และการให้ความร้อนโดยตรง อีกทั้งยังศึกษาหาอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลต่อกรดโพรพิโอนิกที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ความดัน 7 บาร์ และวิเคราะห์ผลได้ของไบโอดีเซลโดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี พบว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลต่อกรดโพรพิโอนิกที่เหมาะสมเป็น 1:1 ทั้งสองกรณี นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าคงที่สมดุล ($K_{equilibrium}$) ของการผลิตไบโอดีเซลระหว่างการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟกับการให้ความร้อนโดยตรง พบว่าค่าคงที่สมดุลของทั้งสองกรณีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

Mazzocchia *et al.* (2004) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเมทานอล โดยใช้ไมโครเวฟที่อัตราการใช้ความร้อน 1000 วัตต์ ซึ่งเปรียบเทียบกิจกรรมของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์จำนวน 7 ชนิดได้แก่ Montmorillonite KSF, Montmorillonite K 10, Zeolite 3 A, K_2FeO_4/Fe_2O_3 , ZnO/Al_2O_3 , SnO และ Na_2CO_3 ที่สภาวะดังนี้ อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 10 และ 60 นาที และวิเคราะห์ผลได้ของไบโอดีเซลโดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ค่าผลได้ของไบโอดีเซลสูงสุด 3 อันดับแรกเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ Montmorillonite KSF > Montmorillonite K 10 > Zeolite 3 A อีกทั้งเมื่อศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิดนี้ที่สภาวะเดิมโดยเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 9 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบกิจกรรมของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด พบว่าให้ผลเป็นเช่นเดิม นอกจากนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ Montmorillonite KSF เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา และเปรียบเทียบผลได้ของไบโอดีเซลระหว่างการให้ความร้อนจากไมโครเวฟกับการให้ความร้อนโดยตรง พบว่าการให้ความร้อนจากไมโครเวฟให้ค่าผลได้ของไบโอดีเซลสูงกว่าการให้ความร้อนโดยตรง

Chemat *et al.* (1997) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากกรดสเตียริก (Stearic acid) ผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยบิวทานอล ซึ่งมี Toluene -*p*- sulfonic acid (TPSA) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน กับการให้ความร้อนโดยตรง โดยวิเคราะห์จากค่า E_a พบว่าทั้งสองกรณีให้ค่า E_a ไม่แตกต่างกัน อีกทั้งได้ศึกษาอิทธิพลของไอโซเมอร์ของบิวทานอล 3 ชนิดคือ *n*-butanol, *sec*-butanol และ *tert*-butanol ซึ่งใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน และการให้ความร้อนโดยตรง และวิเคราะห์ผลได้ของไบโอดีเซล ซึ่งสามารถเรียงลำดับผลได้ของไบโอดีเซลจากมากไปน้อยได้ดังนี้ n -butanol > *sec*-butanol > *tert*-butanol โดยการให้ความร้อนทั้งสองวิธีให้ค่าผลได้ของไบโอดีเซลไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน 5 ชนิดได้แก่ TPSA, $Fe_2(SO_4)_3$, $TiBu_4$, KF และ Montmorillonite KSF ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ โดยเปรียบเทียบอัตราส่วนผลได้ไบโอดีเซลจากการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟต่อการให้ความร้อนโดยตรง ซึ่งสามารถเรียงลำดับอัตราส่วนผลได้ไบโอดีเซลจากการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟต่อการให้ความร้อนโดยตรงจากมากไปน้อยดังนี้ $Fe_2(SO_4)_3 > TiBu_4 > KF > Montmorillonite KSF > TPSA$ และเรียงลำดับผลได้ไบโอดีเซลโดยใช้ไมโครเวฟเป็นตัวให้ความร้อนจากมากไปน้อยดังนี้ Montmorillonite KSF > TPSA > KF > $TiBu_4 > Fe_2(SO_4)_3$ อีกทั้งเรียงลำดับผลได้ไบโอดีเซลโดยการให้ความร้อนโดยตรงจากมากไปน้อยดังนี้ ดังนี้ TPSA > Montmorillonite KSF > KF > $TiBu_4 > Fe_2(SO_4)_3$ นอกจากนี้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ Montmorillonite KSF เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเปรียบเทียบระหว่างการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับคลื่นอัลตราซาวด์ (MW-US) การให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟอย่างเดียว (MW) และการให้ความร้อนโดยตรง (CH) โดยวิเคราะห์จากผลได้ไบโอดีเซล ซึ่งสามารถเรียงลำดับผลได้ไบโอดีเซลจากมากไปน้อยดังนี้ MW-US > MW > CH

Ghadge and Raheman (2005) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะฮัว (Mahua oil, *Madhuca indica*) ซึ่งเป็นพืชน้ำมันที่พบมากในประเทศอินเดีย แต่มีข้อเสียคือมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงถึง 17 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงใช้การผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน เพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระให้น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาดังนี้ อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยา ภายใต้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สำหรับขั้นตอนแรกเป็นการผลิตไบโอดีเซลผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเมทานอล ซึ่งใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองได้สภาวะที่เหมาะสมดังนี้ อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง

เมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 0.32 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 1.24 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรน้ำมัน และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1.26 ชั่วโมง สำหรับในขั้นตอนที่ 2 เป็นการผลิตไบโอดีเซลผ่าน กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเมทานอล ซึ่งใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยา โดยเลือกทำปฏิกิริยาที่สภาวะดังนี้ อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน เท่ากับ 0.25 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตรน้ำมัน และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1.5 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ผลได้ของไบโอดีเซล 98 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นนำไปโอดีเซลที่ได้ทดสอบคุณสมบัติดังนี้ ความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ จุดไหลเท ปริมาณน้ำ ปริมาณเถ้า Carbon residue ค่าความเป็นกรด Calorific value พบว่าผ่านตามมาตรฐาน ASTM D 6751-02 และ DIN EN 14214

Domingos *et al.* (2008) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจาก *Raphanus sativus* crude oil ซึ่งเป็น พืชน้ำมันชนิดหนึ่งในประเทศบราซิล ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเอทานอล ซึ่ง ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และวิเคราะห์หาปริมาณเอทิลเอสเทอร์ด้วยวิธี HPLC โดยมีวัตถุประสงค์ในการทำการศึกษาคือ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน และมีปัจจัยในการศึกษาคือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลต่อน้ำมัน ความเข้มข้น ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่าในขั้นตอน แรก ได้สภาวะที่เหมาะสมดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 11.7:1 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ภายใต้อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ใส่กรวยแยก แล้วนำ ส่วนบนมาทำปฏิกิริยาในขั้นที่ 2 ซึ่งได้สภาวะที่เหมาะสมดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอล ต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.03 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน และ ภายใต้อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ได้เติม BHT 500 พีพีเอ็ม ซึ่งเป็น Anti-oxidant ชนิด หนึ่ง แล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซล พบว่าผ่านตามมาตรฐาน ANP และ ASTM

Singh *et al.* (2006) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันคาร์โนล่า ผ่านกระบวนการ ทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเมทานอล โดยการให้ความร้อนโดยตรง และวิเคราะห์หาปริมาณเมทิล เอสเทอร์ด้วยวิธี HPLC ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาคือ การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบ โอดีเซล และมีปัจจัยที่ศึกษาคือ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ โพแทสเซียมเมทอกไซด์ ความเข้มข้นของตัวเร่ง ปฏิกิริยา อุณหภูมิ และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน จากผลการทดลองพบว่า

สามารถเรียงลำดับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ผลได้ของไบโอดีเซลจากมากไปน้อยคือ โพลีเอสเตอร์เมทอกไซด์ > โซเดียมเมทอกไซด์ > โพลีเอสเตอร์ไฮดรอกไซด์ > โซเดียมไฮดรอกไซด์ และสามารถเรียงลำดับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเกิดสบู่จากมากไปน้อยคือ โพลีเอสเตอร์ไฮดรอกไซด์ > โพลีเอสเตอร์เมทอกไซด์ > โซเดียมไฮดรอกไซด์ > โซเดียมเมทอกไซด์ ซึ่งจากการที่โพลีเอสเตอร์เมทอกไซด์ให้ผลได้ของไบโอดีเซลสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกใช้โพลีเอสเตอร์เมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยให้สภาวะที่เหมาะสมดังนี้ ใช้โพลีเอสเตอร์เมทอกไซด์ความเข้มข้น 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยโมลน้ำมัน อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5:1 ซึ่งที่สภาวะนี้ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็น 96.22 เปอร์เซ็นต์ ผลได้ของไบโอดีเซลเป็น 95.80 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณสบู่ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน

ทัศนีย์ (2550) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเมทานอล ซึ่งใช้โพลีเอสเตอร์ไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการให้ความร้อนโดยตรง และวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยวิธี GC งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล และมีปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิ จากผลการทดลองได้สภาวะที่เหมาะสมดังนี้ ใช้ความเข้มข้นของโพลีเอสเตอร์ไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6.9:1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ภายใต้อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็น 97.9 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งได้ทดสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซลได้แก่ความหนืด จุลควบไฟ และค่าความเป็นกรดซึ่งผ่านตามมาตรฐาน EN 14214

แดง และ รจเรข (2549) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันสบู่ดำ ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเมทานอล ซึ่งใช้โพลีเอสเตอร์ไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งใช้ไมโครเวฟและใช้การให้ความร้อนโดยตรงเป็นแหล่งให้ความร้อน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล และมีปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราการให้ความร้อน และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา โดยวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์โดย GC จากผลการทดลองพบว่า เมื่อผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม มีสภาวะที่เหมาะสมดังนี้ ใช้ความเข้มข้นของโพลีเอสเตอร์ไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ซึ่งเมื่อใช้การให้ความร้อนจากไมโครเวฟ

ต้องใช้อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ และเมื่อให้ความร้อนโดยตรงต้องใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อีกทั้งให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็น 97.59 และ 98.58 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสน มีสถานะที่เหมาะสมดังนี้ ใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 ซึ่งเมื่อใช้การให้ความร้อนจากไมโครเวฟ ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ที่อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ และเมื่อให้ความร้อนโดยตรงต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อีกทั้งให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็น 97.41 และ 99.31 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน

- 1.1 ไมโครเวฟ: MS 2022C, บริษัท LG ประเทศไทย จำกัด
- 1.2 เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง: METTLER PM 6100, Mettler-Toledo
- 1.3 เครื่องหล่อเย็น: Boss Tech, Scientific Instruments
- 1.4 เครื่องแกว่งฟลักซ์คอนเดนเซอร์
- 1.5 นาฬิกาจับเวลา
- 1.6 กรวยแยก ขนาด 500 มิลลิลิตร: Witeg, Pereco
- 1.7 กระดาษกรองเบอร์ 4: Whatman
- 1.8 กระดาษลิทมัสช่วงพีเอช 5.5-9.0: Merck
- 1.9 ขวดเก็บตัวอย่างสีชา ขนาด 60 มิลลิลิตร

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์โดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี

- 2.1 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี: model GC – 2010, Shimadzu Japan
แก๊สดำนำ: He
คอลัมน์: DB – Wax ขนาด 30 เมตร x 0.32 มิลลิเมตร
ดีเทคเตอร์: FID อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส
อินเจคเตอร์: DB – Wax อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส, split ratio 25
- 2.2 เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง: BL210S, Sartorius, Goettingen
- 2.3 เครื่องผสม (Vortex Mixer): KMC-1300V, VISION, Korea
- 2.4 ขวด Vial ขนาด 10 มิลลิลิตร

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำโดยวิธี Karl Fischer Coulometer

3.1 Karl Fischer Coulometer: Metrohm

คีย์บอร์ด: 756KS Coulometer keyboard

จอแสดงผล: 756KS Coulometer

เครื่องกวนผสม: Stirrer

4. สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน

4.1 น้ำมันสบู่ดำ หีบโดยเครื่องหีบแบบสกรูเพรส มีค่าความเป็นกรดเริ่มต้นเท่ากับ 2.36 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม (วิธีการคำนวณดูได้จากภาคผนวก ง)

4.3 เมทานอล: ความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์, A.R. Grade, Carlo Erba Regent

4.3 โซเดียมเมทอกไซด์: ความบริสุทธิ์ ≥ 97.00 เปอร์เซ็นต์, A.R. Grade, Fluka

4.4 โซเดียมคลอไรด์: A.R. Grade, Carlo Erba Regent

4.5 โซเดียมซัลเฟต: Anhydrous, A.R. Grade, Ajax Chemical

4.6 น้ำกลั่นพิเศษ 5.5

5. สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์โดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี

5.1 n-Heptane: ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์, Analysis Grad, Fluka

5.2 Methyl heptadecanoate, C17:0: ความบริสุทธิ์ 95 เปอร์เซ็นต์

6. สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid Value)

6.1 2-โพรพานอล: ความเข้มข้น 99.99 เปอร์เซ็นต์, A.R. Grade, J.B. Baker, U.S.A.

6.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH): Analysis grade, Merck, Germany

6.3 น้ำกลั่น

6.4 สารละลายฟีนอล์ฟทาเลิน

วิธีการ

1. การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ในการดูดซับน้ำในน้ำมันสบู่ดำ ที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์และผลได้ของไบโอดีเซล โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อนในการผลิตไบโอดีเซล

ชั่งน้ำมันสบู่ดำ 70 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมโซเดียมคลอไรด์ตามปริมาณที่ได้กำหนดไว้ในแต่ละการทดลอง แล้วทำการกวนผสมโดยมีอัตราการกวน 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาให้น้ำมันที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปผลิตไบโอดีเซลต่อไป กำหนดให้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ศึกษาเป็น 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน

นำน้ำมันสบู่ดำที่ได้จากการกรองมาผลิตไบโอดีเซล โดยสภาวะที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 7.5:1 (Leung and Guo, 2006) เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที และอัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟ 90 วัตต์ (แดง และ รจเรข, 2549) แล้วนำไบโอดีเซลที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด ผลได้ของไบโอดีเซล (วิธีการคำนวณดูได้จากภาคผนวก ข) และปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (วิธีการคำนวณดูได้จากภาคผนวก ค) โดยทำการทดลองซ้ำ 3 การทดลอง

2. การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน ได้แก่ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และอัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟเป็นต้น (Ma and Hana, 1999; แแดง และ รจเรข, 2549) ดังนั้นจึงศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังกล่าว

ชั่งน้ำมันสบู่ดำที่ผ่านการกรองจากขั้นตอนที่ 1 ปริมาณ 50 กรัม ใส่ขวดก้นกลม และเตรียมเมทานอล (วิธีการคำนวณดูได้จากภาคผนวก ก) ขณะเดียวกันชั่งโซเดียมเมทอกไซด์ แล้วนำไปละลายจนเป็นเนื้อเดียวกันในเมทานอลที่เตรียมไว้ จากนั้นนำสารละลายที่ได้เทลงในน้ำมันสบู่ดำที่ผ่านการกรองจากขั้นตอนที่ 1 ซึ่งบรรจุอยู่ในขวดก้นกลม เขย่าให้เข้ากัน และนำไปทำปฏิกิริยาโดย

อาศัยการให้ความร้อนจากไมโครเวฟ ตามสภาวะที่กำหนดไว้ในแต่ละการทดลองดังภาพที่ 15 เมื่อครบกำหนดเวลานำผลิตภัณฑ์ที่ได้เทใส่กรวยแยก และทิ้งไว้ข้ามคืนจะแยกผลิตภัณฑ์ได้ 2 ชั้น ชั้นบนคือไบโอดีเซล ส่วนชั้นล่างคือกลีเซอรอล ให้ไขกลีเซอรอลออกจากนั้นนำไบโอดีเซลไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีพีเอชของน้ำล้างเท่ากับพีเอชของน้ำกลั่น และนำไบโอดีเซลที่ได้ไปดูดซับน้ำออกด้วยโซเดียมซัลเฟต และทำการกรองโซเดียมซัลเฟตออกด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด ผลได้ของไบโอดีเซล และปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยทำการทดลองซ้ำ 3 การทดลอง



ภาพที่ 15 ชุดอุปกรณ์การผลิตไบโอดีเซล

2.1 การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมเมทอกไซด์ที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์

ศึกษาความเข้มข้นโซเดียมเมทอกไซด์เป็น 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันตามลำดับ โดยกำหนดให้สภาวะการทดลองคือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที และอัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟ 90 วัตต์

2.2 การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์

ศึกษาอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 7.5:1 และ 9:1 ตามลำดับ โดยกำหนดให้สภาวะการทดลองคือ ความเข้มข้นโซเดียมเมทอกไซด์ที่เหมาะสมจากการทดลองในหัวข้อที่ 2.1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที และอัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟ 90 วัตต์

2.3 การศึกษาผลกระทบของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์

ศึกษาผลกระทบของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยศึกษาเป็น 1 2 3 4 และ 5 นาที ตามลำดับ โดยกำหนดให้สภาวะการทดลองคือ สภาวะการทดลองที่เหมาะสมในหัวข้อที่ 2.1 และ 2.2 และอัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟ 90 วัตต์

2.4 การศึกษาผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์

ศึกษาอัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟเป็น 90 320 และ 360 วัตต์ตามลำดับ โดยกำหนดให้สภาวะการทดลองคือ สภาวะการทดลองที่เหมาะสมในหัวข้อที่ 2.1 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

3. การศึกษาคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน

นำไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากสภาวะที่ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุด มาทำการวิเคราะห์หาความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D 445 จดวามไฟ ตามมาตรฐาน ASTM D 93 จุดหมอกควัน ตามมาตรฐาน ASTM D 2500 จุดไหลเท ตามมาตรฐาน ASTM D97 และค่าความเป็นกรด ตามมาตรฐาน ASTM D 974 ตามลำดับ

4. การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์โดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี

การวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ได้วิเคราะห์ตามมาตรฐานของ EN 14103: 2003 โดยมีขั้นตอนดังนี้ ชั่งตัวอย่าง (ไบโอดีเซล) 250 มิลลิกรัม ใส่ลงในขวด vial ขนาด 10 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมสารละลายเมทิลเฮปตะดิกานอเอทความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ลงไปในปริมาณ 5 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี วิธีการคำนวณดูได้จากภาคผนวก ก

5. การวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด (Acid Value)

- 5.1 ชั่งน้ำหนักน้ำมันตัวอย่างตั่งต้นหรือไบโอดีเซล 1 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่
- 5.2 เติมด้วยสาร 2-โพรพานอล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
- 5.3 หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยด
- 5.4 นำมาทำการไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์
- 5.5 ไทเทรตจนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูจางๆ คงที่ ประมาณ 30 วินาที ณ จุดนี้ถือเป็น

จุดยุติ

- 5.6 บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเป็นกรด (Acid value) วิธีการคำนวณดูได้จากภาคผนวก ง

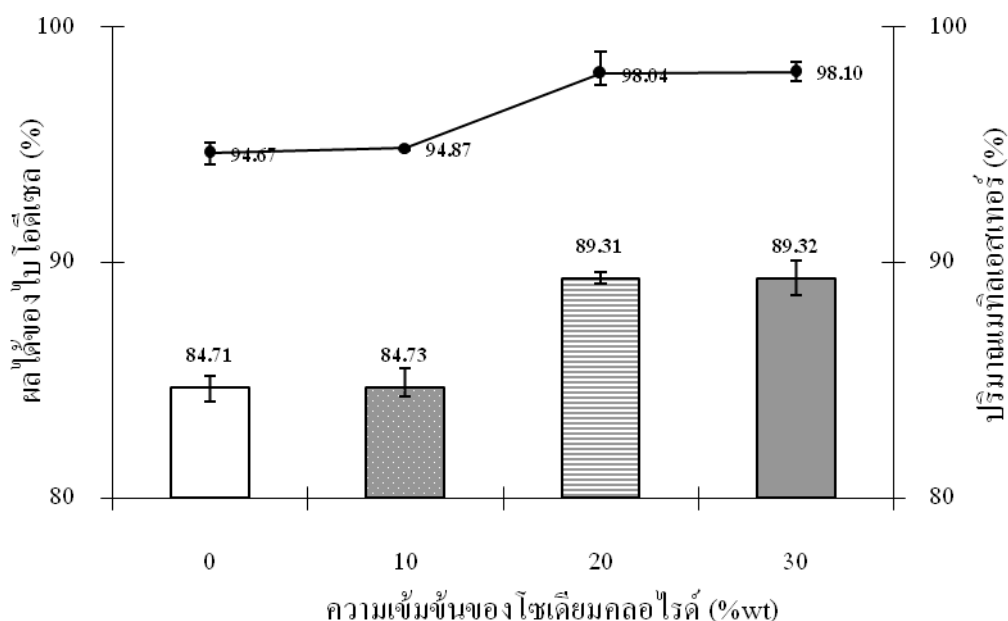
ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ซึ่งใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน โดยศึกษาผลกระทบของปริมาณน้ำที่อยู่ในไบโอดีเซลที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ และผลได้ของไบโอดีเซล โดยใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นตัวดูดซับน้ำจาก 0 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อีกทั้งยังศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ครั้งนี้ ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมเมทอกไซด์จาก 0.5 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันจาก 6:1 ถึง 9:1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจาก 1 ถึง 5 นาที และอัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟจาก 90 ถึง 360 วัตต์ รวมถึงวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลครั้งนี้ จุลวาลไฟ จุลหมอกควัน จุลไหลเท ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด

1. การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ในการดูดซับน้ำในน้ำมันสบู่ดำ ที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์และผลได้ของไบโอดีเซล โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อนในการผลิตไบโอดีเซล

น้ำที่มีอยู่ในน้ำมันเป็นปัจจัยสำคัญที่ลดปริมาณการผลิตเมทิลเอสเทอร์ และผลได้ของไบโอดีเซล เนื่องจากน้ำมีส่วนช่วยในการเกิดสบู่จากปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน ของเมทิลเอสเทอร์กับโซเดียมเมทอกไซด์ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาอีกด้วย (Leung and Guo, 2006)

โซเดียมคลอไรด์เป็นเกลือที่มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นได้ดี ราคาถูก หาง่าย และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งการดูดซับน้ำของเกลือเป็นแบบการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งโมเลกุลของน้ำจะเข้าไปแทรกอยู่ในรูพรุนเกลืออย่างไม่เฉพาะเจาะจง และอาศัยแรงวาลเดอร์วาลส์ในการยึดเกาะ (ชวริน และคณะ, 2549; สุจิตรา และอาทิตย์ยา, 2550) ดังนั้นจึงได้ศึกษาอิทธิพลของน้ำที่มีอยู่ในน้ำมันในการผลิตไบโอดีเซลโดยสภาวะคือ ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 (Leung and Guo, 2006) เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที และอัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (แดง และ รจเรข, 2549) และกำหนดให้ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ในการดูดซับน้ำในน้ำมันสบู่ดำเป็น 0 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ผลกระทบของปริมาณเมทิลเมทิลเอสเทอร์ (—●—) และผลได้ของไบโอดีเซล (□) ที่ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เป็น 0 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันตามลำดับ

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ให้ค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์ และผลได้ของไบโอดีเซลใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่ใช้โซเดียมคลอไรด์ดูดซับน้ำ ซึ่งที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ให้ค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์ และผลได้ของไบโอดีเซลเป็น 94.87 และ 84.73 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เนื่องจากน้ำที่เจือปนอยู่ในน้ำมันเป็นแบบเสถียร (Stable water-in-oil emulsion) และมีสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ทำหน้าที่ประสานน้ำซึ่งเป็นโมเลกุลมีขั้ว กับน้ำมันซึ่งเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วให้ยึดเกาะกันได้ โดยสารลดแรงตึงผิวนี้นี้สามารถพบได้ทั่วไปในน้ำมัน (ชวริน และคณะ, 2549) แสดงว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ไม่สามารถทำลายเสถียรภาพระหว่างน้ำกับน้ำมันได้ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เป็น 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน มีผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้นและคงที่ โดยเพิ่มสูงขึ้น 3.37 และ 3.43 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ อีกทั้งผลได้ของไบโอดีเซลก็เพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยค่าผลได้ของไบโอดีเซลสูงขึ้น 4.60 และ 4.61 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบ

กับการไม่ใช้โซเดียมคลอไรด์ดูดซับน้ำ แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน สามารถทำลายเสถียรภาพระหว่างน้ำกับน้ำมัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าโซเดียมคลอไรด์สามารถดูดซับน้ำที่อยู่ในน้ำมันออกไปได้ เพื่อสนับสนุนผลการทดลองดังกล่าวจึงได้ทำการวัดน้ำที่มีอยู่ในน้ำมันสบู่ดำหลังจากที่ผ่านการดูดซับน้ำด้วยโซเดียมคลอไรด์ โดยใช้เครื่อง Karl Fischer Coulometer ซึ่งพบว่าในน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้นมีปริมาณน้ำอยู่ 1.09 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และหลังจากผ่านการดูดซับน้ำในน้ำมันสบู่ดำด้วยโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นเป็น 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน พบว่าปริมาณน้ำในน้ำมันสบู่ดำลดลง 2.97 17.60 และ 18.00 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

จากการทดลองของ Kusdiana and Saka (2004) ที่ศึกษาผลกระทบของน้ำที่มีต่อผลได้ของไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ ในสถานะที่ใช้กรด เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และสถานะเหนือจุดวิกฤต พบว่าเมื่อใช้กรด และเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณน้ำเพียง 0.1 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ และผลได้ของไบโอดีเซลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่น้ำไม่มีผลกระทบในกรณีที่ใช้สถานะเหนือจุดวิกฤต นอกจากนี้จากการทดลองของ Ma and Hana (1999) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากไขมันวัว โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าน้ำเพียง 0.06 เปอร์เซ็นต์มีผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ลดลง และจากการศึกษาของสุจิตรา และอาทิตย์ (2550) นำน้ำมันพืชใช้แล้วมาผ่านคอลัมน์เกลือโซเดียมคลอไรด์ จำนวน 3 รอบ พบว่าโซเดียมคลอไรด์สามารถดูดซับน้ำในน้ำมันได้ 59.48 เปอร์เซ็นต์

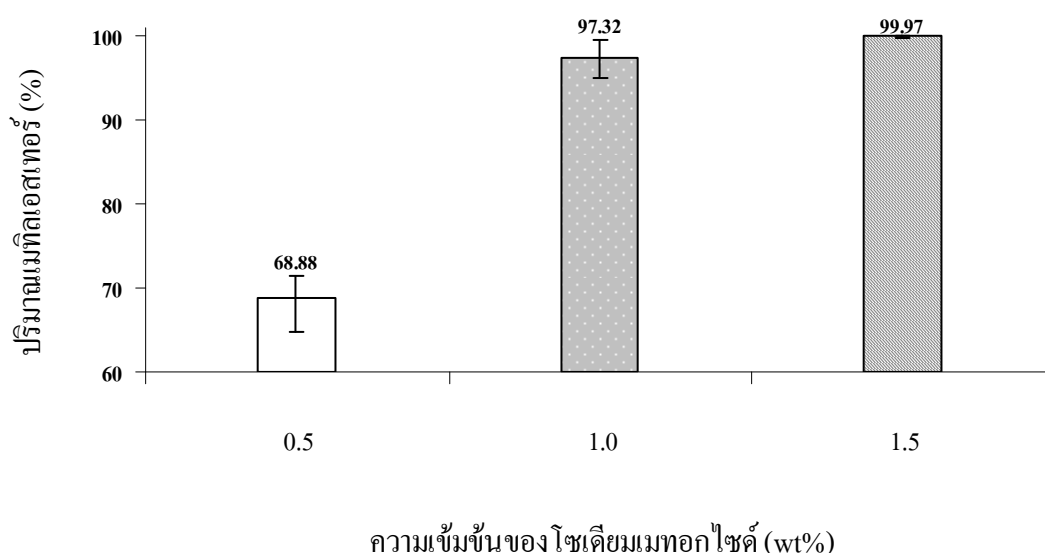
ดังนั้นจากผลการทดลองดังกล่าวจึงสามารถกล่าวได้ว่า ปริมาณที่มีอยู่ในน้ำมันสบู่ดำทั้งก่อนและหลังผ่านการดูดซับน้ำด้วยโซเดียมคลอไรด์นั้น ส่งผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์และผลได้ของไบโอดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ

ในงานวิจัยนี้จึงขอเลือกความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการใช้เพื่อดูดซับน้ำในน้ำมัน โดยที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันนี้ จะให้ค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ผลได้ของไบโอดีเซล และมีปริมาณน้ำในน้ำมันสบู่ดำเป็น 98.04 89.31 และ 0.8945 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

2. การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน

2.2 การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมเมทอกไซด์ที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์

ผลการผลิตไบโอดีเซล ณ สภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที และอัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ ซึ่งศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมเมทอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน แสดงดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ผลกระทบของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ และความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์เป็น 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันตามลำดับ

จากภาพพบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน มีผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์น้อยที่สุด ซึ่งมีค่าเป็น 68.88 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุเป็นเพราะความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ไม่เพียงพอ ให้การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สมบูรณ์ได้ (Rashid and Anwar, 2008; Sukhawanit *et al.*, 2004) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมเมทอก

ไซค์เป็น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน พบว่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้นเป็น 97.32 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซค์ที่เพิ่มขึ้นช่วยให้สมดุลของปฏิกิริยาไปทางด้านผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา และเป็นสาเหตุให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงขึ้น (Ma and Hana, 1999; Sukhawanit *et al.*, 2004) จากนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซค์จาก 1.0 เป็น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน พบว่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้นน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มความเข้มข้นโซเดียมเมทอกไซค์จาก 0.5 ถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน โดยที่ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซค์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดเป็น 99.97 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาเข้าใกล้สมดุล ดังนั้นอัตราการเกิดเมทิลเอสเทอร์จึงช้าลง

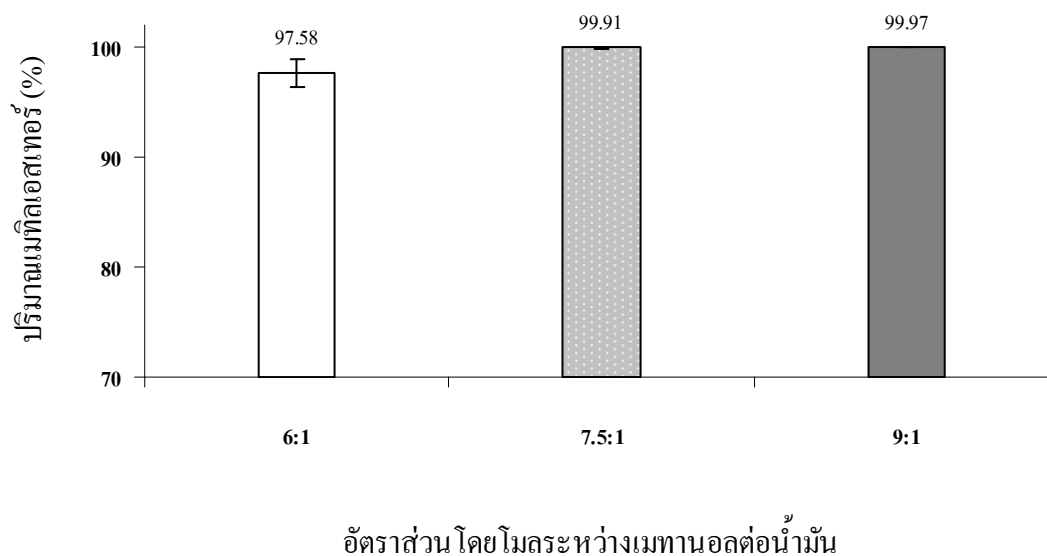
ผลการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Narvaez *et al.* (2007) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าอัตราการเกิดเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 0.2 เป็น 0.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน และอัตราการเกิดเมทิลเอสเทอร์ลดลง หลังจากเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 0.6 เป็น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน โดยให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดเป็น 79 เปอร์เซ็นต์ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Azcan and Danislan (2007) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดฝ้าย โดยศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จาก 0.5 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ พบว่าที่ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุด โดยให้ค่าเป็น 99.8 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นทัศนีย์ (2550) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดเป็น 97.9 เปอร์เซ็นต์ และงานวิจัยของ Leung and Guo (2006) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้โซเดียมเมทอกไซค์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่ความเข้มข้นโซเดียมเมทอกไซค์เป็น 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับ 92.8 เปอร์เซ็นต์

อย่างไรก็ตามจากการทดลองของ Freedman *et al.* (1984) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมควรไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน แต่เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมเมทอกไซค์ มีน้ำหนัก

โมเลกุลเป็น 40.0 และ 54.0 กรัมต่อโมลตามลำดับ ซึ่งเมื่อใช้ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยโมลน้ำมันแล้ว พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน มีค่าเท่ากับความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เนื่องจากโซเดียมเมทอกไซด์มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ จึงเป็นสาเหตุให้ต้องใช้ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์มากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน (Singh *et al.*, 2006) ดังนั้นจึงสมควรเลือกความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ซึ่งที่สภาวะการทดลองนี้ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็น 99.97 เปอร์เซ็นต์

2.2 การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์

การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน มีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 3:1 ซึ่งผลิตเมทิลเอสเทอร์ 3 โมลและกลีเซอรอล 1 โมล แต่เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นปริมาณเมทานอลที่มากเกินไปจะช่วยให้ปฏิกิริยาไปทางด้านผลิตภัณฑ์ (Ma and Hana, 1999) ดังนั้นจึงผลิตไบโอดีเซล ณ สภาวะการทดลองคือ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที และอัตราการใช้ความร้อน 90 วัตต์ โดยกำหนดให้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 7.5:1 และ 9:1 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ผลกระทบของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 7.5:1 และ 9:1 ตามลำดับ

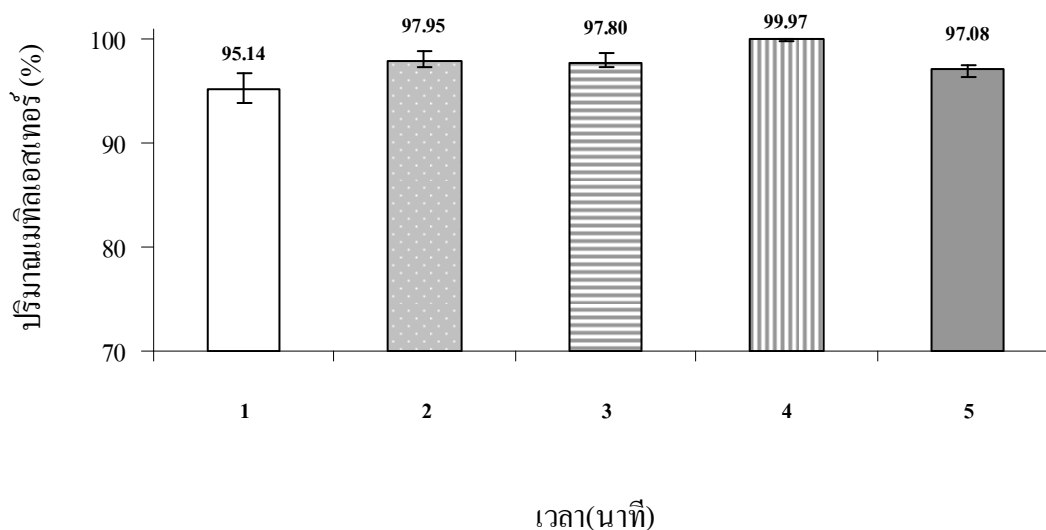
จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันจาก 6:1 เป็น 7.5:1 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นเป็น 99.91 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน จะช่วยผลักดันสมดุลของปฏิกิริยาให้ไปทางด้านของผลิตภัณฑ์ (Singh *et al.*, 2006) ทำให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น 2.33 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันจาก 7.5:1 เป็น 9:1 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เริ่มคงที่ ทั้งนี้เพราะว่าที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 การเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์แล้ว โดยที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 ให้ค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็น 99.97 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการให้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มากเกินไป นอกจากจะไม่เพิ่มปริมาณเมทิลเอสเทอร์แล้ว ยังเป็นการทำให้เกิดความยุ่งยากในการแยกชั้นกลีเซอรอลออกจากชั้นของเมทิลเอสเทอร์อีกด้วย (Encianr *et al.*, 2007) อีกทั้งในขั้นตอนการล้างยังใช้เวลานานในการแยกชั้นระหว่างชั้นของน้ำล้างและชั้นของเมทิลเอสเทอร์ เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลในเมทานอลทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ระหว่างน้ำล้างและเมทิลเอสเทอร์ (Leung and Guo, 2006) นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายใน

กระบวนการนำ เมทานอลกลับมาใช้ใหม่อีกด้วย (Freedman *et al.*, 1984) ดังนั้นจึงสมควรเลือกอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1

ผลจากการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Leung and Guo (2006) ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว และใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันจาก 3:1 ถึง 12:1 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันจาก 3:1 ถึง 7:1 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันจาก 7:1 ถึง 9:1 ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์คงที่ โดยที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 7:1 ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดเป็น 94 เปอร์เซ็นต์

2.3 การศึกษาผลกระทบของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์

ผลการศึกษาผลกระทบของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ณ สภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 7.5:1 อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ โดยกำหนดให้เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็น 1 2 3 4 และ 5 นาที ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ผลกระทบของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 7.5:1 อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ และเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 1 2 3 4 และ 5 นาทีตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า ในช่วง 1 นาทีแรก อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 95.14 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 2 3 และ 4 นาที อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง โดยให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็น 97.95 97.80 และ 99.97 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ อีกทั้งที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุด เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟช่วยให้โมเลกุลที่มีขั้วซึ่งคือเมทานอลเกิดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก จากนั้นขั้วในโมเลกุลเกิดการหมุนอย่างรวดเร็ว เพื่อจัดเรียงตัวในทิศทางเดียว กับทิศของสนามไฟฟ้า ซึ่งขณะที่ขั้วของโมเลกุลหมุนจะเกิดความร้อน เนื่องจากแรงเสียดทานในการเคลื่อนที่ และถ่ายเทความร้อนให้กับโมเลกุลข้างเคียง จึงเป็นสาเหตุให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น และช่วยลดเวลาในการทำปฏิกิริยา (Lidstrom *et al.*, 2001; Saifuddin and Chua, 2004) โดยการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาขึ้นจาก 4 เป็น 5 นาที มีผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ลดลง 2.89 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาผันกลับของเมทิลเอสเทอร์ ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Leung and Guo, 2006) เมื่อพิจารณาแล้วจึงสมควรใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที

ผลจากการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Azcan and Danisnan (2008) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อนเป็นเวลา 1 3 และ 5 นาที พบว่าการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา มีผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงขึ้น โดยให้ปริมาณเมทิลสูงสุดเป็น 99.4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาทีทั้งสองกรณี และงานวิจัยของ Saifuddin and Chua (2004) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน โดยศึกษาผลกระทบของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณเอทิลเอสเทอร์จาก 1 ถึง 5 นาที พบว่าที่เวลา 4 นาทีให้ปริมาณเอทิลเอสเทอร์สูงสุดเป็น 87 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ระหว่างการใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน กับการให้ความร้อนโดยตรง แสดงดังตารางที่ 6 พบว่าจากงานวิจัยของทัศนีย์ (2550) ซึ่งผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยเมทานอล โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และให้ความร้อนโดยตรง พบว่าต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ดังนั้นการใช้ไมโครเวฟช่วยลดเวลาในการทำปฏิกิริยาลง 22.5 เท่า และในงานวิจัยของ Azcan and Danisnan (2007) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดฝ้าย โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการใช้ไมโครเวฟช่วยลดเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 30 นาทีเหลือ 5 นาที นอกจากนี้งานวิจัยของ Saifuddin and Chua (2004) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าไมโครเวฟช่วยลดเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 75 นาทีเหลือ 4 นาที และงานวิจัยของ Mazzocchia *et al.* (2004) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากเมล็ดเรพ โดยใช้เบเรียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ พบว่าเมื่อใช้ไมโครเวฟสามารถเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 60 นาทีเหลือ 15 นาที ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไมโครเวฟช่วยลดเวลาในการทำปฏิกิริยา อีกทั้งการใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อนยังไม่ต้องการการกวนผสมอีกด้วย

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล โดยการให้ความร้อนจากไมโครเวฟและการให้ความร้อนโดยตรง

น้ำมัน	อัตราส่วนโดย โมลระหว่างเม ทานอลต่อน้ำ มัน	ความเข้มข้นของ ตัวเร่งปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก)	อัตราการใช้ ความร้อน (วัตต์)/อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (นาที)	ปริมาณเม ทิลเอสเทอร์ (เปอร์เซ็นต์)	วิธีการให้ ความร้อน
สบู่ดำ	7.5:1	1.5% NaOCH ₃	90 วัตต์	4	99.97	ไมโครเวฟ
สบู่ดำ ¹	6.9:1	1.5% KOH	45°ซ	90	97.9	โดยตรง
เมล็ดฝ้าย ²	6:1	1.5% KOH	60°ซ	5	99.7	ไมโครเวฟ
เมล็ดฝ้าย ²	6:1	1.5% KOH	60°ซ	30	99.9	โดยตรง
ไข่แล้ว ³	6:1	0.5% NaOH	375 วัตต์	4	87	ไมโครเวฟ
ไข่แล้ว ³	6:1	0.5% NaOH	60°ซ	75	< 87	โดยตรง
เมล็ดเรพ ⁴	9:1	1.5% Ba(OH) ₂	60°ซ	15	98	ไมโครเวฟ
เมล็ดเรพ ⁴	18:1	1.5% Ba(OH) ₂	60°ซ	60	81	โดยตรง

ที่มา: ¹ ทศนีย์ (2550)

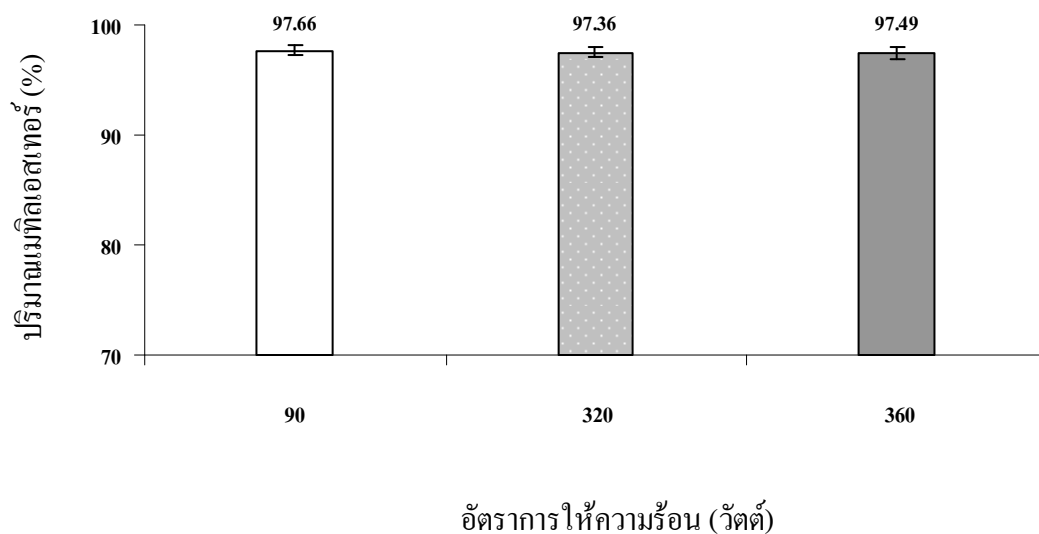
² Azcan and Danisnani (2007)

³ Saifuddin and Chua (2004)

⁴ Mazzocchia *et al.* (2004)

2.4 การศึกษาผลกระทบของอัตราการใช้ความร้อนของไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์

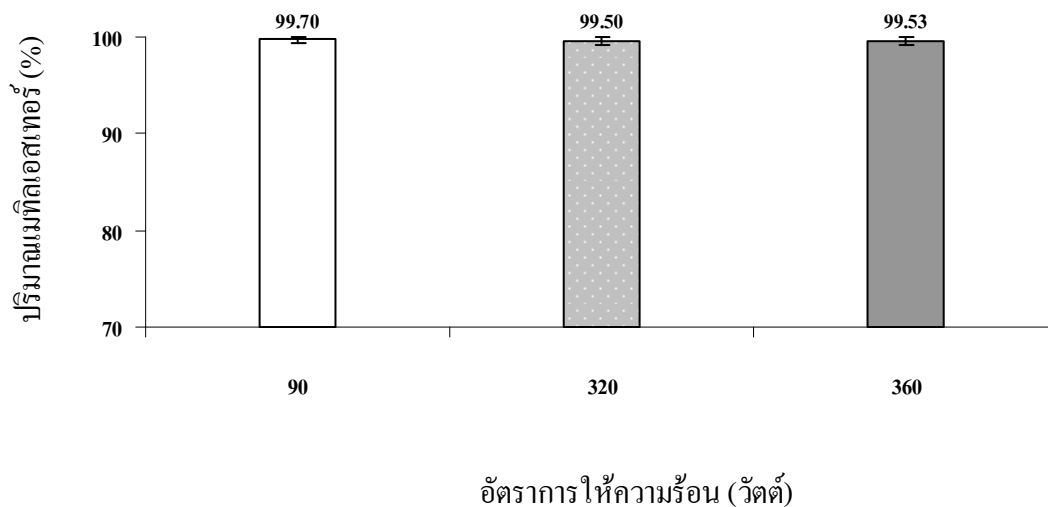
ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการใช้ความร้อน ณ สภาวะการทดลองดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที โดยกำหนดให้อัตราการใช้ความร้อนเป็น 90 320 และ 360 วัตต์ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ผลกระทบของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที และอัตราการให้ความร้อนเป็น 90 320 และ 360 วัตต์ตามลำดับ

จากผลการทดลอง ณ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 2 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการให้ความร้อนจาก 90 เป็น 320 และ 360 วัตต์ตามลำดับ ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ใกล้เคียงกัน โดยให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็น 97.66 97.36 และ 97.49 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังนั้นเพื่อให้เห็นผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์อย่างชัดเจนขึ้น จึงศึกษาการผลิตไบโอดีเซลและเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 4 นาที

ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการให้ความร้อน ณ สภาวะการทดลองดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที โดยกำหนดให้อัตราการให้ความร้อนเป็น 90 320 และ 360 วัตต์ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ผลกระทบของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที และอัตราการให้ความร้อนเป็น 90 320 และ 360 วัตต์ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ ให้ค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 99.70 เปอร์เซ็นต์ โดยเมื่อเพิ่มอัตราการให้ความร้อนเป็น 320 และ 360 วัตต์ พบว่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์ไม่เพิ่มสูงขึ้น และให้ค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็น 99.50 และ 99.53 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ อีกทั้งยังให้อุณหภูมิสุดท้ายในการทำปฏิกิริยาใกล้เคียงกัน และให้ค่าอุณหภูมิเป็น 66 68 และ 69 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงอุณหภูมิได้ดังตารางที่ 7 ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากในทดลองมีการติดตั้งระบบหล่อเย็น (Reflux condenser) ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการให้ความร้อน มีผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของเมทานอลซึ่งมีค่าเป็น 64 องศาเซลเซียส ทำให้เมทานอลระเหย แต่เนื่องจากมีระบบหล่อเย็นที่จะควบแน่นเมทานอลให้กลับลงมา จึงเป็นสาเหตุให้อุณหภูมิของปฏิกิริยาคงที่ จากผลการศึกษาสมควรเลือกอัตราการให้ความร้อนเป็น 90 วัตต์

ตารางที่ 7 ผลของอุณหภูมิไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที และอัตราการให้ความร้อนเป็น 90 320 และ 360 วัตต์ตามลำดับ

อัตราการให้ความร้อน (วัตต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
90	66
320	68
360	69

ผลจากการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับงานวิจัยของแดง และจเรข (2549) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการให้ความร้อนจาก 90 ถึง 360 วัตต์ ให้ค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์ใกล้เคียงกัน และจากการทดลองของ Azcan and Danisman (2008) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ ที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ไมโครเวฟอัตราการให้ความร้อน 1200 วัตต์เป็นเวลา 3 นาที พบว่าอุณหภูมิของไบโอดีเซลมีค่าเป็น 64 องศาเซลเซียสภายใน 30 วินาทีและคงที่ไปจนถึงเวลา 3 นาที

3. คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน

เมื่อผลิตไบโอดีเซลจากสภาวะที่ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 7.5:1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟ 90 วัตต์ ให้ค่าคุณสมบัติของไบโอดีเซล ได้แก่ ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส จุดวาบไฟ จุดหมอกควัน จุดไหลเท ค่าความเป็นกรด แสดงได้ในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน

คุณสมบัติ	ค่าของไบโอดีเซล	มาตรฐานกรม ธุรกิจพลังงาน ¹	มาตรฐาน ASTM D 6751-02 ²
ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (เปอร์เซ็นต์)	99.97	96.5	ไม่ระบุ
ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส (มิลลิเมตร ² ต่อวินาที)	4.51	3.5 ถึง 5.0	3.5 ถึง 5.0
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	196	ไม่ต่ำกว่า 120	ไม่ต่ำกว่า 120
จุดหมอกควัน (องศาเซลเซียส)	4.0	ไม่ระบุ	-3 ถึง 12
จุดไหลเท (องศาเซลเซียส)	1.5	ไม่ระบุ	-15 ถึง 10
ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)	0.28	ไม่สูงกว่า 0.5	ไม่สูงกว่า 0.8

ที่มา: ¹ กรมธุรกิจพลังงาน (2550)

² Ghadge *et al.* (2006)

จากตารางที่ 8 พบว่าไบโอดีเซลมีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 99.97 เปอร์เซ็นต์ ค่าความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียสเป็น 4.51 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที จุดวาบไฟ 196 องศาเซลเซียส จุดหมอกควัน 4.0 องศาเซลเซียส จุดไหลเท 1.5 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด 0.28 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติไบโอดีเซลพบว่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน รวมถึงมาตรฐาน ASTM D 6751-02 ดังนั้นจึงนับได้ว่าสามารถนำไบโอดีเซลไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้

4. การวิเคราะห์ผลได้และค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล

ผลการวิเคราะห์ผลได้ของไบโอดีเซลและค่าความเป็นกรดแสดงได้ดังตารางที่ 9 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์ดูดซับน้ำในน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้นก่อนการผลิตไบโอดีเซล ช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาสaponification ระหว่างโซเดียมเมทอกไซด์กับเมทิลเอสเทอร์ โดยมีน้ำเป็นส่วนช่วยในการเกิดปฏิกิริยา มีผลให้ผลได้ของไบโอดีเซลสูงขึ้น ในขณะที่น้ำมันสบู่ดำเริ่มต้น ซึ่งมีค่าความเป็นกรดเป็น 2.36 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม หลังจากทำปฏิกิริยาทรานส์

เอสเทอร์ฟิเคชัน มีผลให้ค่าความเป็นกรดลดลง เนื่องจากกรดไขมันอิสระทำปฏิกิริยากับโซเดียมเมทอกไซด์ และค่าความเป็นกรดผ่านตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

ตารางที่ 9 ค่าผลได้ของไบโอดีเซลและค่าความเป็นกรด

การทดลองที่	ความเข้มข้น โซเดียมคลอไรด์ (%wt)	ความเข้มข้น โซเดียมเมทอก- ไซด์ (%wt)	อัตราส่วนโดย โมลระหว่างเม- ทานอลต่อน้ำมัน	เวลา (นาที)	อัตราการให้ ความร้อน (วัตต์)	ผลได้ของไบโ- อดีเซล (เปอร์เซ็นต์)	ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)
1	0	1.3	7.5:1	4	90	84.71	0.28
2	10	1.3	7.5:1	4	90	84.73	0.37
3	20	1.3	7.5:1	4	90	89.31	0.28
4	30	1.3	7.5:1	4	90	89.32	0.19
5	20	0.5	7.5:1	4	90	79.28	0.09
6	20	1.0	7.5:1	4	90	89.31	0.19
7	20	1.5	7.5:1	4	90	89.26	0.37
8	20	1.5	6:1	4	90	84.81	0.46
9	20	1.5	7.5:1	4	90	87.15	0.39
10	20	1.5	9:1	4	90	87.98	0.34
11	20	1.5	7.5:1	1	90	84.70	0.15
12	20	1.5	7.5:1	2	90	89.33	0.26
13	20	1.5	7.5:1	3	90	88.82	0.28

ตารางที่ 9 (ต่อ)

การทดลองที่	ความเข้มข้น โซเดียมคลอไรด์ (%wt)	ความเข้มข้น โซเดียมเมทอก- ไซด์ (%wt)	อัตราส่วนโดย โมลระหว่างเม- ทานอลต่อน้ำมัน	เวลา (นาที)	อัตราการให้ ความร้อน (วัตต์)	ผลได้ของไบโอ- ดีเซล (เปอร์เซ็นต์)	ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)
14	20	1.5	7.5:1	4	90	89.36	0.32
15	20	1.5	7.5:1	5	90	88.24	0.42
16	20	1.5	7.5:1	2	90	89.64	0.35
17	20	1.5	7.5:1	2	320	89.82	0.23
18	20	1.5	7.5:1	2	360	89.21	0.25
19	20	1.5	7.5:1	4	90	89.33	0.28
20	20	1.5	7.5:1	4	320	89.39	0.33
21	20	1.5	7.5:1	4	360	89.39	0.25

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งใช้น้ำมันสบู่ดำเป็นวัตถุดิบ และใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยให้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อนเพื่อลดเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ ที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์และผลได้ของไบโอดีเซล และน้ำมันที่ผ่านการกรองจากขั้นตอนนี้มาผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และอัตราการใช้ความร้อนของไมโครเวฟ จากนั้นนำไปโอดีเซลที่ผลิตในสภาวะที่ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุด มาวิเคราะห์คุณสมบัติดังนี้ ความหนาแน่นที่ 40 องศาเซลเซียส จุดวาบไฟ จุดหมอกควัน จุดไหลเท และค่าความเป็นกรด ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ ในการดูดซับน้ำในน้ำมันสบู่ดำ ที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ และผลได้ของไบโอดีเซล โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อนในการผลิตไบโอดีเซล

การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ ที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์และผลได้ของไบโอดีเซล เพื่อดูดซับน้ำในน้ำมัน โดยผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 4 นาที และอัตราการใช้ความร้อน 90 วัตต์ พบว่าเมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดูดซับน้ำในน้ำมันเริ่มต้นก่อนที่นำไปผลิตไบโอดีเซล สามารถเพิ่มปริมาณเมทิลเอสเทอร์ได้ 3.37 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มผลได้ของไบโอดีเซลได้ 4.60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งที่สภาวะในการผลิตไบโอดีเซลนี้ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ และผลได้ของไบโอดีเซลเป็น 98.04 และ 89.31 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถนำโซเดียมคลอไรด์ไปใช้ในการดูดซับน้ำในน้ำมันได้

2. การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน

การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน ซึ่งใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คูดซบน้ำในน้ำมันสบู่ดำก่อนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีปัจจัยที่ศึกษาค้นคว้า ความเข้มข้นโซเดียมเมทอกไซด์จาก 0.5 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันจาก 6:1 ถึง 9:1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจาก 1 ถึง 5 นาที และอัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟจาก 90 ถึง 360 วัตต์ จากผลการทดลองพบว่าสถานะที่ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุด คือ การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 4 นาที และอัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟ 90 วัตต์ ซึ่งในสถานะดังกล่าวให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 99.97 เปอร์เซ็นต์

3. คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน

เมื่อผลิตไบโอดีเซลในสถานะที่เหมาะสมดังกล่าว และวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลได้ดังนี้ ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียสเป็น 4.51 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที จุดวาบไฟ 196 องศาเซลเซียส จุดหมอกควัน 4.0 องศาเซลเซียส จุดไหลเท 1.5 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด 0.28 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม โดยคุณสมบัติทั้งหมดผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน และมาตรฐาน ASTM D 6751-02

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องโดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน เพื่อสามารถผลิตไบโอดีเซลในปริมาณที่มากขึ้น และนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการผลิตในระดับอุตสาหกรรม
2. ควรศึกษาถึงความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน ซึ่งใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า กับการผลิตโดยให้ความร้อนโดยตรง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมธุรกิจพลังงาน. 2550. ประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550. แหล่งที่มา: www.doeb.go.th, 11 สิงหาคม 2551.

คณะกรรมการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร. 2545. พลังงานทดแทนเอทานอลและไบโอดีเซล. สำนักพิมพ์แปลน พรินติ้ง, กรุงเทพฯ.

แดง แซ่เบ๊ และ รจเรข แพทย์สาศติ. 2549. การเตรียมสารประกอบดับเบิลยูไฮดรอกไซด์จาก แมกนีเซียมและอะลูมิเนียม. โครงการงานวิศวกรรมเคมีปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

ชวน คล้ายปาน. 2546. เตาอบไมโครเวฟ. แหล่งที่มา: http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_2_2546_microwave.pdf, 25 สิงหาคม 2551.

ชวรินทร์ โพยมรัตน์ ธีรวัฒน์ อุดตะโมท และจันทพร ผลากรกุล. 2549. การประยุกต์ใช้หลักการดูดซับในการออกแบบ Salt Filter สำหรับกำจัดน้ำที่แขวนลอยในน้ำมันดีเซล. วารสารวิชาการ พระจอมเกล้าพระนครเหนือ 16(3): 7-13.

ทรงพล พร้อมมูล และ พิภพ พัทธกัศักดิ์เสรี. 2549. การผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ. แหล่งที่มา: <http://phoenix.eng.psu.ac.th/chem/File/445-2-2549/Manuscript%20in%20PDF/Manuscript%2001.pdf>, 18 กุมภาพันธ์ 2551.

ทัศนีย์ สวัสดิ์พาณิชย์. 2550. การหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุปด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นรินาม. 2551. สมบัติและองค์ประกอบหลักในน้ำมันพืช. วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล. แหล่งที่มา: <http://edunews.eduzones.com/tenny/3670>, 15 สิงหาคม 2551.

บริษัท พาราไซแอนติฟิค จำกัด. 2547. **ไบโอดีเซล เชื้อเพลิงชีวภาพของยุคสมัย**. แหล่งที่มา: www.barascientific.com/bscnews/forum/Biodiesel/biodiesel.php, 21 สิงหาคม 2551.

ปฐมา จาตุกานนท์, กล้านรงค์ ศรีรอต, Laurent Vaysse และ ศิริลักษณ์ เลี้ยงประยูร. 2548. กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบและสมบัติของน้ำมันสบู่ดำและเมทิลเอสเทอร์, 641-648. ใน **เรื่องเติมการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43**. กรุงเทพฯ.

ปวีณา อร่ามรัตนา. 2548. **การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวันดิบโดยใช้ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วรพล สวญพุ่ม. 2551. **การสกัดน้ำมันสบู่ดำ**. แหล่งที่มา: <http://woraphon9.blogspot.com/2008/02/jatropha-curcas-linn.html>, 18 ตุลาคม 2551.

วิกิพีเดีย. 2551. **โซเดียมคลอไรด์**. แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org>, 4 กันยายน 2551.

สุจิตรา อ่วมคง และ อาทิตยา เพชรวรรณ. 2550. **การประยุกต์ใช้เกลือในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล**. แหล่งที่มา: <http://homepageeng.psu.ac.th/chem/Project/12550/menu%20script/1.pdf>, 12 มีนาคม 2550.

สุจินันท์ ยิ้มคมขำ. 2550. **เมล็ดสบู่ดำ**. **ไบโอดีเซล**. แหล่งที่มา: <http://www.scimetrology.com/Uploads/04biode.pdf>, 3 พฤษภาคม 2550.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2550. **การผลิตและการตรวจสอบมาตรฐานไบโอดีเซลเบื้องต้น**. แหล่งที่มา: www.tistr.or.th, 11 สิงหาคม 2551.

สุปรียา สุขเกษม. 2550. **คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของน้ำมันสบู่ดำ**. การใช้ประโยชน์จากสบู่ดำ. แหล่งที่มา: <http://www.doa.go.th/fieldcrops/phanut/index.HTM>, 3 พฤษภาคม 2550.

ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร จังหวัดชัยนาท. 2549. **สบู่ดำ**. แหล่งที่มา: <http://aopd01.doae.go.th/data/physicnut21.htm>, 9 กุมภาพันธ์ 2550.

- อนุวัฒน์ จันทรสวรรณ. 2550. **ลักษณะทางพฤกษศาสตร์**. สบู่ดำ. แหล่งที่มา: <http://www.doa.go.th/fieldcrops/phinut/index.HTM>, 3 พฤษภาคม 2550.
- Anton, A. K., F. Omota, A.C. Dimian and G. Rothenberg. 2006. The heterogeneous advantage: biodiesel by catalytic reactive distillation. **Topics in Catalysis** 40: 141-149.
- Azcan, N. and A. Danisman. 2007. Alkali catalyzed transesterification of cottonseed oil by microwave irradiation. **Fuel**. 86: 2639-2644.
- Azcan, N. and A. Danisman. 2008. Microwave assisted transesterification of rapeseed oil. **Fuel** 87: 1781-1788.
- Barnwal, B.K. and M.P. Sharma. 2005. Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. **Renew. Sust. Energ. Rev.** 9: 363–378.
- Chemat, F., M. Poux and S.A. Galema. 1997. Esterification of stearic acid by isomeric forms of butanol in a microwave oven under homogeneous and heterogeneous reaction conditions. **J. Chem. Soc. Perkin Trans. 2**: 2371-2374.
- Domingos, A. K., E. B. Saad, H. M. Wilhel and L. P. Ramos. 2008. Optimization of the ethanolysis of *Raphanus sativus* (L. Var.) crude oil applying the response surface methodology. **Bioresour. Technol.** 99: 1837-1845.
- Encinar, J.M., J.F. González and A. Rodríguez-Reinares. 2007. Ethanolysis of used frying oil. Biodiesel preparation and characterization. **Fuel Process Technol.** 88: 513–522.
- Fukuda, H., A. Kondo and H. Noda. 2001. Biodiesel fuel production by transesterification of oils. **J. Biosci. Bioeng.** 92: 405–416.

- Freedman, B., E.H. Pryde and T.L. Mounts. 1984. Variables affecting the yields of fatty ester from transesterified vegetable oils. **J. Am. Oil. Chem. Soc.** 61(10): 1640.
- Ghadge, S.V. and H. Raheman. 2005. Biodiesel production from mahua (*Madhuca indica*) oil having high free fatty acids. **Biores Technol.** 28: 601-605.
- Goering, C.E., R.N. Campion, A.W. Schwab and E.H. Pryde. 1982. *In* vegetable oil fuels, pp. 279-286. *In Proceedings of the international conference on plant and vegetable oils as fuels.* American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, MI 4.
- Hanh, H.D., N.T. Dong, C. Starvarache, K. Okitsu, Y. Maeda and R. Nishimura. 2007. Methanolysis of triolein by low frequency ultrasonic irradiation. **Energ Convers Manage.** 49: 276-280.
- Hernando, J., P. Leton, M.P. Matia, J.L. Novella and J.A. Builla. 2007. Biodiesel and FAME synthesis assisted by microwaves: Homogeneous batch and flow processes. **Fuel** 86: 1641–1644.
- Jitputti, J., B. Kitiyanan, P. Rangsunvigit, K. Bunyakiat, L. Attanatho and P. Jenvanitpanjakul. 2006. Transesterification of crude palm kernel oil and crude coconut oil by different solid catalysts. **Chem Eng J.** 116: 61-66.
- Kusdiana D. and S. Saka. 2004. Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. **Biores Technol.** 91: 289–295.
- Lertsathapornasuk, V., P. Ruangying, R. Pairintra and K. Krisnangkura. 2005. **Continuous Transesterification of Vegetable Oils by Microwave Irradiation.** Available Source: <http://e-nett.sut.ac.th/download/RE/RE11.pdf>, 27 October 2008.

- Lertsathapornsuk, V., R. Pairintra, K. Krisnangkura and S.Chindaruksa. n.d. **Direct conversion of used vegetable oil to biodiesel and its used as an alternative fuel for compression ignition engine.** Available Source: <http://www.energy-based.nrct.go.th/Article/>, July 6, 2007.
- Leung, D.Y.C. and Y. Guo. 2006. Transesterification of neat and used frying oil: Optimization for biodiesel production. **Fuel Process Technol.** 87: 883–890.
- Lidstrom, P., J. Tierney, B. Wathey and J. Westman. 2001. Microwave assisted organic synthesis a review. **Tetrahedron.** 57: 9225-9283.
- López, D.E., J.G. Goodwin Jr. and D.A. Bruce. 2007. Transesterification of triacetin with methanol on Nafion® acid resins. **J. Catal.** 245: 381–391.
- Lotero E., Y. Liu, D. E. Lopez, K. Suwannakarn, D. A. Bruce, and James G. Goodwin, Jr. 2005. Synthesis of Biodiesel via Acid Catalysis. **Ind. Eng. Chem. Res.** 44: 5353-5363.
- Ma, F. and Hanna, M.A. 1999. Biodiesel production. a review. **Bioresour Technol.** 70: 1–15.
- Mahajan S., S. K. Konar and D. G. B. Boocock. 2007. Variables Affecting the Production of Standard Biodiesel. **J. Am. Oil. Chem. Soc.** 84: 189-195.
- Mazzocchia, C., G. Modica, A. Kaddouri and R. Nannicini. 2004. Fatty acid methyl esters synthesis from triglycerides over heterogeneous catalysts in the presence of microwaves. **C. R. Chimie.** 7: 601–605.
- Narvaez, P.C., S.M. Rincon and F.J. Sanchez. 2007. Kinetics of Palm Oil Methanolysis. **J. Am. Oil. Chem. Soc.** 84: 971–977.

- Nicholas, E.L. and L.M. Stencel. 2006. Fast, Easy Preparation of Biodiesel Using Microwave Heating. **Energy & Fuels**. 20: 2281-2283.
- Rashid, U. and F. Anwar. 2008. Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil. **Fuel**. 87: 265-273.
- Saifuddin, N. and K.H. Chua. 2004. Production of Ethyl Ester (Biodiesel) from used Frying Oil: Optimization of Transesterification Process using Microwave Irradiation. **Malaysian J Chem**. 6: 77-82.
- Schwab, A.W., G.J. Dykstra, E. Selke, S.C. Sorenson and E.H. Pryde. 1988. Diesel fuel from thermal decomposition of soybean oil. **J. Am. Oil. Chem. Soc.** 65: 1781-1786.
- Singh, A., B. He, J. Thompson and J. Van Gerpen. 2006. Process optimization of biodiesel production using alkaline catalyst. **Am. Soc. Agric. Bio. Eng.** 22(4): 597-600.
- Srivastava, A. and R. Prasad. 2000. Triglycerides-based diesel fuels. **Renew. Sust. Energ. Rev.** 4: 111-133.
- Sukhawanit, C., P. Srinophakun and M. Matsumura. 2004. Biodiesel Production from Crude Sunflower Oil. **Journal of Research in Engineering and Technology**. 1(2): 141-150.
- Toukoniitty, B., J.P. Mikkola, K. Eranen, T. Salmi and D.Y. Murzin. 2005. Esterification of propionic acid under microwave irradiation over an ion-exchange resin. **Catal Today**. 100: 431-435.
- Vicente, G., M. Martinez and J. Aracil. 2004 . Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems **Bioresou Technol**. 92: 297-305.

Wang, Y., S. Ou, P. Liu, F. Xue and S.Tang. 2006. Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil. **J. Mol. Catal. A: Chem.** 252: 107–112.

USDA Nation Biodiesel Education Program. 2006. **Comparison of alkaline catalysts for biodiesel production.** Available Source:
[http://www.uiweb.uidaho.edu/bioenergy/NewsReleases/ Technote05.pdf](http://www.uiweb.uidaho.edu/bioenergy/NewsReleases/Technote05.pdf), 27 October 2008.

Xu, Y., W. Du and D. Liu. 2005. Study on the kinetics of enzymatic interesterification of triglycerides for biodiesel production with methyl acetate as the acyl acceptor. **J. Mol. Catal. B: Enz.** 32: 241–245.

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

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน

ภาคผนวก ก

การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน

การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

กำหนด:

$$\text{มวลโมเลกุลของน้ำมันสบู่ดำ} = 900 \text{ กรัมต่อโมล}$$

$$\text{มวลโมเลกุลของเมทานอล} = 32 \text{ กรัมต่อโมล}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันสบู่ดำเริ่มต้นปริมาณ 50 กรัม และใช้อัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 7.5:1

วิธีการคำนวณ

$$\text{เมทานอลจำนวน 7.5 โมล มีน้ำหนัก} = 7.5 \times 32 = 240 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำมันสบู่ดำจำนวน 1 โมล มีน้ำหนัก} = 1 \times 900 = 900 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น ถ้าใช้น้ำมันสบู่ดำปริมาณ 50 กรัม

$$\text{ต้องใช้เมทานอลปริมาณ } \frac{50 \times 240}{900} = 13.33 \text{ กรัม}$$

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของไบโอดีเซล (Yield)

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของไบโอดีเซล (Yield)

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของไบโอดีเซลตามวิธีของ Leung and Guo (2006) มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

$$\text{Yield} = \frac{\text{weight of product (g)}}{\text{weight of raw oil (g)}} \times 100$$

ตัวอย่างคำนวณ

น้ำหนักของน้ำมันวัตถุดิบเริ่มต้นเท่ากับ	50 กรัม
น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเท่ากับ	44.80 กรัม

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ผลได้เท่ากับ $\frac{44.80}{50} \times 100 = 89.60$ เปอร์เซ็นต์

ภาคผนวก ก

การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์

ภาคผนวก ก

การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์

การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีตามมาตรฐาน EN 14103 โดยใช้ Methyl heptadecanoate เป็นสารมาตรฐานภายใน (Internal standard) สามารถคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลได้ดังสมการ

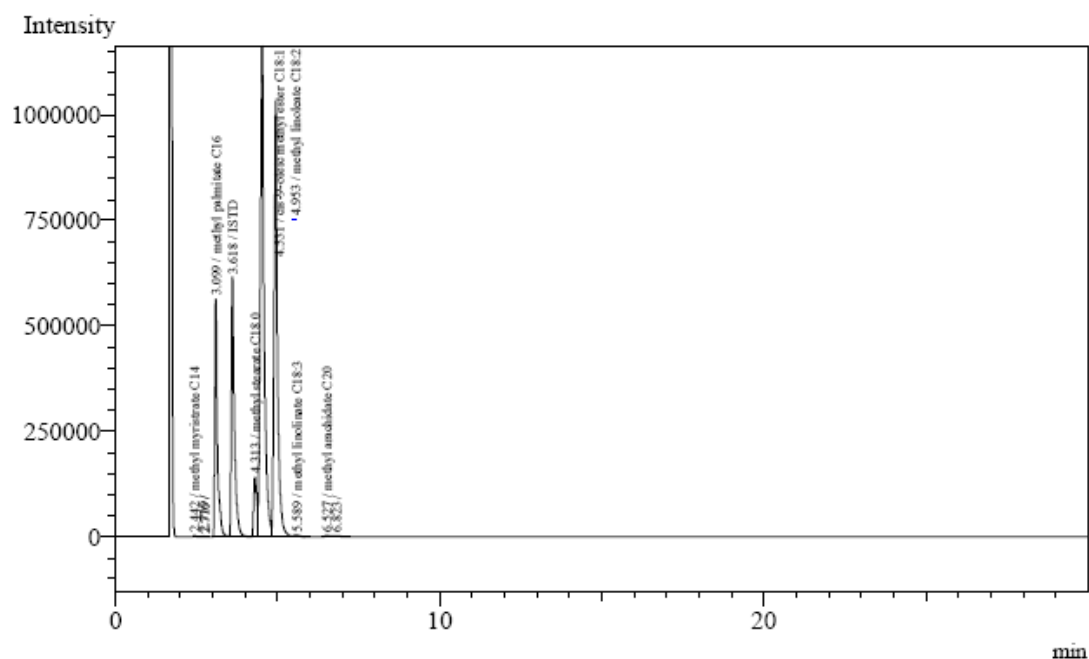
$$C = \frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{m} \times 100$$

โดย

- C = ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของเศษส่วนโดยมวล
- $\sum A$ = พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ซึ่งคิดตั้งแต่ C_{14} ถึง C_{24}
- A_{EI} = พื้นที่ของ Methyl Heptadecanoate
- C_{EI} = ความเข้มข้นของ Methyl Heptadecanoate (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
- V_{EI} = ปริมาตรของ Methyl Heptadecanoate (มิลลิลิตร)
- m = น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (มิลลิกรัม)

ตัวอย่างการคำนวณ

ทำการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน ซึ่งใช้น้ำมันสบู่ดำเริ่มต้นปริมาณ 50 กรัม ในสภาวะการทำปฏิกิริยาดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที และอัตรา การให้ความร้อน 90 วัตต์



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit Mark	ID#	Cmpd Name
1	2.442	8349	2336	0.033	%	4	methyl myristate C:
2	2.719	2438	709	0.010			
3	2.770	1724	454	0.007	V		
4	3.099	3078019	563596	12.258	%	5	methyl palmitate C1
5	3.618	3913788	616251	15.586	%	SV 15	ISTD
6	4.313	951822	141447	3.791	%	V 7	methyl stearate C18
7	4.531	9625970	1185451	38.335	%	V 8	cis-9-oleic methyl es
8	4.953	7456391	1034164	29.695	%	SV 9	methyl linoleate C18
9	5.589	26040	3908	0.104	%	T 10	methyl linolenate C1
10	6.527	27628	2552	0.110	%	11	methyl arachidate C:
11	6.823	18158	1438	0.072	%	V	
Total		25110327	3552306				

ภาพผนวกที่ ค1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง

จากโครมาโทแกรมสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\sum A = 25110327$$

$$A_{EI} = 3913788$$

$$C_{EI} = 9.999 \text{ มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร}$$

$$V_{EI} = 1 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$m = 54.2 \text{ มิลลิกรัม}$$

สามารถคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์ได้ดังนี้

$$C \left(\frac{25110327 - 3913788}{3913788} \right) \times \frac{9.999 \times 1}{54.2} \times 100\% = 99.10\%$$

ดังนั้น ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซล คือ 99.10 เปอร์เซ็นต์

ภาคผนวก ง

การคำนวณค่าความเป็นกรด

ภาคผนวก ง

การคำนวณค่าความเป็นกรด

สามารถคำนวณความเป็นกรดของไบโอดีเซลได้จากสมการ

$$\text{ค่าความเป็นกรด} = \frac{\text{ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ (มิลลิลิตร)} \times 56.1 \times 0.1}{\text{น้ำหนักของน้ำมันตัวอย่างตั้งต้น หรือเมทิลเอสเทอร์ (กรัม)}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

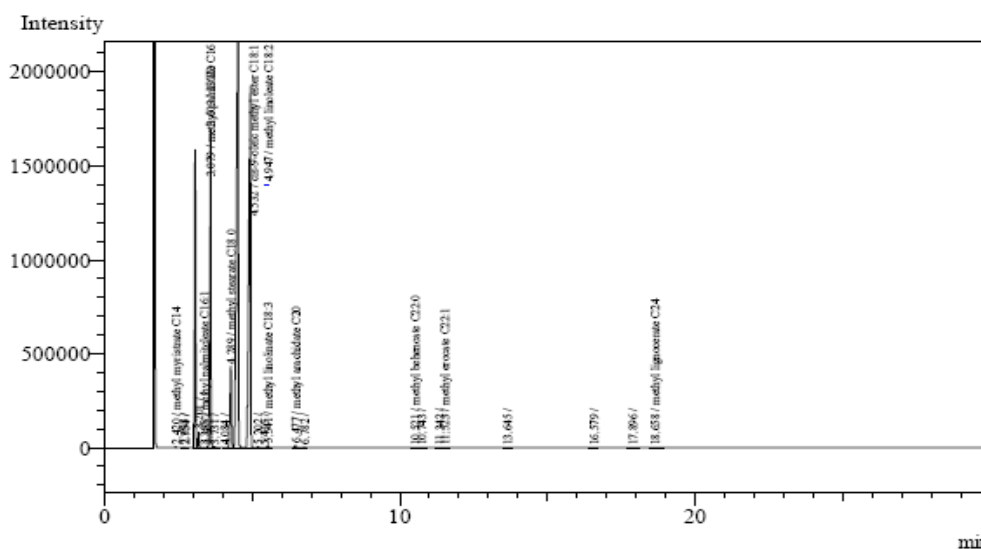
$$\begin{array}{ll} \text{ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้} & = 1.26 \text{ มิลลิลิตร} \\ \text{น้ำหนักของไบโอดีเซล} & = 3 \text{ กรัม} \end{array}$$

ดังนั้นค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลเท่ากับ

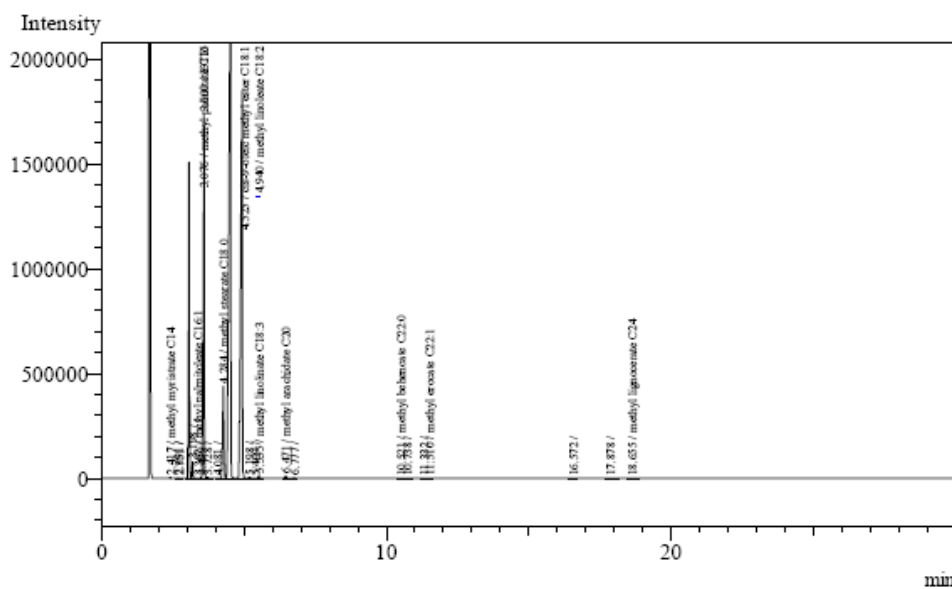
$$\frac{1.26 \times 56.1 \times 0.1}{3} = 2.36 \quad \text{มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม}$$

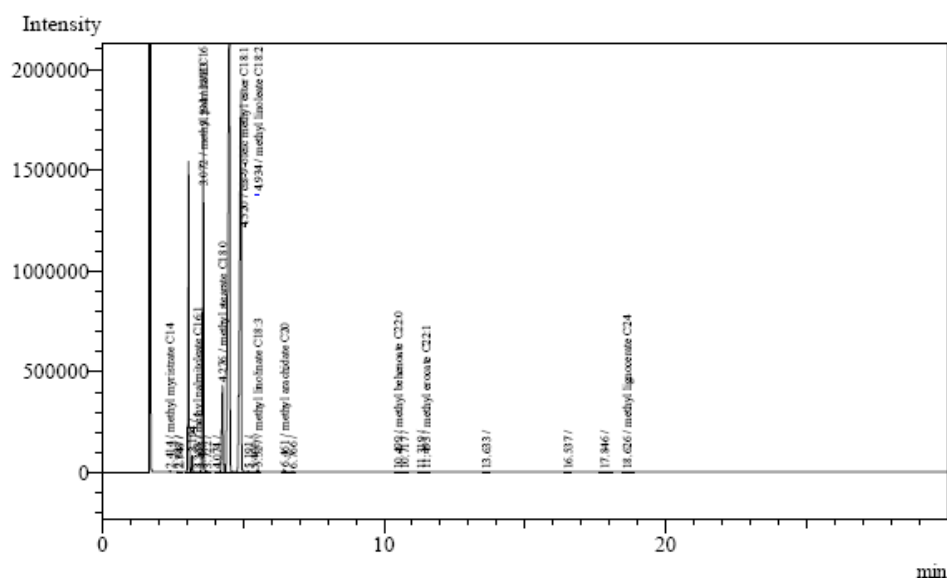
ภาคผนวก จ

ลักษณะโครมาโตแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี

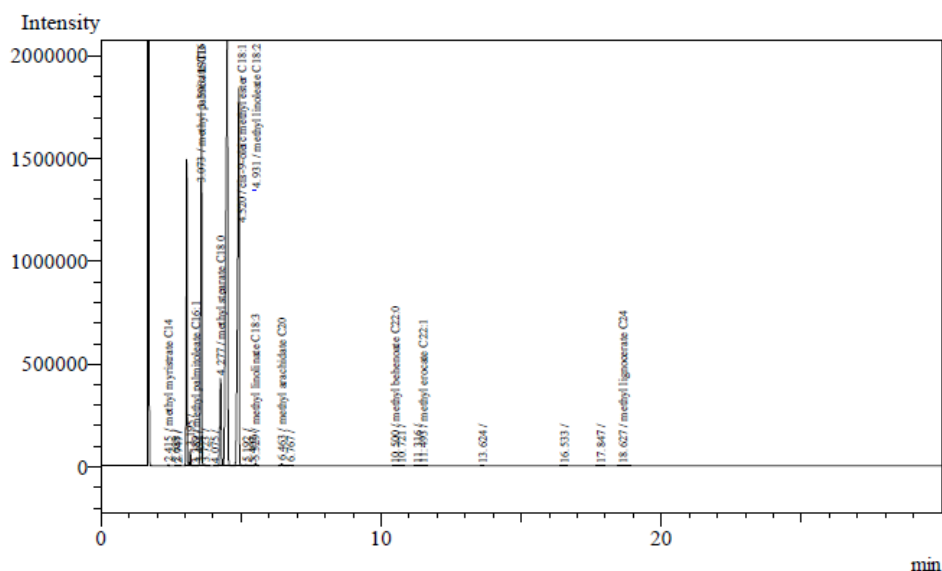


ภาพผนวกที่ จ3 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)

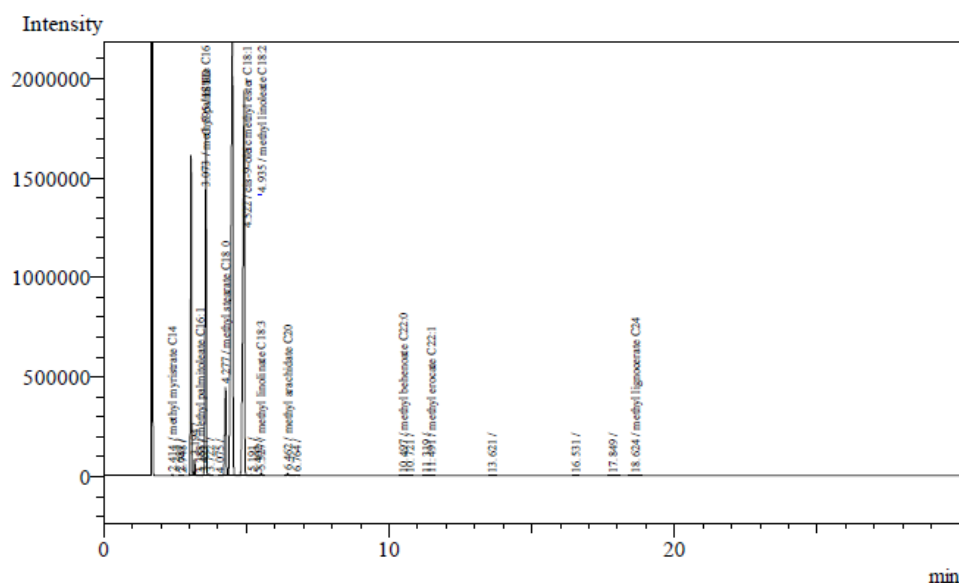




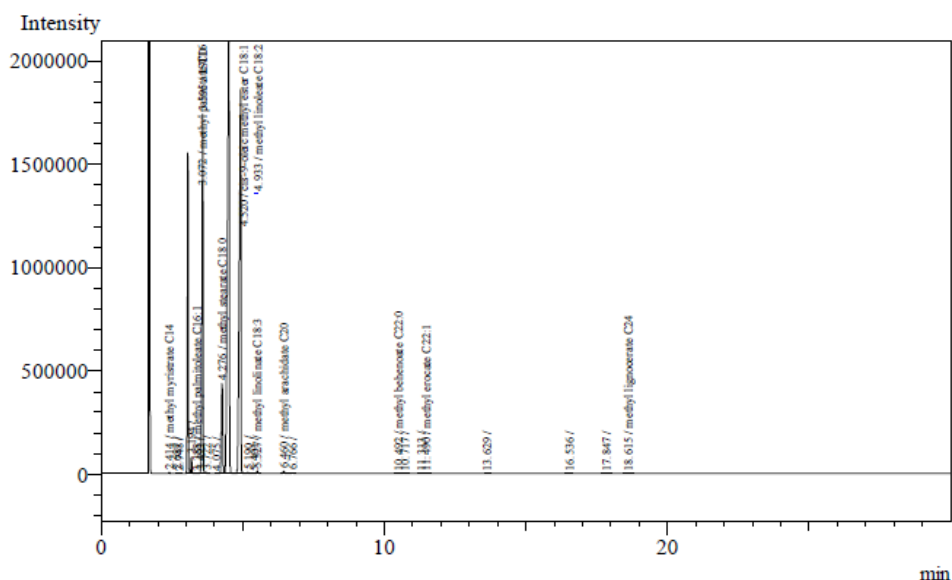
ภาพผนวกที่ จ7 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 1)



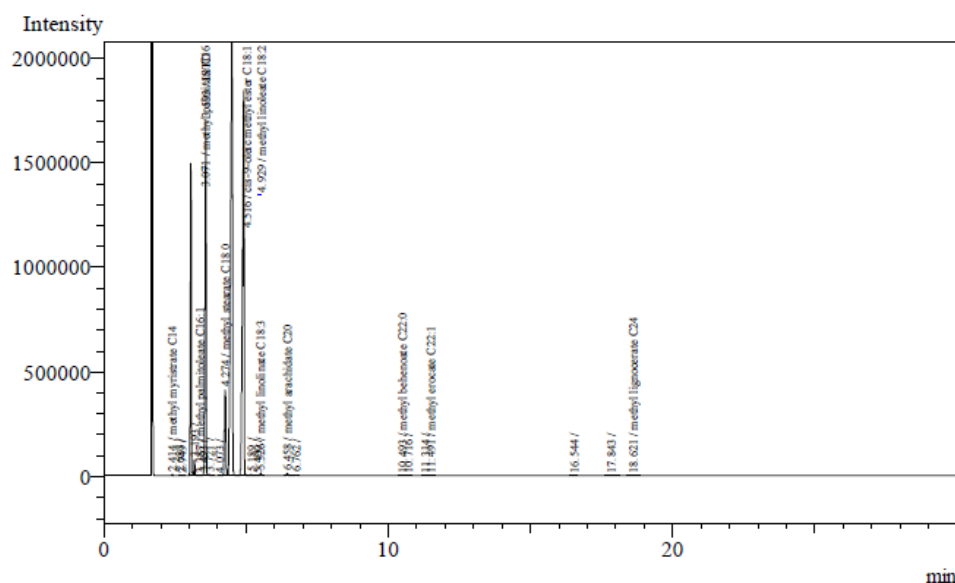
ภาพผนวกที่ จ8 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 2)



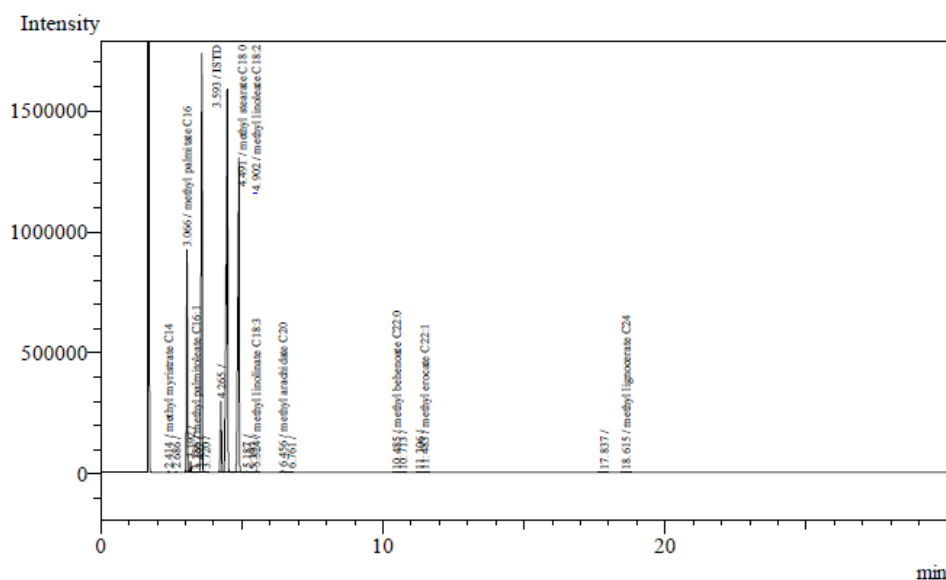
ภาพผนวกที่ ๑9 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)



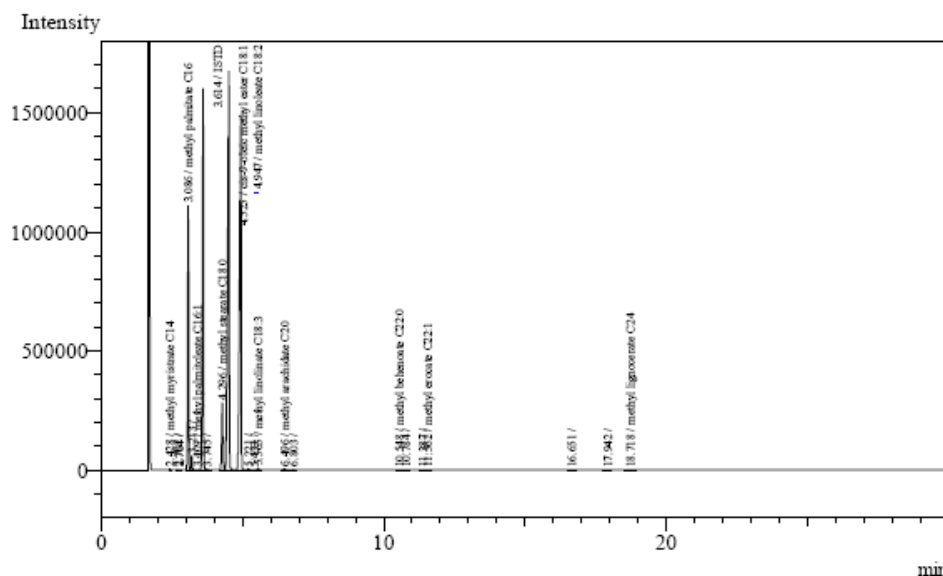
ภาพผนวกที่ ๑10 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)



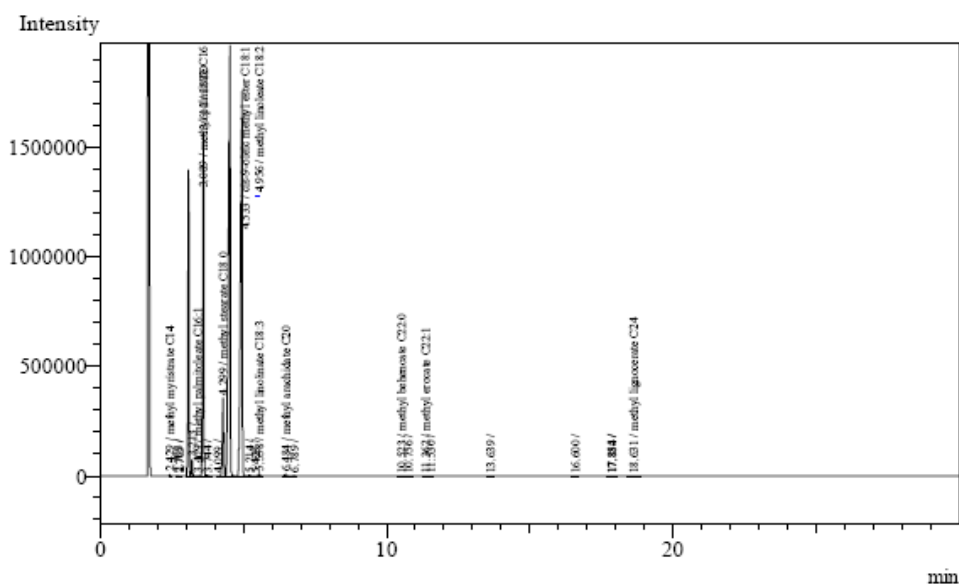
ภาพผนวกที่ จ11 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)



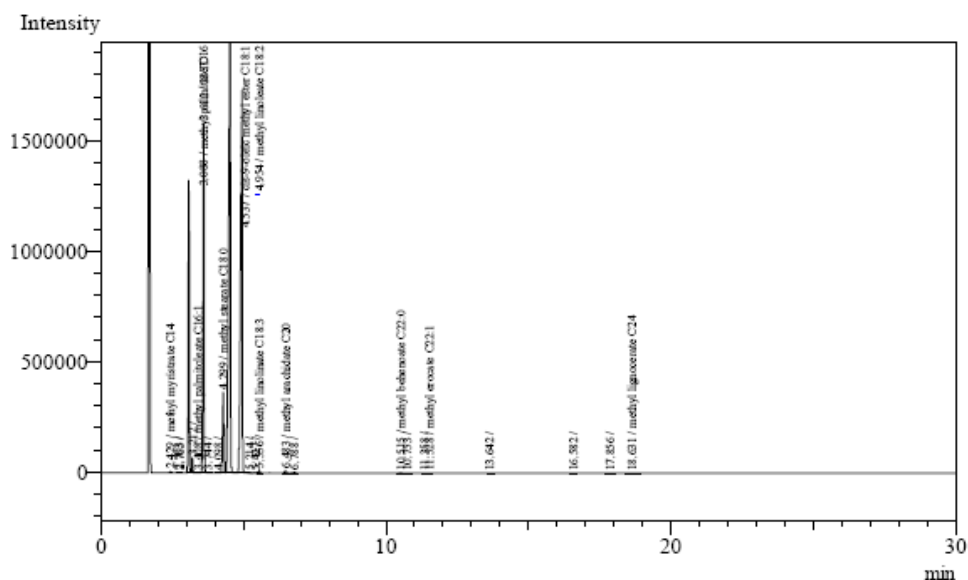
ภาพผนวกที่ จ12 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)



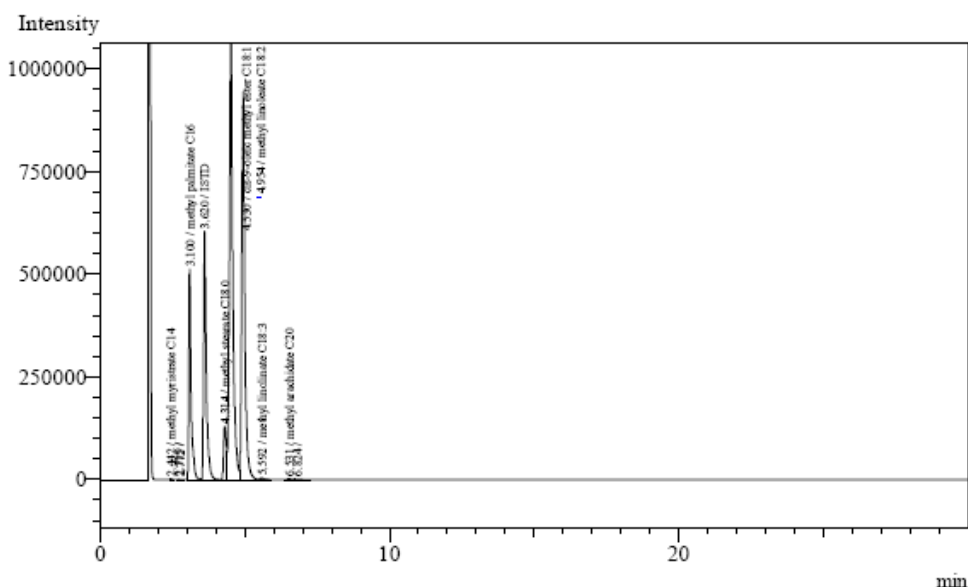
ภาพผนวกที่ จ15 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)



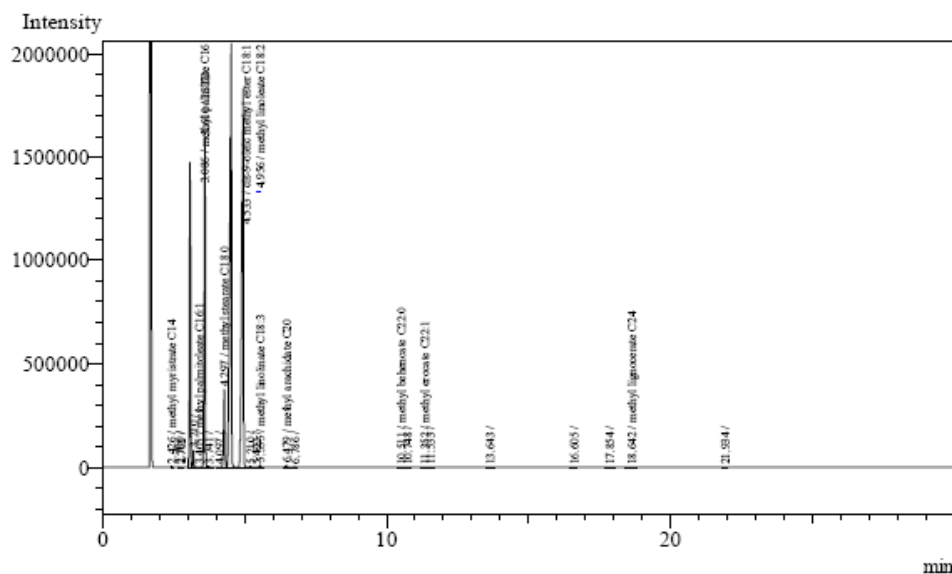
ภาพผนวกที่ จ16 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)



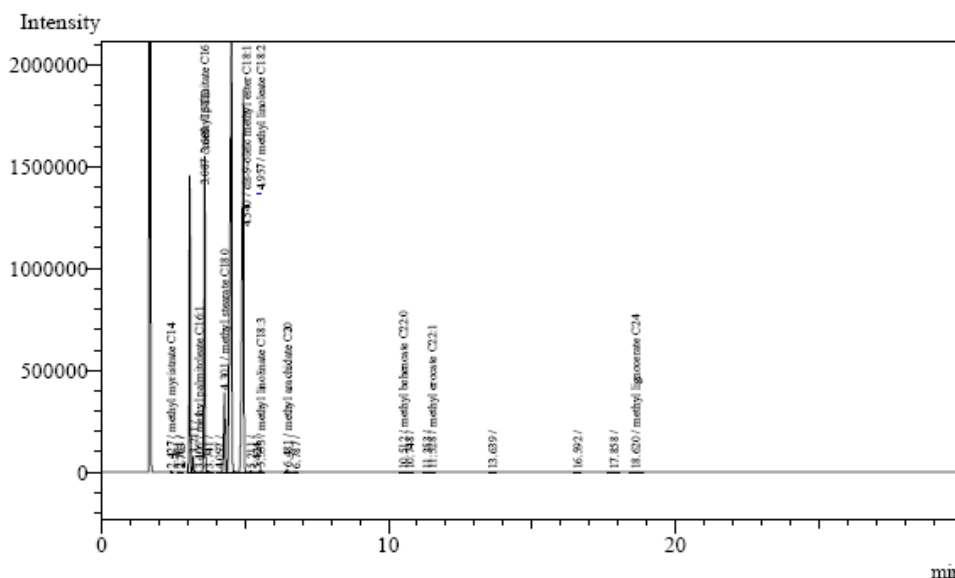
ภาพผนวกที่ จ17 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)



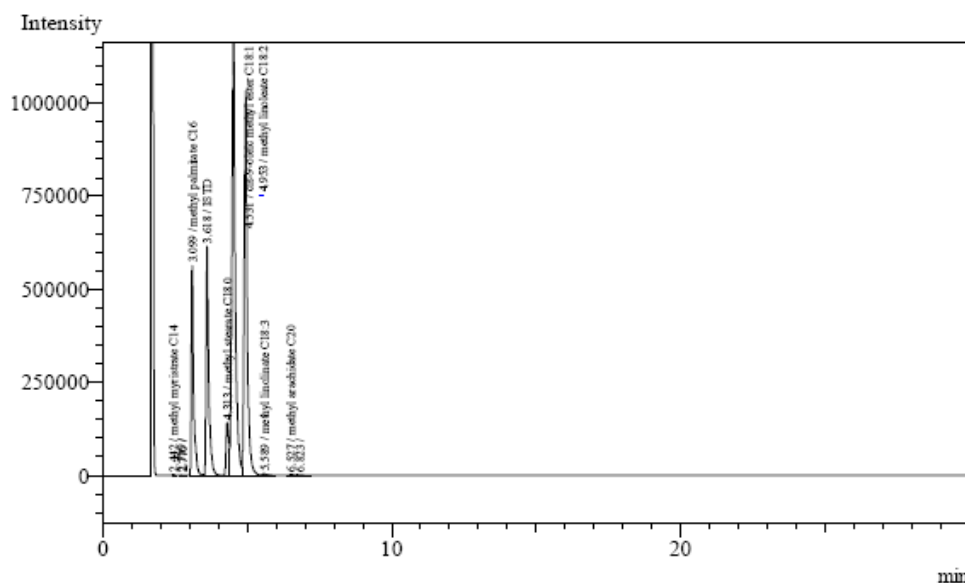
ภาพผนวกที่ จ18 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)



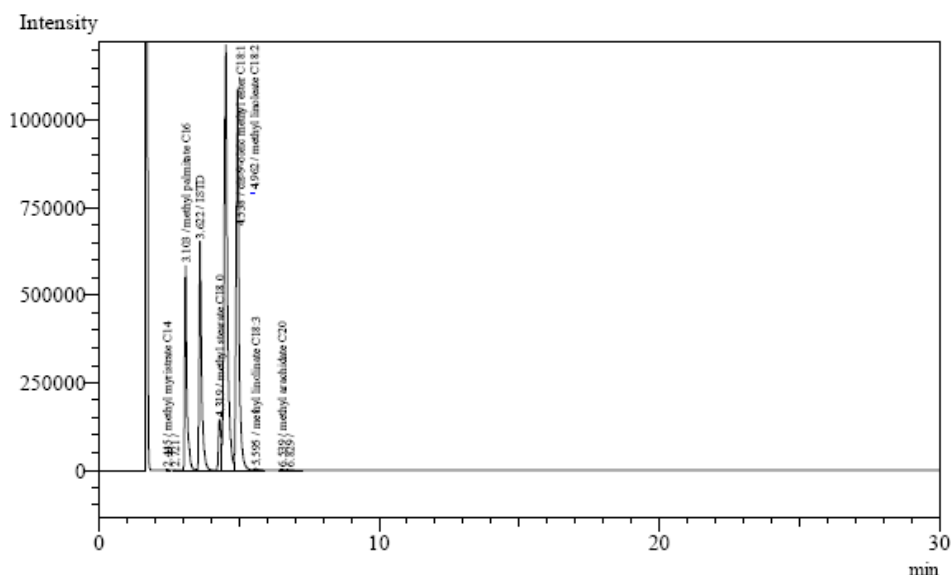
ภาพผนวกที่ จ19 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)



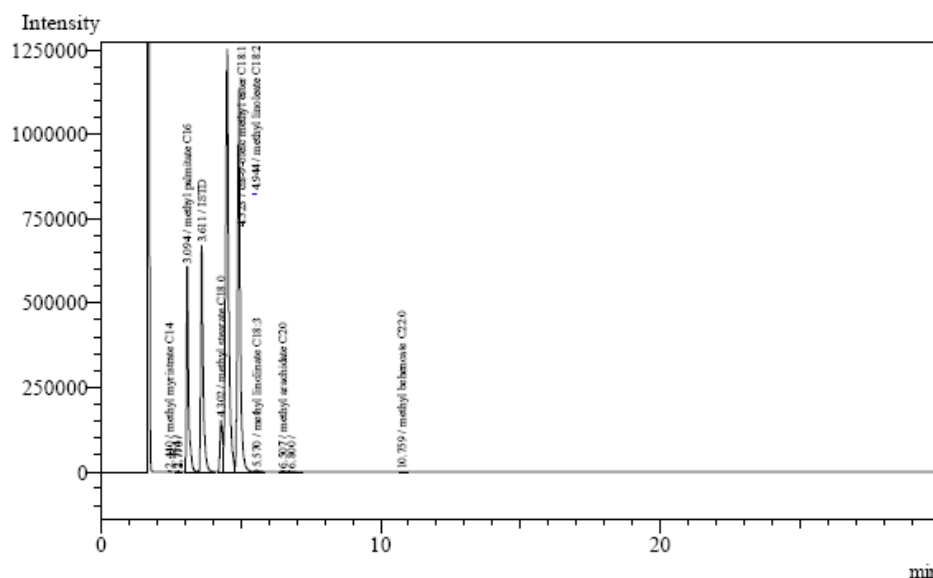
ภาพผนวกที่ จ20 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)



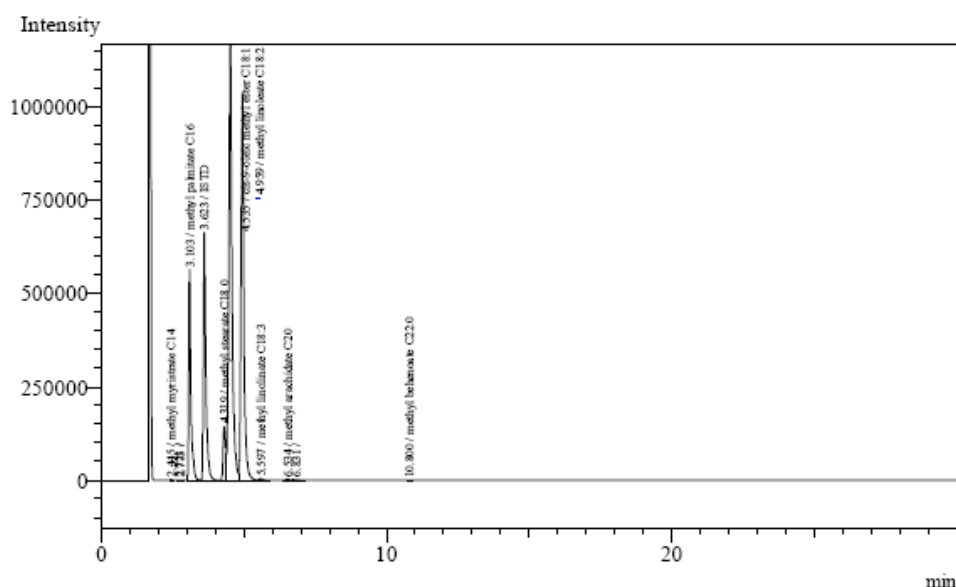
ภาพผนวกที่ ๑21 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)



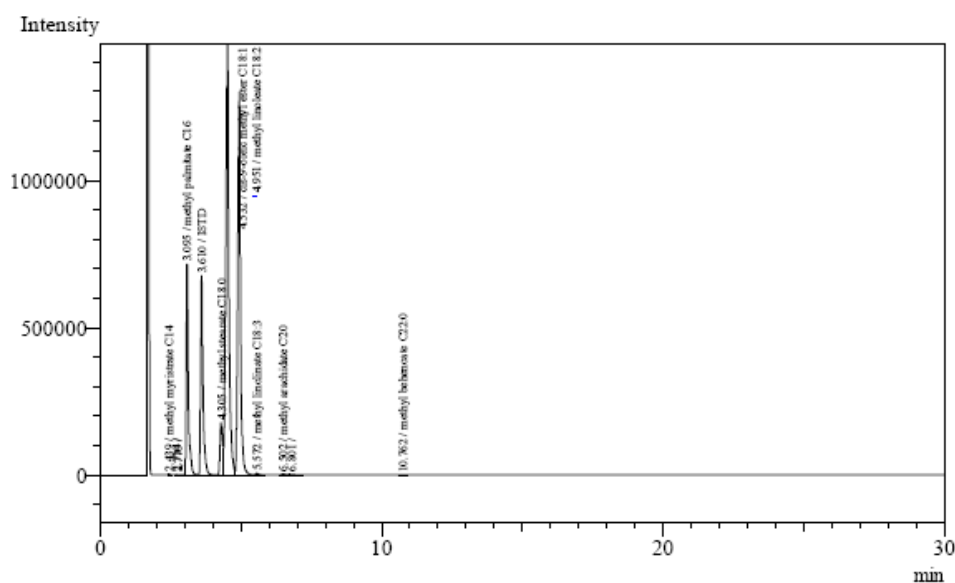
ภาพผนวกที่ ๑22 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)



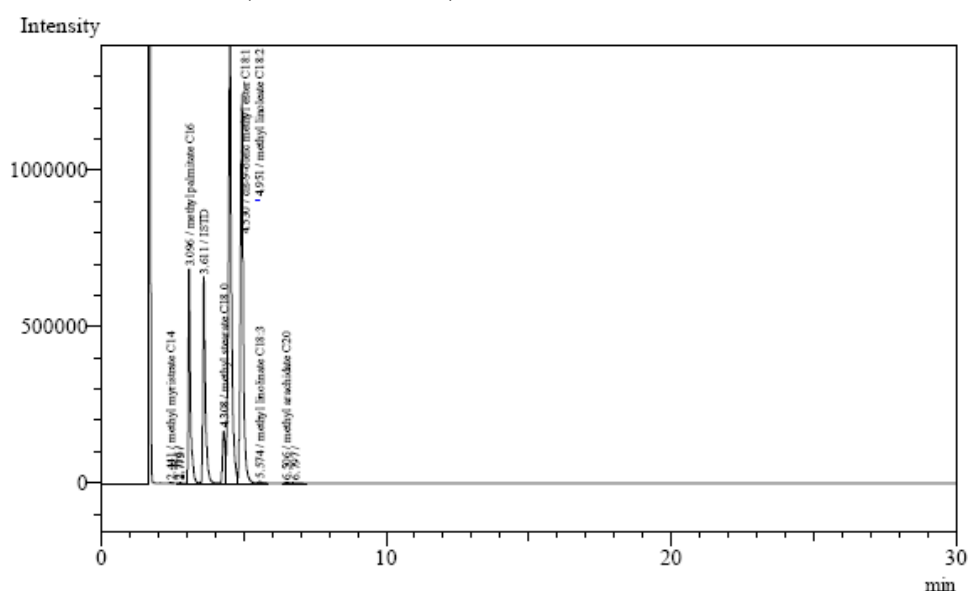
ภาพผนวกที่ จ23 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)



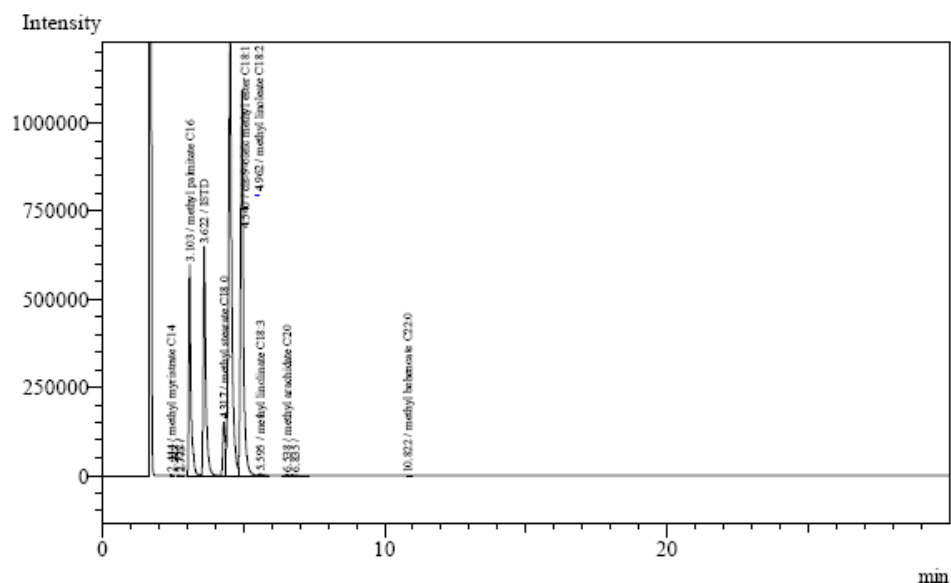
ภาพผนวกที่ จ24 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)



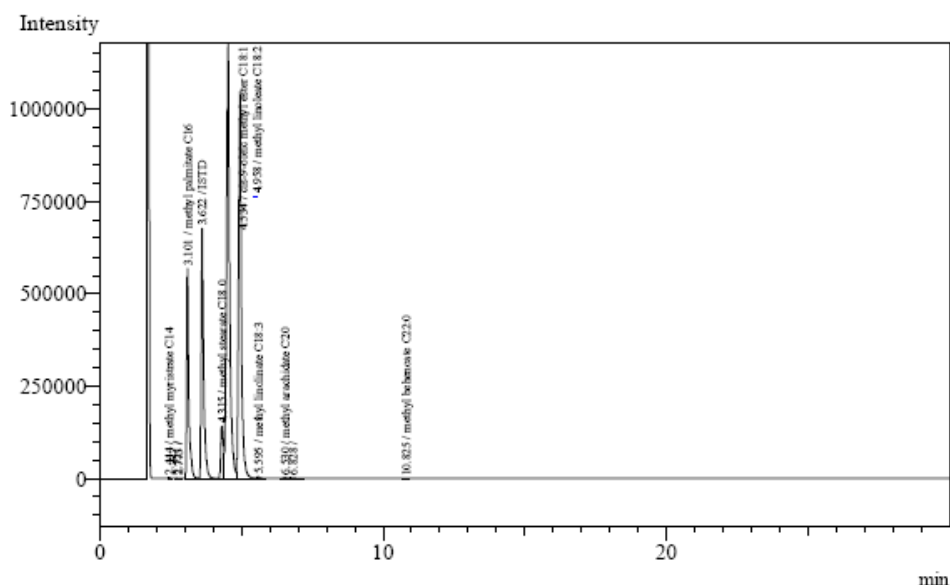
ภาพผนวกที่ จ25 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)



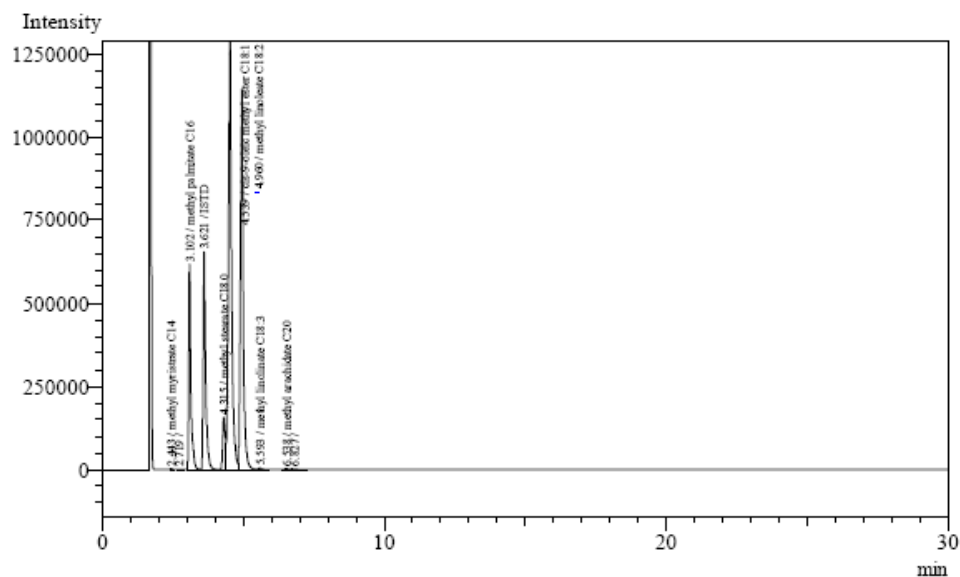
ภาพผนวกที่ จ26 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)



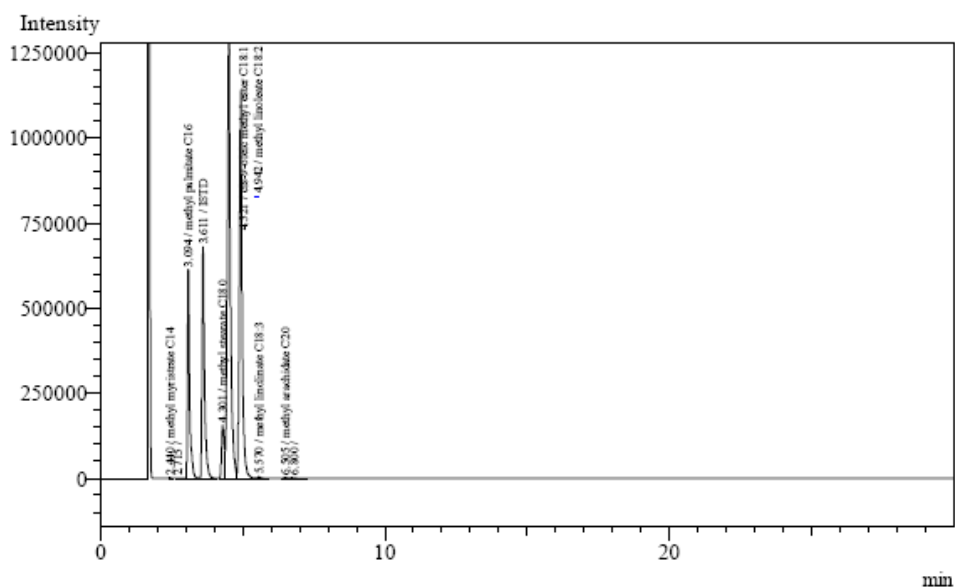
ภาพผนวกที่ จ27 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)



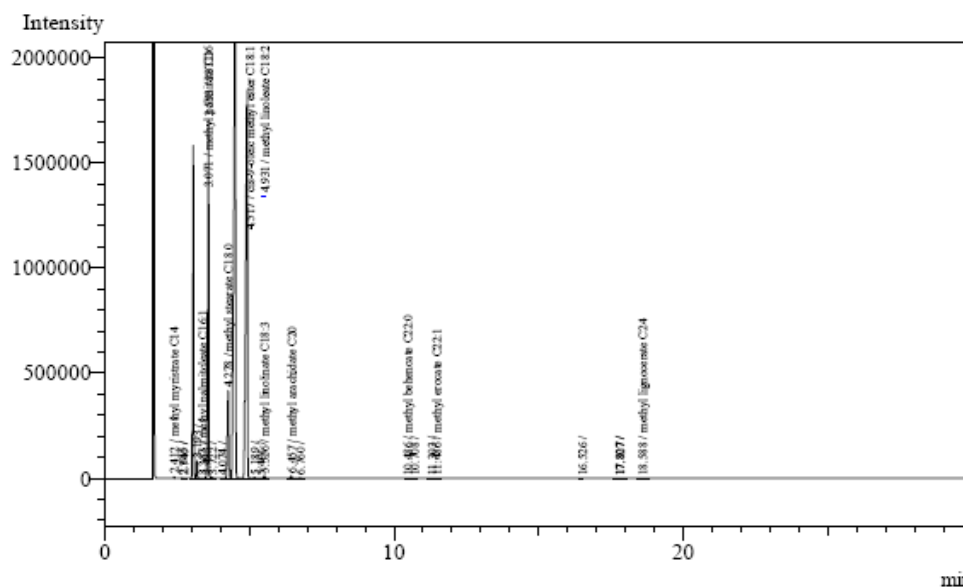
ภาพผนวกที่ จ28 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)



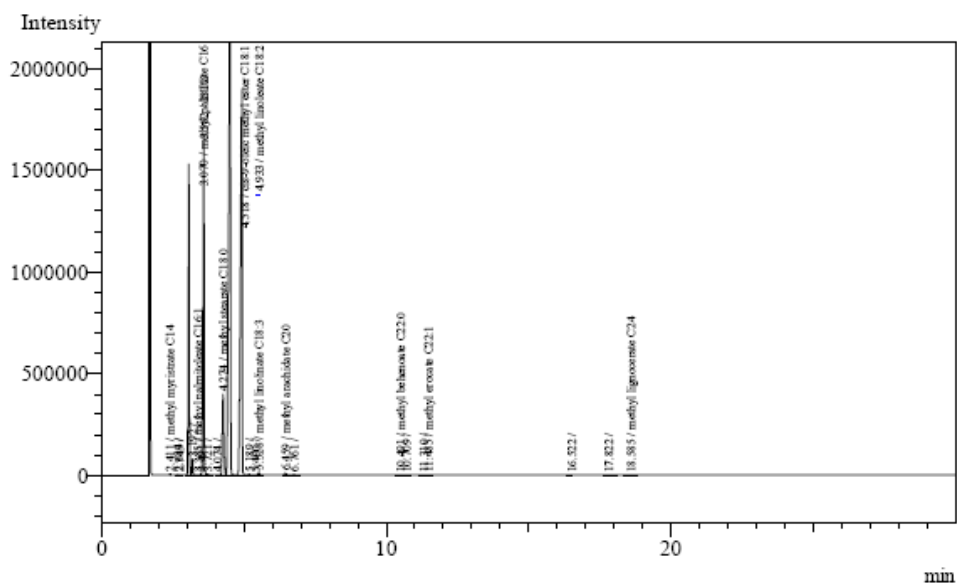
ภาพผนวกที่ จ29 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)



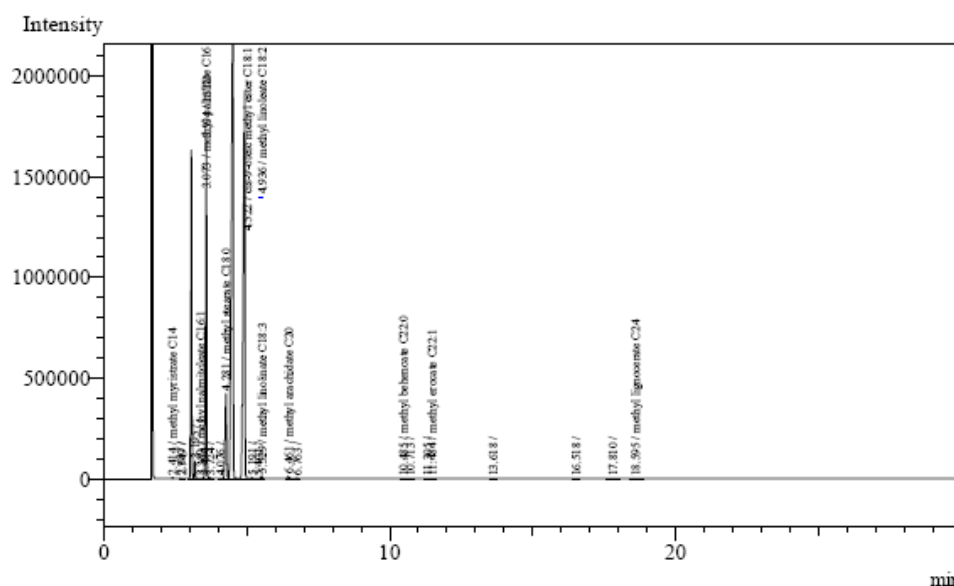
ภาพผนวกที่ จ30 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)



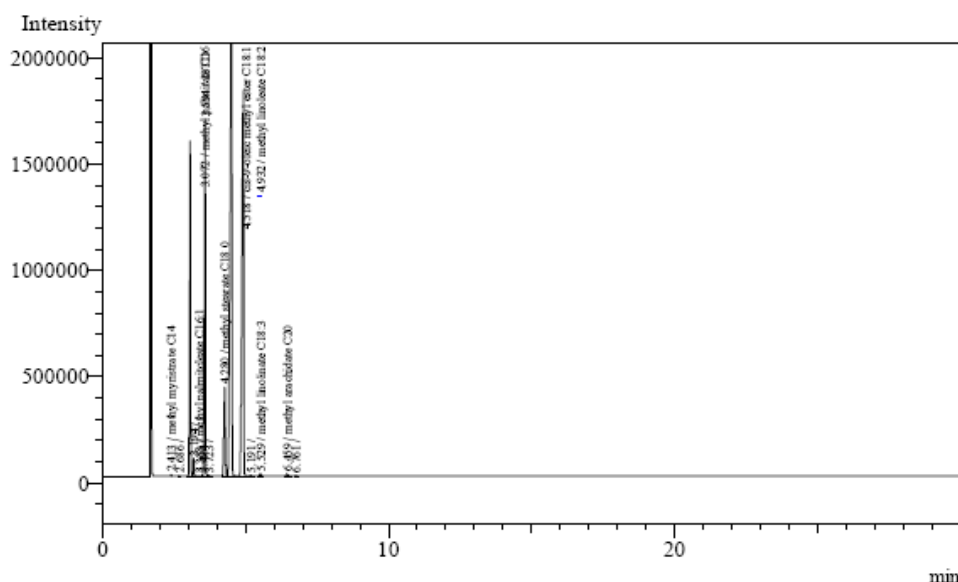
ภาพผนวกที่ จ31 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)



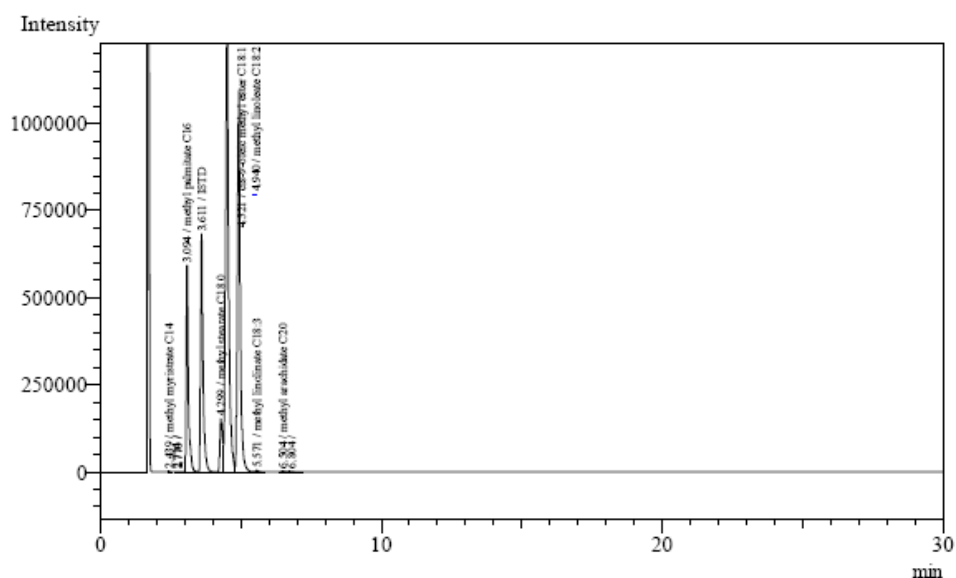
ภาพผนวกที่ จ32 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)



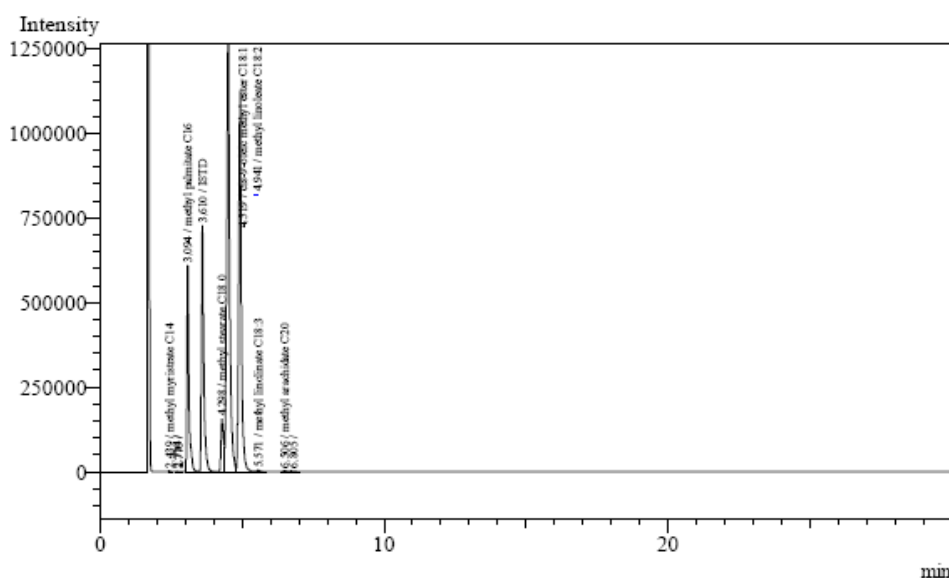
ภาพผนวกที่ จ33 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)



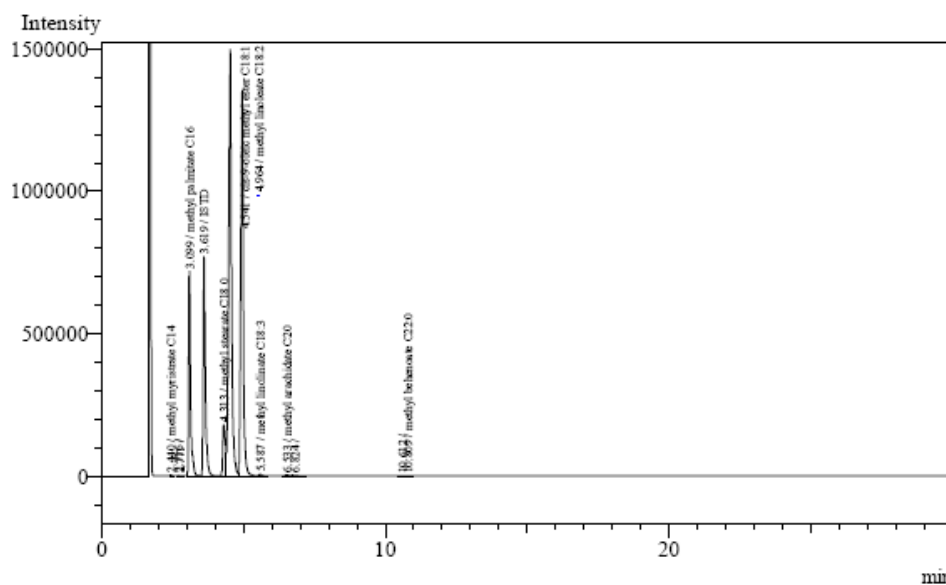
ภาพผนวกที่ จ34 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)



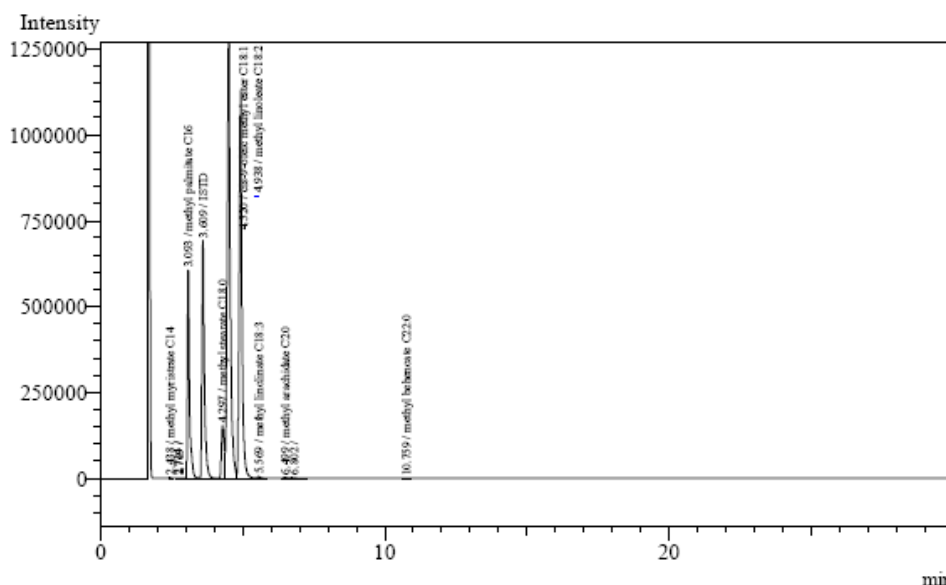
ภาพผนวกที่ จ37 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)



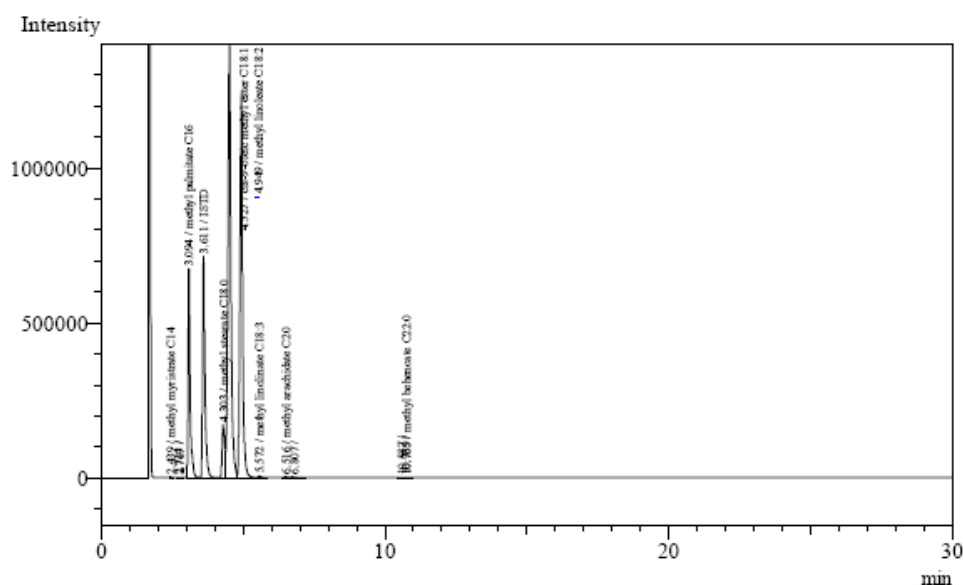
ภาพผนวกที่ จ38 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)



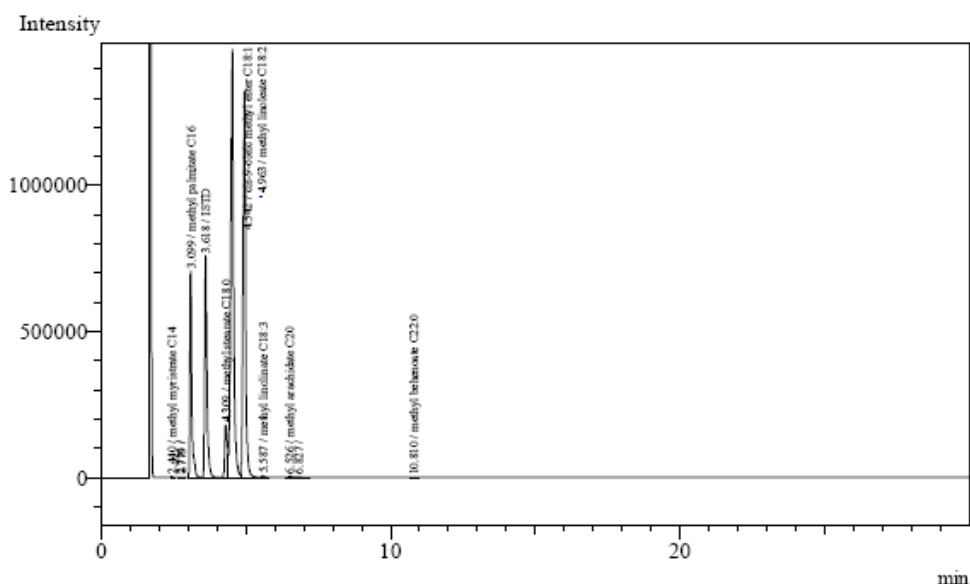
ภาพผนวกที่ จ39 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)



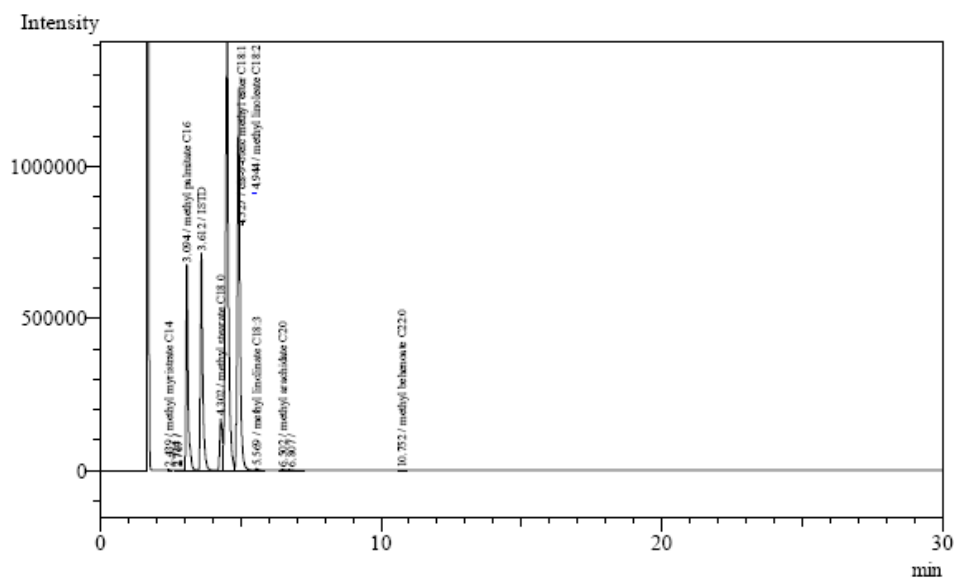
ภาพผนวกที่ จ40 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)



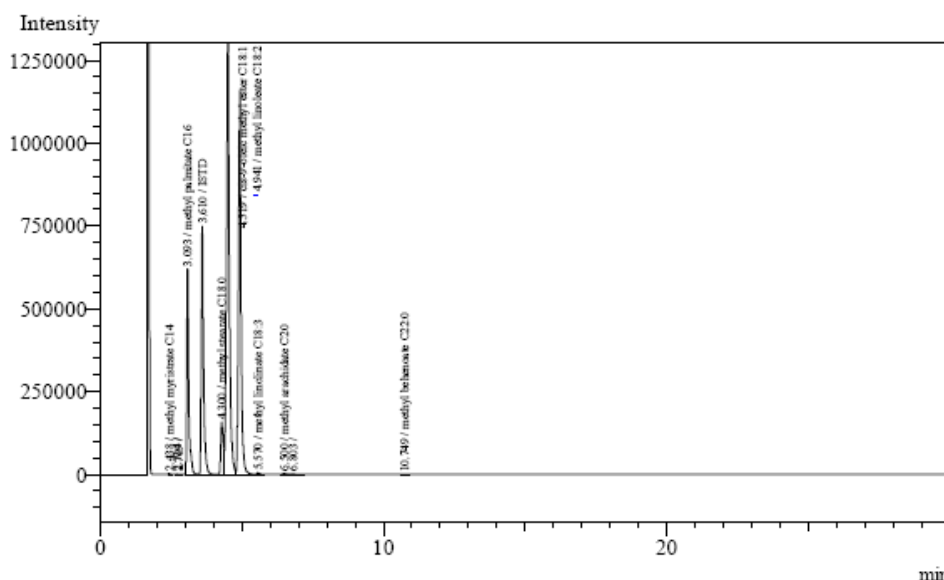
ภาพผนวกที่ จ41 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)



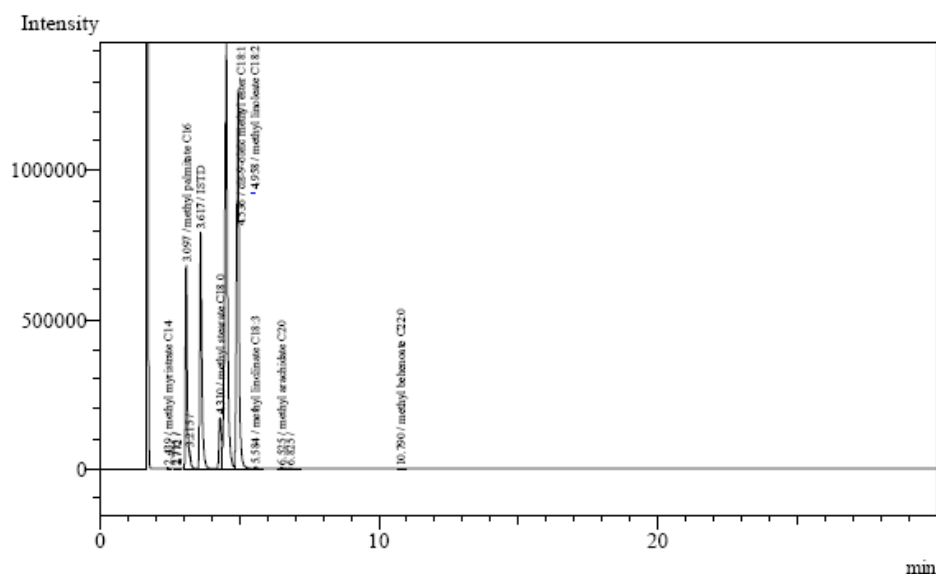
ภาพผนวกที่ จ42 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)



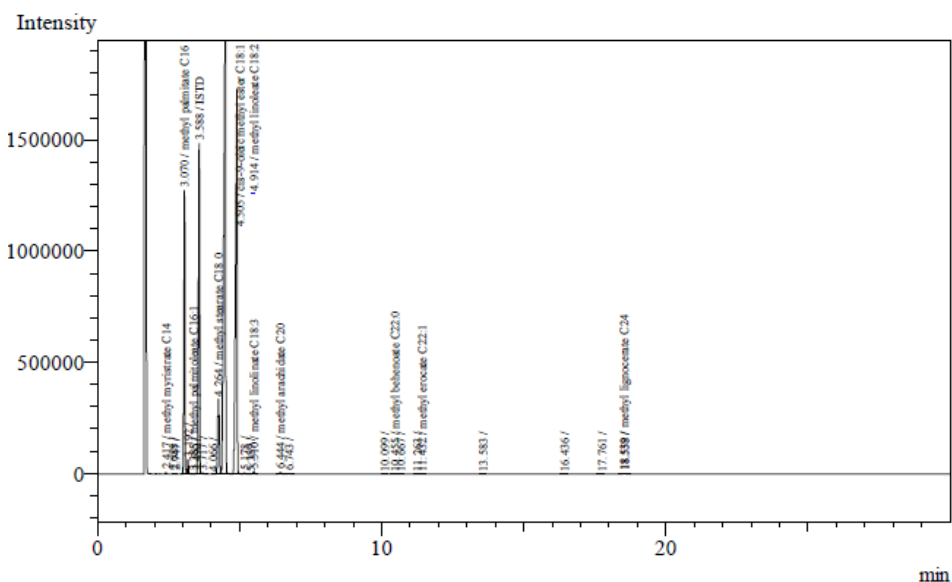
ภาพผนวกที่ จ43 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)



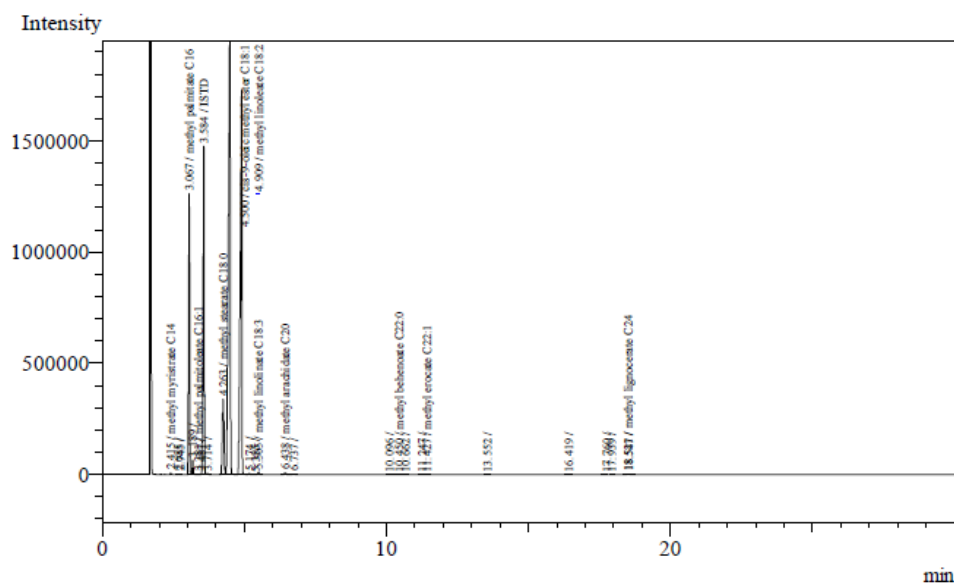
ภาพผนวกที่ จ44 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)



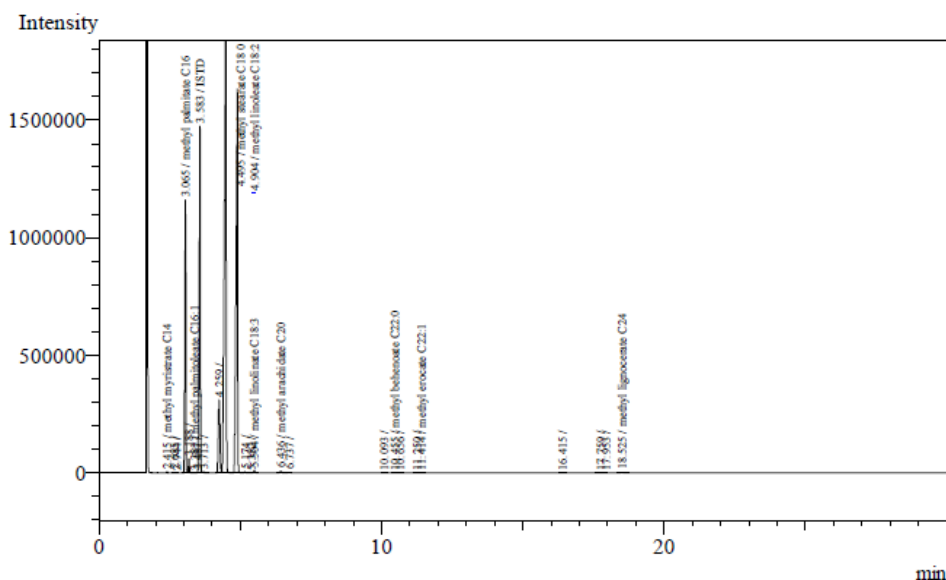
ภาพผนวกที่ จ45 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)



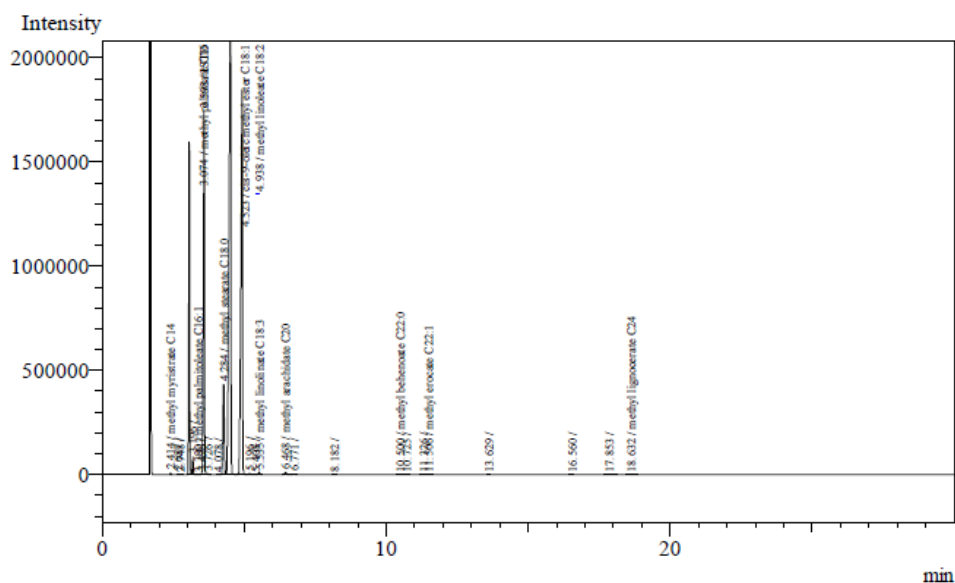
ภาพผนวกที่ จ46 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)



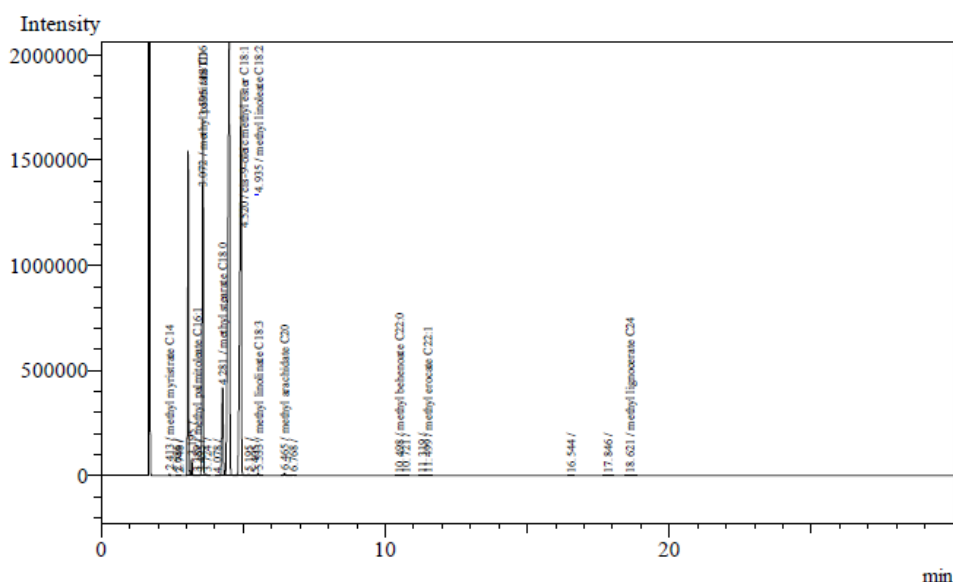
ภาพผนวกที่ จ47 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)



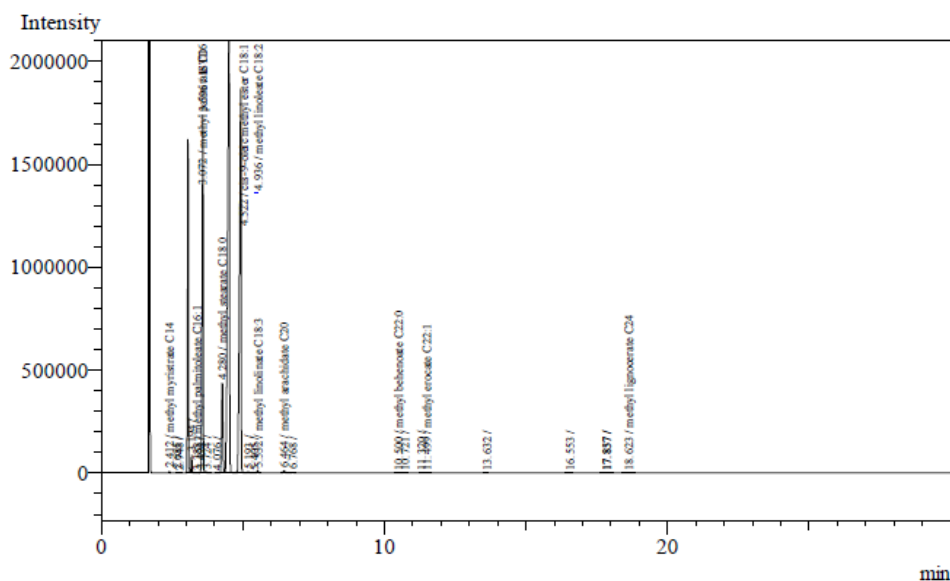
ภาพผนวกที่ จ48 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)



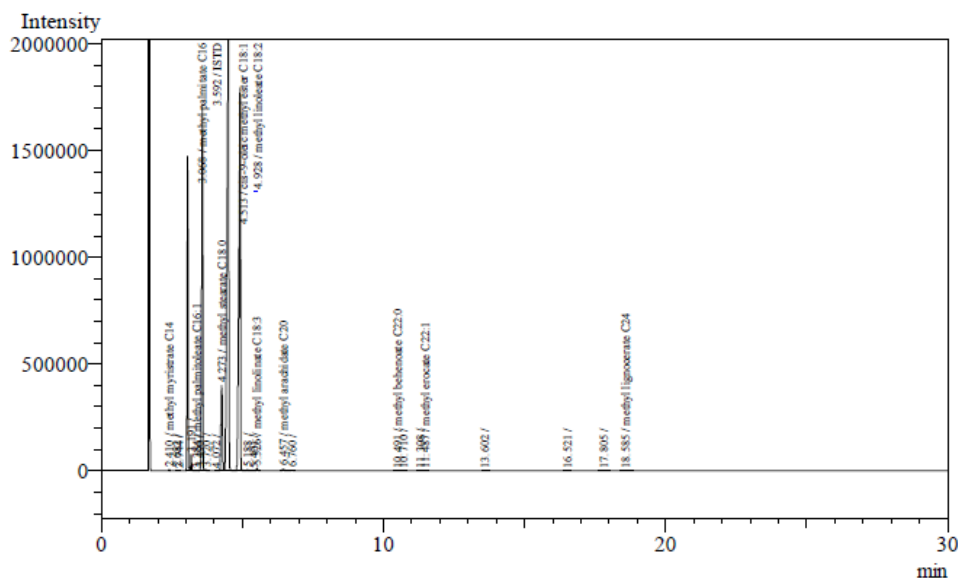
ภาพผนวกที่ จ49 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที อัตราการให้ความร้อน 320 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 1)



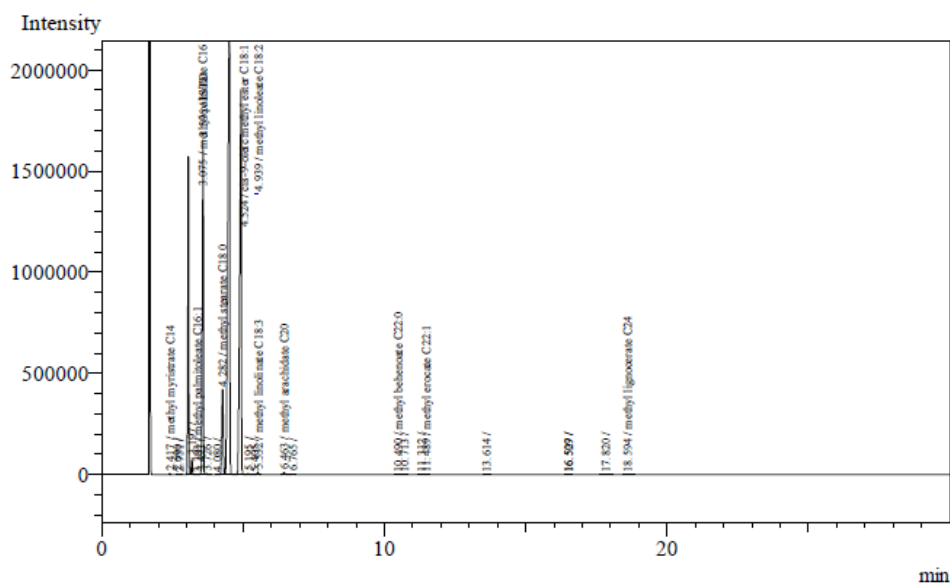
ภาพผนวกที่ จ50 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที อัตราการให้ความร้อน 320 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 2)



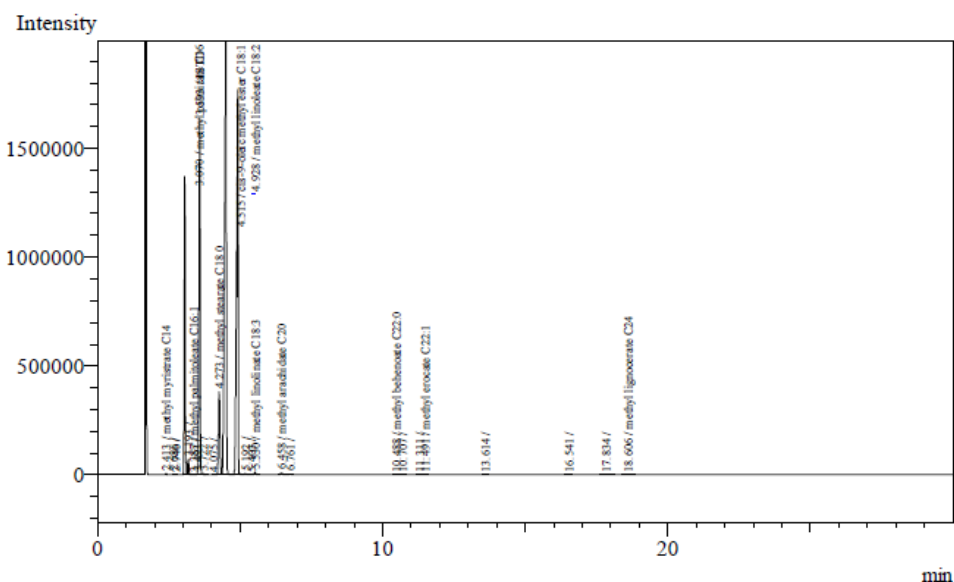
ภาพผนวกที่ จ51 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที อัตราการให้ความร้อน 320 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 3)



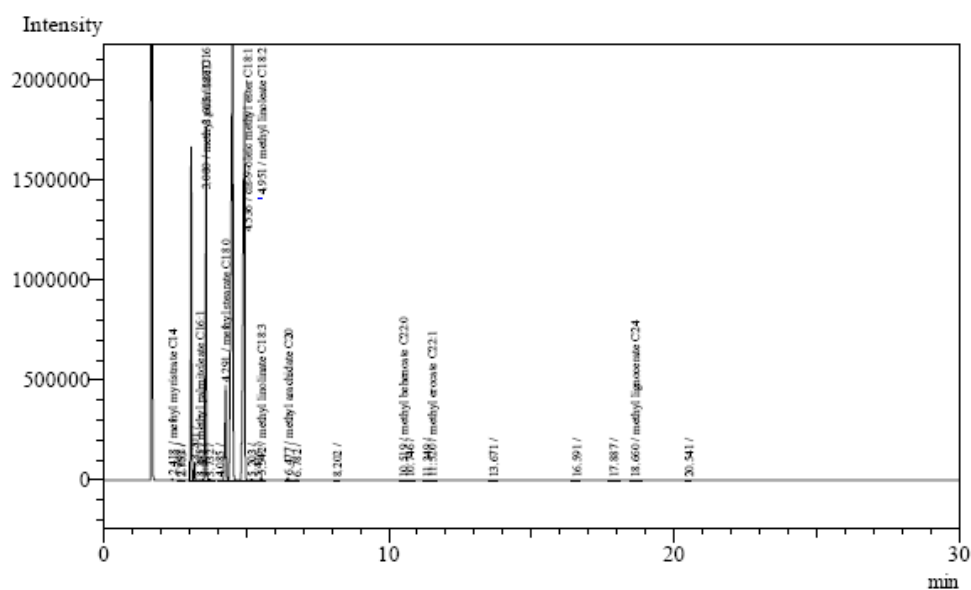
ภาพผนวกที่ จ52 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที อัตราการให้ความร้อน 360 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 1)



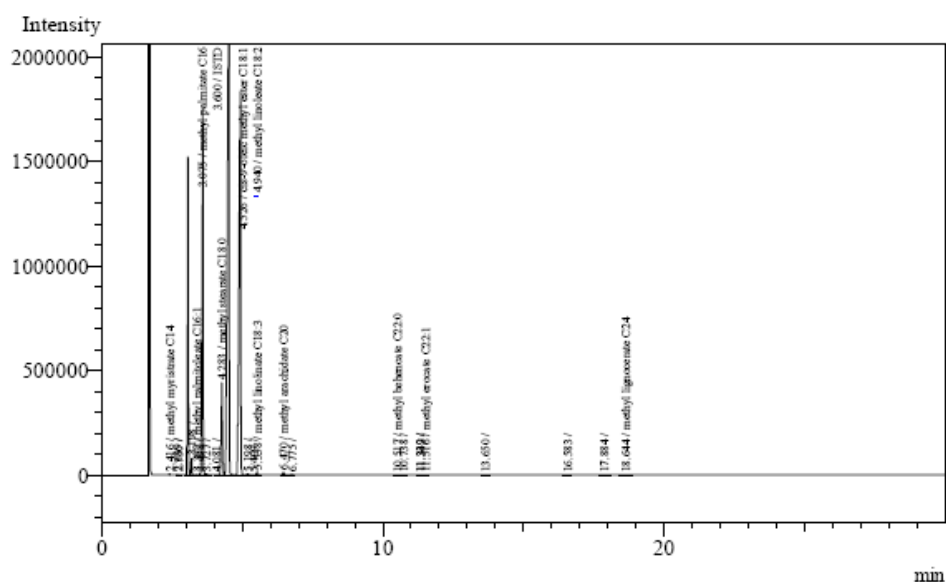
ภาพผนวกที่ จ53 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที่ อัตราการให้ความร้อน 360 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 2)



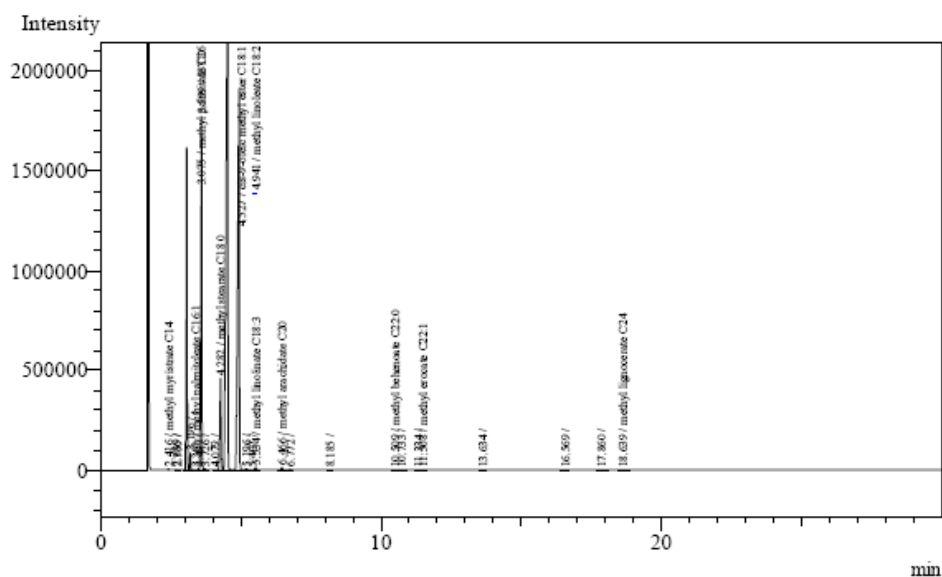
ภาพผนวกที่ จ54 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที่ อัตราการให้ความร้อน 360 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 3)



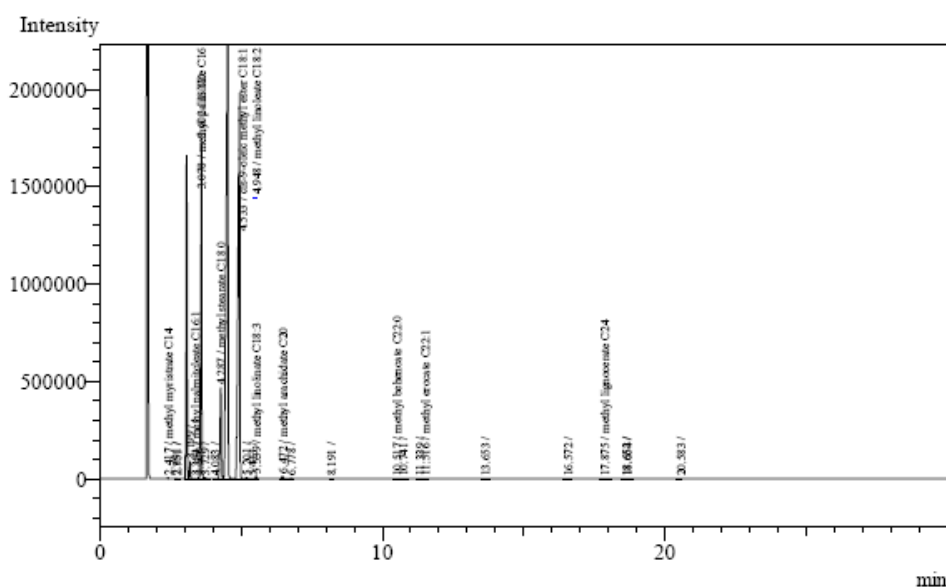
ภาพผนวกที่ จ55 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)



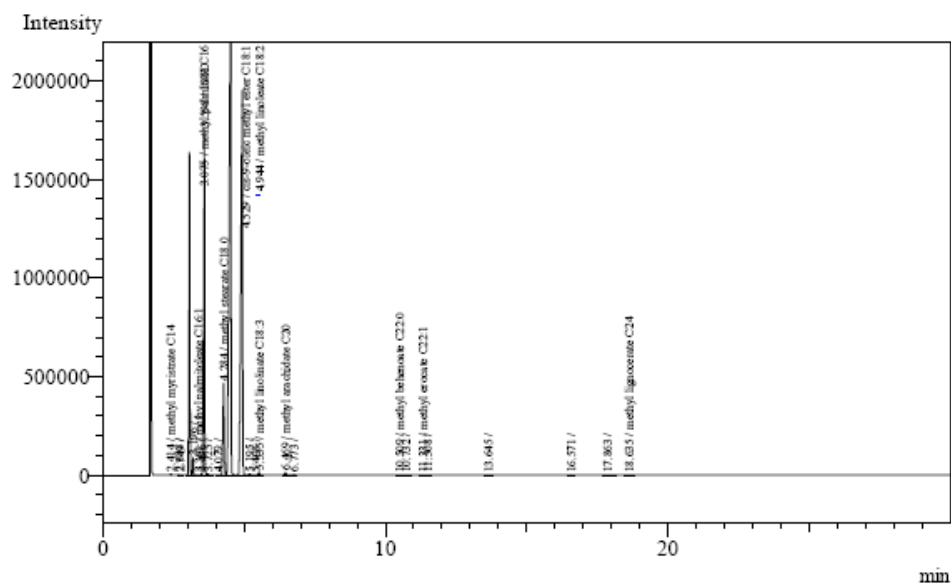
ภาพผนวกที่ จ56 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 2)



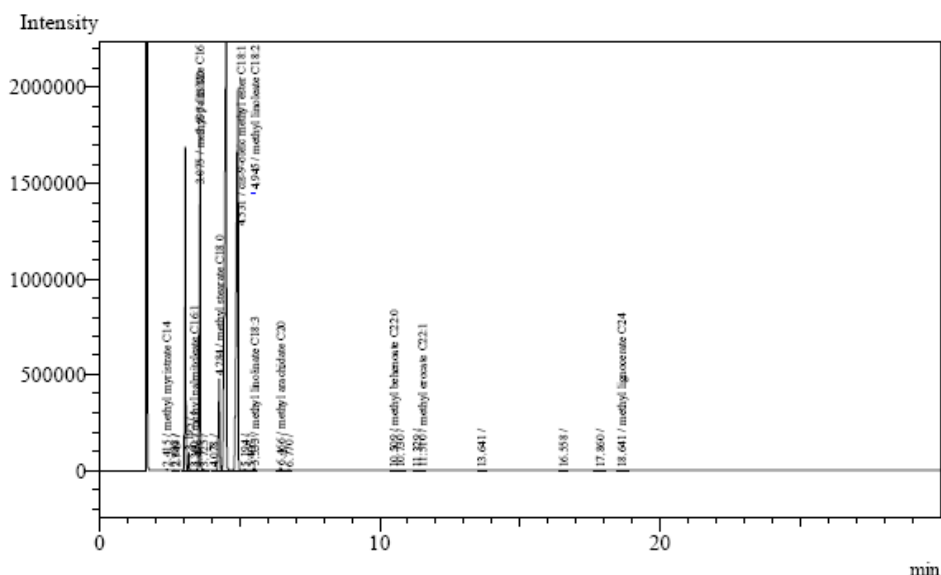
ภาพผนวกที่ จ57 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 90 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 3)



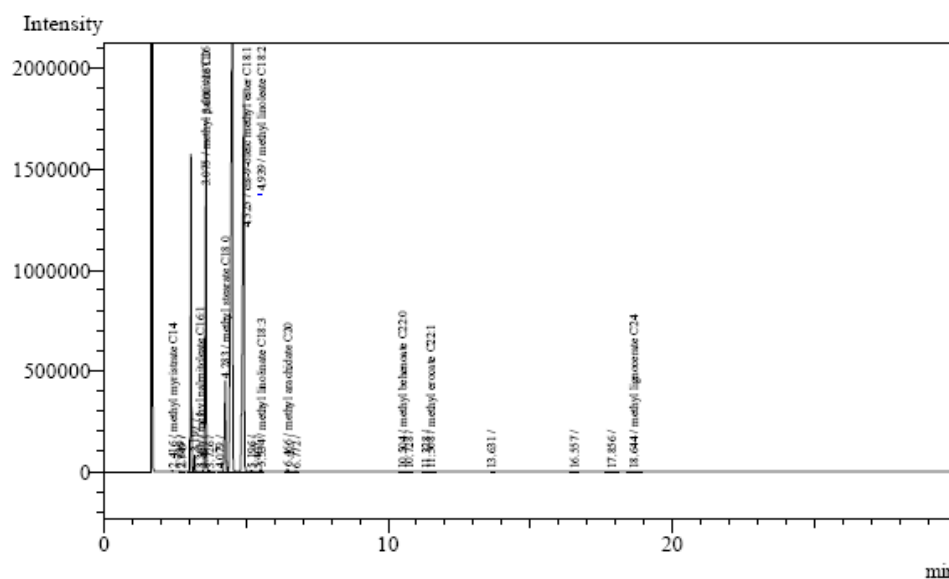
ภาพผนวกที่ จ58 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 320 วัตต์ (เข้าการทดลองที่ 1)



ภาพผนวกที่ ๖5 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 320 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 2)



ภาพผนวกที่ ๖6 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 320 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 3)



ภาพผนวกที่ จ63 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเข้มข้นของโซเดียมเมทอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 นาที อัตราการให้ความร้อน 360 วัตต์ (ซ้ำการทดลองที่ 3)

ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ต่างๆ

ตารางผนวก กที่ 1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์

การทดลองที่	ความเข้มข้น โซเดียมคลอไรด์ (%wt)	ความเข้มข้น โซเดียมเมทอกไซด์ (%wt)	อัตราส่วนโดย โมลระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมัน	เวลา (นาที)	อัตราการให้ ความร้อน (วัตต์)	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (เปอร์เซ็นต์)			
						ซ้ำการ ทดลองที่ 1	ซ้ำการ ทดลองที่ 2	ซ้ำการ ทดลองที่ 3	เฉลี่ย
1	0	1.3	7.5:1	4	90	94.72	84.19	95.09	94.67
2	10	1.3	7.5:1	4	90	94.89	94.79	94.94	94.87
3	20	1.3	7.5:1	4	90	98.97	97.59	97.56	98.04
4	30	1.3	7.5:1	4	90	98.10	97.71	98.50	98.10
5	20	0.5	7.5:1	4	90	71.51	64.66	70.46	68.88
6	20	1.0	7.5:1	4	90	99.65	97.17	95.14	97.32
7	20	1.5	7.5:1	4	90	100.00	100.00	99.91	99.97
8	20	1.5	6:1	4	90	96.43	97.41	98.89	97.58
9	20	1.5	7.5:1	4	90	100.00	100.00	99.72	99.91
10	20	1.5	9:1	4	90	99.91	100.00	100.00	99.97
11	20	1.5	7.5:1	1	90	96.85	94.72	93.84	95.14
12	20	1.5	7.5:1	2	90	97.32	98.82	97.72	97.95

ตารางผนวก นที่ 1 (ต่อ)

การทดลองที่	ความเข้มข้น โซเดียมคลอไรด์ (%wt)	ความเข้มข้น โซเดียมเมทอกไซด์ (%wt)	อัตราส่วนโดย โมลระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมัน	เวลา (นาที)	อัตราการให้ ความร้อน (วัตต์)	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (เปอร์เซ็นต์)			
						ซ้ำการ ทดลองที่ 1	ซ้ำการ ทดลองที่ 2	ซ้ำการ ทดลองที่ 3	เฉลี่ย
13	20	1.5	7.5:1	3	90	97.31	98.60	97.49	97.80
14	20	1.5	7.5:1	4	90	100.00	100.00	99.91	99.97
15	20	1.5	7.5:1	5	90	97.59	97.34	96.30	97.08
16	20	1.5	7.5:1	2	90	97.51	98.13	97.34	97.66
17	20	1.5	7.5:1	2	320	97.01	97.07	98.01	97.36
18	20	1.5	7.5:1	2	360	97.61	97.98	96.88	97.49
19	20	1.5	7.5:1	4	90	100.00	99.37	99.72	99.70
20	20	1.5	7.5:1	4	320	100.00	99.22	99.27	99.50
21	20	1.5	7.5:1	4	360	99.09	99.51	100.00	99.53

ตารางผนวก นที่ 2 ผลการวิเคราะห์ผลได้ของไบโอดีเซล

การทดลองที่	ความเข้มข้น โซเดียมคลอ ไรด์ (%wt)	ความเข้มข้น โซเดียมเม ทอกไซด์ (%wt)	อัตราส่วนโดย โมลระหว่างเม ทานอลต่อ น้ำมัน	เวลา (นาที)	อัตราการให้ ความร้อน (วัตต์)	ผลได้ของไบโอดีเซล (เปอร์เซ็นต์)			
						ซ้ำการ ทดลองที่ 1	ซ้ำการ ทดลองที่ 2	ซ้ำการ ทดลองที่ 3	เฉลี่ย
1	0	1.3	7.5:1	4	90	85.20	84.80	84.12	84.71
2	10	1.3	7.5:1	4	90	84.31	84.35	85.52	84.73
3	20	1.3	7.5:1	4	90	89.60	89.10	89.24	89.31
4	30	1.3	7.5:1	4	90	90.08	88.64	89.2	89.32
5	20	0.5	7.5:1	4	90	81.94	78.98	76.90	79.28
6	20	1.0	7.5:1	4	90	91.08	88.88	87.96	89.31
7	20	1.5	7.5:1	4	90	89.18	88.84	89.74	89.26
8	20	1.5	6:1	4	90	85.11	84.75	84.56	84.81
9	20	1.5	7.5:1	4	90	86.14	87.36	87.95	87.15
10	20	1.5	9:1	4	90	86.84	89.13	87.98	87.98
11	20	1.5	7.5:1	1	90	85.30	84.96	83.82	84.70
12	20	1.5	7.5:1	2	90	89.10	89.64	89.24	89.33

ตารางผนวก ๓ ที่ 2 (ต่อ)

การทดลองที่	ความเข้มข้น โซเดียมคลอไรด์ (%wt)	ความเข้มข้น โซเดียมเมทอกไซด์ (%wt)	อัตราส่วนโดย โมลระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมัน	เวลา (นาที)	อัตราการให้ ความร้อน (วัตต์)	ผลได้ของไบโอดีเซล (เปอร์เซ็นต์)			
						ซ้ำการ ทดลองที่ 1	ซ้ำการ ทดลองที่ 2	ซ้ำการ ทดลองที่ 3	เฉลี่ย
13	20	1.5	7.5:1	3	90	88.32	88.28	89.89	88.82
14	20	1.5	7.5:1	4	90	89.67	88.44	89.97	89.36
15	20	1.5	7.5:1	5	90	89.89	89.13	85.70	88.24
16	20	1.5	7.5:1	2	90	89.56	89.64	89.72	89.64
17	20	1.5	7.5:1	2	320	89.71	88.93	89.82	89.82
18	20	1.5	7.5:1	2	360	89.08	89.03	89.52	89.21
19	20	1.5	7.5:1	4	90	89.10	89.64	89.24	89.33
20	20	1.5	7.5:1	4	320	89.82	88.70	89.64	89.39
21	20	1.5	7.5:1	4	360	89.80	89.62	89.90	89.39

ตารางผนวก จที่ 3 ปริมาณน้ำในน้ำมันสบูดำที่ผ่านการดูดซับน้ำด้วยโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น เป็น 0 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Karl Fischer Coulometer

ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมัน)	ปริมาณน้ำในน้ำมันสบูดำ (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักน้ำมัน)
0	1.0856
10	1.0534
20	0.8945
30	0.8902

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวพนีย์ แซ่อ่อง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 14 ธันวาคม 2525
สถานที่เกิด	สุราษฎร์ธานี
ประวัติการศึกษา	ระดับอุดมศึกษา วท.บ. (เทคโนโลยีชีวภาพ) สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2549)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตและวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยประเภทวิทยานิพนธ์ ปีการศึกษา 2551 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์