



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โพแทสเซียมไนเตรท/
ฟอจาไซต์

Synthesis of Biodiesel from Jatropha Oil using Catalyst KNO_3 /Faujasite

นามผู้วิจัย นายอำนาจ คำหล้า

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ไพศาล คงกาญจนาย, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กานติส สุดสาคร, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑล ฐานุดตมวงศ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ไพศาล คงกาญจนาย, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โพแทสเซียมไนเตรท/ฟอจาไซต์

Synthesis of Biodiesel from Jatropha Oil using Catalyst KNO_3 /Faujasite

โดย

นายอำนาจ คำหล้า

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2551

อำนาจ คำหล้า 2551: การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
โพแทสเซียมไนเตรท/ฟอจาไซต์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ประชานกรรมการที่ปรึกษา:
รองศาสตราจารย์ไพศาล คงกาญจนาย, Ph.D. 123 หน้า

ทำการสังเคราะห์ไบโอดีเซล ด้วยการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมัน
สบู่ดำกับเมทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เตรียมจาก 20, 25, 30, 35 wt% KNO_3 ด้วยเทคนิคการ
ฝังตัวแบบแห้ง ทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (batch reactor) ที่มีชุดรีฟลักซ์ช่วยควบแน่นไอ
ของเมทานอล จากผลการศึกษาด้วยโปรแกรมออกแบบการทดลอง พบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการ
เกิดเมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ ชนิดของตัวเร่ง ปริมาณตัวเร่ง และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันสบู่ดำที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา เมื่อทดลองสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยการแปรค่าปัจจัย
หลักทั้ง 3 ปัจจัย พบว่า สภาพการทดลองที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล คือ การ
ใช้ตัวเร่งที่เตรียมจาก 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ด้วยปริมาณการใช้ 9% โดยน้ำหนัก ใช้เมทานอล
ตั้งต้น 30 เท่าของน้ำมันสบู่ดำ ทำปฏิกิริยาที่ 64.7 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พร้อมการ
กวนด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาที น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 90% มีความ
หนาแน่น 0.89 กรัม/ลบ.ซม. ความหนืด 6.1 เซนติสโตกส์ และจุดวาบไฟ 176 องศาเซลเซียส

Umnart Khamlar 2008: Synthesis of Biodiesel from Jatropha Oil using Catalyst KNO_3 /Faujasite. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Paisan Kongkachuichay, Ph.D. 123 pages.

Methyl ester (biodiesel) was synthesized by transesterification of *Jatropha curcus Linn.* oil with methanol using catalysts having 20, 25, 30, 35 wt% KNO_3 . The catalysts were prepared by a dry impregnation technique. The reactions were carried out in a batch reactor that equipped with a reflux set for methanol recovery. The result from the design of experiment showed that the main factors that affected the yield of methyl ester were type of catalyst, amount of catalyst used, and molar ratio of methanol to oil. After conducting several experiments by varying those factors, it was found that the maximum yield of methyl ester of 90% was obtained by using 20 wt% KNO_3 /Faujasite with the following condition: molar ratio of methanol to of 30, 9 wt% of catalyst used, reaction temperature of 64.7°C for 8 h with stirring of 600 rpm. Furthermore, the obtained product has the density of 0.89 g/cm^3 , the viscosity of $6.1\text{ mm}^2/\text{s}$ and the flash point of 176°C

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จได้ ด้วยความช่วยเหลือและความกรุณาจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ไพศาล คงคาอุบลาย ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาชี้แนะ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.กานติส สุธาสคร กรรมการวิชาเอก ผศ.ดร.มณฑล ฐานุตตมวงศ์ กรรมการวิชาการ และ รศ.ดร.บุญส่ง คงคาทิพย์ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลาในการตรวจแก้ไข และให้คำชี้แนะเพิ่มเติมในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณโครงการศูนย์ไปโอดีเซลและบริษัทโตโยต้าที่ได้ให้การสนับสนุนทุนทรัพย์ในการทำวิจัยจนเสร็จสิ้นโครงการ

ขอขอบคุณพระคุณเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่เป็นธุระในการประสานงานต่างๆ ให้สำเร็จลุล่วง

ท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ นายบุญโฮม คำหล่า นางอำนวย คำหล่า ครอบครัวคำหล่า รวมทั้งขอขอบคุณนิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือให้กำลังใจรวมถึงคำชี้แนะ และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้

อำนจ คำหล่า

ตุลาคม 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	53
อุปกรณ์	53
วิธีการทดลอง	55
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	59
สรุปผลการทดลอง	70
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	72
ภาคผนวก	79
ภาคผนวก ก การเตรียมสารตั้งต้น	80
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ค่า Fatty Acid Methyl Ester ในไบโอดีเซล โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	82
ภาคผนวก ค โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม	86
ภาคผนวก ง ข้อมูลจากการวิเคราะห์รูปแบบ XRD	116
ภาคผนวก จ ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่ BET	120

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 คุณสมบัติและองค์ประกอบกรดไขมันหลักของน้ำมันพืชต่างๆ	8
2 คุณสมบัติของไบโอดีเซล	9
3 ผลกระทบของน้ำต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	20
4 คุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำเปรียบเทียบกับมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วของไทย (ปี พ.ศ. 2523)	31
5 คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ ของน้ำมันสบู่ดำ	32
6 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันสบู่ดำ	33
7 เปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำกับมาตรฐานน้ำมันดีเซลหมุนเร็วของ ประเทศญี่ปุ่นและประเทศไทย	34
8 คุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำ	54
9 สภาพที่ใช้การทดลองสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (transesterification) ของน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำกับเมทานอล	58
10 พื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET ของตัวเร่งปฏิกิริยา	60
11 ผลการทดลองจากสถานะที่ทำการออกแบบการทดลอง	62
12 คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้	69
ตารางผนวกที่	
ข1 การวิเคราะห์ผลจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) จากโครมาโทแกรม และ พื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม	84

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 กลไกการแตกสลายด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์	12
2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์	13
3 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแต่ละขั้นตอนจนได้กลีเซอรอลและเอสเทอร์	13
4 ปฏิกิริยาสaponifiเคชันของกรดไขมัน	15
5 ปฏิกิริยาของเมทิลเอสเทอร์กับน้ำที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระ	15
6 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ	16
7 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันไตรโกลีน (triolein) ต่อร้อยละการแปลงผันของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	21
8 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการแปลงผันของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	22
9 ผลและเมล็ดสบู่ดำ	29
10 ขั้นตอนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังวิธีการตกตะกอน	40
11 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังวิธีการทำให้จุ่มชุ่ม	42
12 โครงสร้างซิลิกา-อะลูมินาที่ทำให้เกิด Bronsted acid และ Lewis acid	44
13 เครื่องแก้วและชุดอุปกรณ์แบบกะ	53
14 รูปแบบ XRD ของ ตัวเร่ง % KNO_3 /Faujasite เทียบกับ Faujasite	59
15 ผลของปัจจัยหลักที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์	63
16 ผลกระทบระหว่างปัจจัยใดๆที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์	63
17 ผลของปริมาณตัวเร่งชนิด 20, 25, 30, 35 wt% KNO_3 /Faujasite เป็น 8 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 6 ต่อ 1	64
18 ผลของปริมาณตัวเร่งชนิด 20, 25, 30, 35 wt% KNO_3 /Faujasite เป็น 8 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 21 ต่อ 1	64
19 ผลของปริมาณตัวเร่งที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 20 wt% KNO_3 /Faujasite อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 6 ต่อ 1 และ 21 ต่อ 1	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ผลของปริมาณตัวเร่งที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 25 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสนุ่ดำเท่ากับ 6 ต่อ 1 และ 21 ต่อ 1	65
21	ผลของปริมาณตัวเร่งที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 30 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสนุ่ดำเท่ากับ 6 ต่อ 1 และ 21 ต่อ 1	66
22	ผลของปริมาณตัวเร่งที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 35 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสนุ่ดำเท่ากับ 6 ต่อ 1 และ 21 ต่อ 1	66
23	ผลของปริมาณตัวเร่งที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสนุ่ดำเท่ากับ 21 ต่อ 1	68
24	ผลของปริมาณตัวเร่งที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสนุ่ดำเท่ากับ 30 ต่อ 1	69

ภาพผนวกที่

ค1	โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt % $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักสนุ่ดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสนุ่ดำต่อ เมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 6 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง	87
ค2	โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt % $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักสนุ่ดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสนุ่ดำต่อ เมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 6 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง	88
ค3	โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt % $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 8 ของน้ำหนักสนุ่ดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสนุ่ดำต่อ เมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 6 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง	89
ค4	โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt % $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักสนุ่ดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสนุ่ดำต่อ เมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

[illegible]

สารบัญภาพ (ต่อ)

[illegible]

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค23 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 35 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง	109
ค24 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 35 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 8 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง	110
ค25 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง	111
ค26 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 12 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง	112
ค27 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 8 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 31 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง	113
ค28 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 9 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 31 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง	114
ค29 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 31 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง	115
ง1 XRD pattern ของ Faujasite	117
ง2 XRD pattern ของ 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$	117
ง3 XRD pattern ของ 25 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$	118
ง4 XRD pattern ของ 30 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$	118
ง5 XRD pattern ของ 35 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$	119
จ1 ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของ 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$	121

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
จ2	ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของ 25 wt% KNO ₃ /Faujasite	121
จ3	ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของ 30 wt% KNO ₃ /Faujasite	122
จ4	ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของ 35 wt% KNO ₃ /Faujasite	122

การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันสุปุดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โพแทสเซียมไนเตรท/ ฟอจาไซต์

Synthesis of Biodiesel from Jatropha Oil using Catalyst KNO_3 /Faujasite

คำนำ

ตามที่มีการคาดการณ์ล่วงหน้าว่าน้ำมันปิโตรเลียม จะหมดจากโลกในอีก 40 ปีข้างหน้า (ไพบูลย์, 2547) ซึ่งโลกใช้น้ำมันปิโตรเลียมในการให้พลังงานในรูปแบบต่างๆ ปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปี เพราะมนุษย์คุ้นเคยกับความสะดวกสบายจึงเกิดความวิตกกังวลว่าน้ำมันจะหมดโลก จากสถานการณ์ในปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณมาก โดยเฉพาะน้ำมันดีเซลใช้มากถึง 43 ล้านลิตรต่อวัน คิดเป็น 46.6 เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันที่ใช้ภายในประเทศ มีสัดส่วนการใช้สูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ราคาน้ำมันก็มีการปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งความต้องการเสริมสร้างความมั่นคงในด้านพลังงานของประเทศ รวมถึงความต้องการลดมลพิษ เพื่อให้สิ่งแวดล้อมดีขึ้น ทำให้มีผู้คิดค้นหาพลังงานทดแทนในหลากหลายวิธีการเพื่อให้กิจกรรมต่างๆ ดำเนินต่อไปได้ การแสวงหาและพัฒนาพลังงานใหม่ที่มีความยั่งยืนเป็นพลังงานที่มีอยู่ในท้องถิ่นนั้นๆ เพื่อทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม น้ำมันพืชและแอลกอฮอล์ที่ผลิตจากพืช จึงเป็นตัวเลือกในอันดับแรกๆ ทำให้หลายหน่วยงานได้ทำการวิจัยและพัฒนาวัตถุดิบภายในประเทศ เช่น น้ำมันพืชต่างๆ น้ำมันพืชใช้แล้ว ฯลฯ มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใช้แทนน้ำมันดีเซล เรียกว่า “ไบโอดีเซล” (Fatty acid methyl ester)

ไบโอดีเซลเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันพืชชนิดต่างๆ หรือน้ำมันสัตว์มาสกัดเอาไขมันและสิ่งสกปรกออก (degumming) จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (transesterification) โดยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอลหรือ เมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันจากไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) เป็นอัลคิลเอสเทอร์ (alkyl esters) หรือไบโอดีเซล และได้กลีเซอรอล (glycerol) เป็นผลพลอยได้ ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง ฯลฯ (Mether *et al.*, 2004) วัตถุประสงค์ของกระบวนการ ดังกล่าวคือ ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันในเรื่องความหนืดให้เหมาะสมกับการใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซล และเพิ่มค่าซีเทน (cetane number) โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

นี้สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทั้งแบบกรดและด่าง ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และไฮโดรคลอริก (HCl) ในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดมีข้อดีคือ เป็นตัวเร่งที่มีราคาถูก และสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) เพราะสามารถเปลี่ยนกรดไขมันอิสระในน้ำมันให้เป็นเอสเทอร์ได้ แต่ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันคือ น้ำ ซึ่งน้ำทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดลดลงอย่างมาก ทำให้เอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันลดลง (Kusdiana and Saka, 2004) สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เร็ว แต่มีข้อจำกัดคือทำให้ระบบมีความไวต่อน้ำและกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมัน โดยทำให้เกิดสบู่ของเอสเทอร์และลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลง ปัญหาสำคัญอีกประการหนึ่งคือการแยกกลีเซอรอลออกจากเอสเทอร์ทำได้ยาก (Ma and Hanna, 1999) แนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาคือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalyst) ทดแทนตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ (homogeneous catalyst) เพราะว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ มีข้อดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ตรงที่สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้ง่าย สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Jitputti *et al.*, 2004)

ในปัจจุบันหลายประเทศได้มีการวิจัยใช้ประโยชน์ของสับดูดำกันมาก เมล็ดมีน้ำมันมากโดยน้ำมันที่ได้นี้สามารถนำมาใช้แทนน้ำมันก๊าด และน้ำมันดีเซล งานวิจัยนี้ศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด $\text{K}_2\text{O}/\text{Faujasite}$ ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน (20, 25, 30, 35 %wt $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$) มาใช้เร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันจากเมล็ดสับดูดำเปรียบเทียบกับสภาวะเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน โดยคาดหวังว่าจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันไบโอดีเซลปริมาณสูง

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาหาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันสบู่ดำกับเมทานอล โดยใช้โปรแกรมการออกแบบการทดลองช่วยในการวิเคราะห์ผล
2. ศึกษาหาสภาวะที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันสบู่ดำกับเมทานอล โดยการแปรปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดไบโอดีเซล

ขอบเขตงานวิจัย

1. ใช้ KNO_3 เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมตัวเร่ง $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ โดยใช้เทคนิค Dry Impregnation
2. ทำปฏิกิริยาแบบเบทช์ที่อุณหภูมิ 64.7 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดเดือดของเมทานอล จึงมีการควบแน่นไอน้ำของเมทานอลด้วยชุดรีฟลักซ์
3. วิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ตามวิธีมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

ได้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยใช้ $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จะใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลจากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ช่วยลดการนำเข้าน้ำมันดิบและลดการเกิดมลพิษจากกระบวนการกลั่นน้ำมันและการใช้น้ำมันดีเซล

การตรวจเอกสาร

พลังงานทดแทน

พลังงานทดแทนที่นำมาใช้ในปัจจุบันมีคุณสมบัติและมีข้อดีข้อด้อยแตกต่างกันดังนี้

1. แก๊สโซฮอล์ 95

แก๊สโซฮอล์ 95 คือ เบนซินไร้สารตะกั่วออกเทน 95 ที่มีส่วนผสมของ “น้ำมันเบนซิน” กับ “เอทานอล” ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ เครื่องยนต์เบนซิน ทุกรุ่นที่ใช้เบนซินไร้สารตะกั่ว 91 และ 95 สามารถเติมแก๊สโซฮอล์ 95 ได้ทันทีโดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์แต่ข้อด้อยคือ ราคาแก๊สโซฮอล์ไม่ต่างจากน้ำมันเบนซิน 95 มากนัก แก๊สโซฮอล์ยังให้พลังงานความร้อนต่ำกว่าน้ำมันเบนซิน ดังนั้นปริมาณการสิ้นเปลืองของแก๊สโซฮอล์จะมีมากกว่าน้ำมันเบนซินประมาณร้อยละ 1-3 (หนึ่งฤทัย, 2547)

2. ก๊าซธรรมชาติ “NGV”

ก๊าซธรรมชาติ “NGV” หมายถึงก๊าซธรรมชาติที่มี “มีเทน” เป็นส่วนประกอบหลักและถูกอัดจนมีความดันสูงซึ่งบางประเทศเรียกว่า “ก๊าซธรรมชาติอัด” (CNG) คุณสมบัติพิเศษของก๊าซ NGV คือ เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดควันดำหรือสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพเนื่องจากมีสัดส่วนของคาร์บอนน้อยกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น และมีคุณสมบัติเป็นก๊าซ ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น คุณสมบัติเด่นอีกประการคือก๊าซ NGV เป็นเชื้อเพลิงที่มีความปลอดภัยมากที่สุดเพราะมีคุณสมบัติเบากว่าอากาศ ดังนั้นเมื่อเกิดการรั่วไหลก๊าซ NGV จะไม่มีการสะสมอยู่บนพื้นดินจนเกิดการลุกไหม้เหมือนก๊าซชนิดอื่นๆ และอุณหภูมิที่จะทำให้ก๊าซ NGV สามารถลุกติดไฟในอากาศเองได้ต้องสูงถึง 650 องศาเซลเซียส ข้อด้อยของก๊าซ NGV คือ รถยนต์ที่ใช้ก๊าซตัวนี้ต้องเป็นรถที่มีเครื่องยนต์ซึ่งสร้างขึ้นมารองรับการใช้ก๊าซ NGV โดยเฉพาะ หรือไม่ก็ต้องเป็น “เครื่องยนต์เชื้อเพลิงสองระบบ” หรือ “เครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงร่วม” ที่ผ่านการดัดแปลงและติดตั้งอุปกรณ์พิเศษที่ทำให้เครื่องยนต์ใช้ได้ทั้งน้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซลและก๊าซ NGV

3. ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล คือการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์หรือน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมาเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งอาจแบ่งไบโอดีเซลตามประเภทของน้ำมันที่ใช้ได้เป็น 3 ประเภท

3.1 น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์

ไบโอดีเซลประเภทนี้คือ น้ำมันพืชบริสุทธิ์ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลือง หรือจากน้ำมันจากไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันหมู ซึ่งสามารถเอามาใช้ได้เลยกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีอื่นใดหรือไม่ต้องนำมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมัน

3.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม

ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นลูกผสมระหว่างน้ำมันพืชหรือสัตว์ กับน้ำมันก๊าด-น้ำมันดีเซล เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้มากที่สุด เช่น “โคโคดีเซล” (Coco-diesel) ที่ อ. ทับสะแก จ.ประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งเป็นการผสมระหว่างน้ำมันมะพร้าวกับน้ำมันก๊าด หรือปาล์มดีเซล (palm-diesel) ที่เป็นการผสมระหว่างน้ำมันปาล์มกับน้ำมันดีเซล

3.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์

ไบโอดีเซลประเภทนี้ เป็นไบโอดีเซลที่ใช้กันมากในต่างประเทศ เช่น ในเยอรมัน สหรัฐอเมริกา หรือมาเลเซีย ดังนั้น “ไบโอดีเซล” ในความหมายของสากลจะหมายถึงไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ แต่การผลิตไบโอดีเซลชนิดนี้ยุ่งยากกว่า 2 ชนิดแรก เพราะต้องผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า “ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน” นั่นคือการนำเอาน้ำมันพืชหรือสัตว์ที่มีกรดไขมัน ไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ได้เอสเทอร์ไบโอดีเซลชนิดนี้มีคุณสมบัติที่เหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุดทำให้ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์และสามารถนำมาใช้กับรถยนต์ได้

ไบโอดีเซล

1. วัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

น้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล น้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบสามารถสกัดจากน้ำมันพืชได้ทุกชนิด การพิจารณาเลือกพืชชนิดใดมาใช้ ต้องคำนึงถึงองค์ประกอบของน้ำมันในพืชชนิดนั้น และความเหมาะสมของปริมาณการเพาะปลูกพืชน้ำมันในพื้นที่นั้นๆ ด้วย เช่น ปาล์มน้ำมันและมะพร้าวเป็นพืชน้ำมันที่มีการเพาะปลูกมากในประเทศไทย ปาล์มน้ำมันปลูกมากในมาเลเซีย ถั่วเหลืองปลูกมากในประเทศสหรัฐอเมริกา เรพและทานตะวันปลูกมากในกลุ่มประเทศยุโรป เป็นต้น ประเทศไทยทำการเพาะปลูกพืชน้ำมัน 6 ชนิด คือถั่วเหลือง ปาล์มน้ำมัน ถั่วลิสง มะพร้าว ละหุ่ง และงา นอกเหนือจากพืชน้ำมันทั้ง 6 ชนิดที่เกษตรกรทำการเพาะปลูกแล้ว ยังมีแหล่งน้ำมันอื่นๆ เช่น สนูปดำ น้ำมันสัตว์ น้ำมันพืชใช้แล้ว และน้ำมันสัตว์ใช้แล้ว แหล่งน้ำมันเหล่านี้สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลได้ทั้งสิ้น (พลังงานทดแทนเอทานอลและไบโอดีเซล, 2545)

กรณีของสนูปดำแตกต่างจากพืชน้ำมันทั้ง 6 ชนิดข้างต้น กล่าวคือ น้ำมันเมล็ดสนูปดำไม่สามารถใช้ในการบริโภคได้รวมถึงกากหลังการบีบน้ำมันออกแล้วไม่เหมาะในการนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ เนื่องจากในเมล็ดสนูปดำมีสารพิษประเภทเคอร์ซิน (Curcine) และ Curcasin อยู่ สนูปดำเป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ Euphorbiaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha curcas* Linn. มีชื่อสามัญว่า Physic nut หรือ Purging nut ลักษณะต้นสนูปดำเป็นไม้พุ่มขนาดใหญ่ โตเร็ว และทนต่อสภาพภูมิอากาศแห้งแล้ง เมล็ดสนูปดำมีปริมาณน้ำมันสูงถึงร้อยละ 33.5 ของเมล็ด หรือคิดเป็นร้อยละ 52.8 ของน้ำหนักเนื้อในของเมล็ด เนื่องจากเมล็ดสนูปดำมีปริมาณน้ำมันที่สูงเช่นนี้ชาวบ้านจึงใช้เมล็ดสนูปดำติดไฟให้แสงสว่างในยามค่ำคืน

1.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์

โดยทั่วไปแล้วน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ทุกชนิดเป็นสารประกอบตระกูลไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) มีโครงสร้างเป็น C_3H_5 เชื่อมต่อด้วยกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 10 ถึง 30 ตัว น้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์มีกรดไขมันชนิดต่างๆ กันเป็นองค์ประกอบ โดยที่มีปริมาณกรดไขมันในโครงสร้างถึงร้อยละ 94-96 ของน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้

คุณสมบัติของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งทางเคมีและกายภาพแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ

น้ำมันพืชส่วนใหญ่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในกรดไขมันระหว่าง 12 ถึง 18 ตัว มีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1 น้ำมันพืชที่มีกรดไขมันอิ่มตัวในปริมาณสูงจะมีค่าไอโอดีนต่ำ และเมื่อมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวลดลง หรือมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงขึ้นค่าไอโอดีนจะสูงขึ้นตามลำดับ น้ำมันพืชเป็นสารที่ไม่อยู่ตัว เมื่อสัมผัสอากาศจะถูกออกซิไดส์ได้ง่าย และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์ได้ที่อุณหภูมิสูง เมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์แล้วน้ำมันจะมีสภาพเป็นสารเหนียวขึ้น โดยทั่วไปค่าไอโอดีนของน้ำมันพืชจะเป็นดัชนีบอกถึงปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีอยู่ในน้ำมันนั้นๆ ซึ่งบอกถึงความยากง่ายในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์ด้วย กล่าวคือน้ำมันมีค่าไอโอดีนสูงจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์ได้ง่าย (พลังงานทดแทน เอทานอลและไบโอดีเซล, 2545)

1.2 คุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์

น้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์มีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซลเป็น 10 เท่า ถ้าอุณหภูมิต่ำลง น้ำมันพืชจะยังมีความหนืดสูงขึ้นเป็นลำดับจนเกิดเป็นไข ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการป้อนเชื้อเพลิงในบางพื้นที่และบางฤดูกาลที่มีอุณหภูมิต่ำ ในมุมมองของการใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ดีเซลน้ำมันพืชมีค่าความร้อนประมาณร้อยละ 83-85 ของน้ำมันดีเซล มีคุณสมบัติที่ระเหยตัวได้น้อยมาก (low volatility) ทำให้เมื่อป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้จะจุดระเบิดได้ช้ากว่า และมีกากคาร์บอนหลงเหลือหลังการเผาไหม้มากกว่าน้ำมันดีเซล การที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซลทำให้หัวฉีดฉีดน้ำมันให้เป็นฝอยได้ยาก และเป็นอุปสรรคต่อการป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และการสันดาปจะไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดความยุ่งยากเมื่อใช้น้ำมันพืชดิบล้วนๆ โดยตรงในเครื่องยนต์ (พลังงานทดแทน เอทานอลและไบโอดีเซล, 2545)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติและองค์ประกอบกรดไขมันหลักของน้ำมันพืชต่างๆ

น้ำมันดิบ	ค่า	องค์ประกอบกรดไขมันหลัก						
ชนิด	ไอโอดีน	C12:0	C14:0	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3
ปาล์ม	14-21.0	ND-0.5	0.5-2.0	39.3-47.5	3.5-6.0	36.0-44.0	9.0-12.0	ND-0.5
ปาล์ม โอลีน	≥56	0.1-0.5	0.5-1.5	38.0-43.5	3.5-5.0	39.8-46.0	10.0-13.5	ND-0.6
ปาล์ม สเตียรีน	≤48	0.1-0.5	1.0-2.0	48.0-74.0	3.9-6.0	15.5-36.0	3.0-10.0	0.5
เมล็ดใน ปาล์ม	50.0-55.0	45.0-55.0	14.0-18.0	6.5-10.0	1.0-3.0	12.0-19.0	1.0-3.5	ND-0.2
มะพร้าว	6.3-10.6	45.1-53.2	16.8-21.0	7.5-10.2	2.0-4.0	5.0-10.0	1.0-2.5	ND
ถั่วลิสง	86-107	ND-0.1	ND-0.1	8.0-14.0	1.0-4.5	35.0-67.0	13.0-43.0	ND-0.3
เมล็ดสบู่ดำ	101	ND	ND	14.9	6.0	41.2	37.4	ND
เมล็ดเรพ	94-120	ND	ND-0.2	1.5-6.0	0.5-3.1	8.0-60.0	11.0-23.0	5.0-13.0
ถั่วเหลือง	124-139	ND-0.1	ND-0.2	8.0-13.5	2.0-5.4	17.7-28.0	49.8-59.0	5.0-11.0

หมายเหตุ ND = ไม่พบ, Cx:y หมายถึง มีคาร์บอน x อะตอม และมี y พันธะคู่

ที่มา: พลังงานทดแทน เอทานอลและไบโอดีเซล (2545)

2. กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

“ไบโอดีเซล” ในความหมายของสากลจะหมายถึงไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ แต่การผลิตไบโอดีเซลชนิดนี้ยุ่งยาก เพราะต้องผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า “ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน” นั่นคือการนำเอาน้ำมันพืชหรือสัตว์ที่มีกรดไขมันไปทำปฏิกิริยากับ

แอลกอฮอล์โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ได้เอสเทอร์ ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่สามารถนำมาใช้แทนน้ำมันไบโอดีเซลได้

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของไบโอดีเซล

Parameters	Austria (ON)	Czech republic (CSN)	France (journal official)	Germany (DIN)	Italy (UNI)	USA (ASTM)
Density at 15°C g/cm ³	0.85–0.89	0.87–0.89	0.87–0.89	0.875–0.89	0.86–0.90	–
Viscosity at 40°C mm ² /s	3.5–5.0	3.5–5.0	3.5–5.0	3.5–5.0	3.5–5.0	1.9–6.0
Flash point (°C)	100	110	100	110	100	130
Pour point (°C)	0/–5	–5	–	0–10/–20	–	–
Cetane number	≥ 49	≥ 48	≥ 49	≥ 49	–	≥ 47
Neutralization number (mgKOH/g)	≤ 0.8	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.8
Conradson carbon residue (%)	0.05	0.05	–	0.05	–	0.05

ที่มา: Meher *et al.* (2006)

2.1 การใช้โดยตรงและผสมตามอัตราส่วน (Direct use and blending)

ในปี 1980 เริ่มมีการสนใจในการใช้น้ำมันจากพืชมาทดแทนเชื้อเพลิงมากขึ้น โดยบริษัท Caterpillar Brazil ได้ทดลองใช้น้ำมันพืชผสมกับน้ำมันดีเซล กับ pre-combustion engines โดยไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงเครื่องยนต์แต่อย่างใดและได้ทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วนน้ำมันพืชผสมกับน้ำมันดีเซลแตกต่างกันออกไป พบว่าในทางปฏิบัติไม่สามารถใช้น้ำมัน

พืชทดแทนน้ำมันดีเซลได้ทั้ง 100 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อใช้น้ำมันพืช 20 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับน้ำมันดีเซล 80 เปอร์เซ็นต์กลับให้ผลที่น่าพอใจ

Anon (1982) ได้ทดลองนำน้ำมันพืชที่ผ่านการทอดอาหารแล้ว 95 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับน้ำมันดีเซล 5 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการผสมและให้ความร้อน (preheating) ก่อนนำเข้าเครื่องยนต์ จากการทดลองพบว่าไม่เกิดปัญหาการเกิดโค้กและการสะสมของคราบแข็งคาร์บอน โดยสิ่งสำคัญนั้นอยู่ที่ระบบเครื่องกรองน้ำมันของเครื่องยนต์ โดยงานวิจัยนี้พบปัญหาอยู่เพียงอย่างเดียว คือ น้ำมันมีความหนืดเพิ่มขึ้นดังนั้นจึงเปลี่ยนน้ำมันเครื่องทุก 4,000 ถึง 4,500 ไมล์

Schlick *et al.* (1988) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องยนต์ดีเซลประเภท direct injection ขนาด 2.56 ลิตร 3 cylinder รุ่น 2600 series ของบริษัท Ford โดยใช้น้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันดอกทานตะวันผสมน้ำมันดีเซลหมายเลข 2 ในอัตราส่วน 25:75 โดยปริมาตร ผลการทดสอบกำลังของเครื่องยนต์พบว่าคงที่ตลอด 200 ชั่วโมงของการเดินเครื่องยนต์ แต่พบว่ามีปัญหาการเกิดคราบแข็งของคาร์บอนที่มากเกินไปจนรับได้ในทุกส่วนของห้องเผาไหม้ ดังนั้นจึงทำให้เกิดการยุติการใช้ น้ำมันพืชผสมกับน้ำมันดีเซล ซึ่งอย่างน้อยก็กับเครื่องยนต์ประเภทนี้ และภายใต้เงื่อนไขการทดสอบตามมาตรฐาน EMA

การใช้น้ำมันพืชโดยตรงหรือการใช้น้ำมันพืชผสมน้ำมันดีเซลนั้น เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วให้ผลที่ไม่น่าพอใจ และไม่สามารถนำไปใช้ได้สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลทั้งประเภท direct และ indirect injection ซึ่งปัญหามาจากน้ำมันที่มีความหนืดสูง มีองค์ประกอบที่เป็นกรดไขมันอิสระ การเกิดยางเหนียวเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ระหว่างการเก็บรักษาและการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์ การเกิดคราบแข็งของคาร์บอนและปัญหาที่น้ำมันเครื่องมีความหนืดมากขึ้น

2.2 ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)

เพื่อแก้ปัญหาคความหนืดที่สูงของน้ำมันพืช ไมโครอิมัลชันที่ผสมกับตัวทำละลาย เช่น เมทานอล เอทานอล และ 1-บิวทานอล จึงได้ถูกศึกษาเพิ่มมากขึ้น ไมโครอิมัลชันคือคอลลอยด์ที่กระจายตัวอยู่ในภาวะสมดุล มีขนาดอนุภาคระหว่าง 1-150 นาโนเมตร โดยสามารถเกิดได้เองตามธรรมชาติจากของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันในภาวะปกติและมี amphiphiles ผสม

อยู่ในของเหลวดังกล่าวอย่างน้อยหนึ่งชนิดเพื่อทำให้เกิดความคงสภาพโดยอาจเป็นสารมีประจุ หรือไม่มีประจุก็ได้ (Schwab *et al.*, 1987)

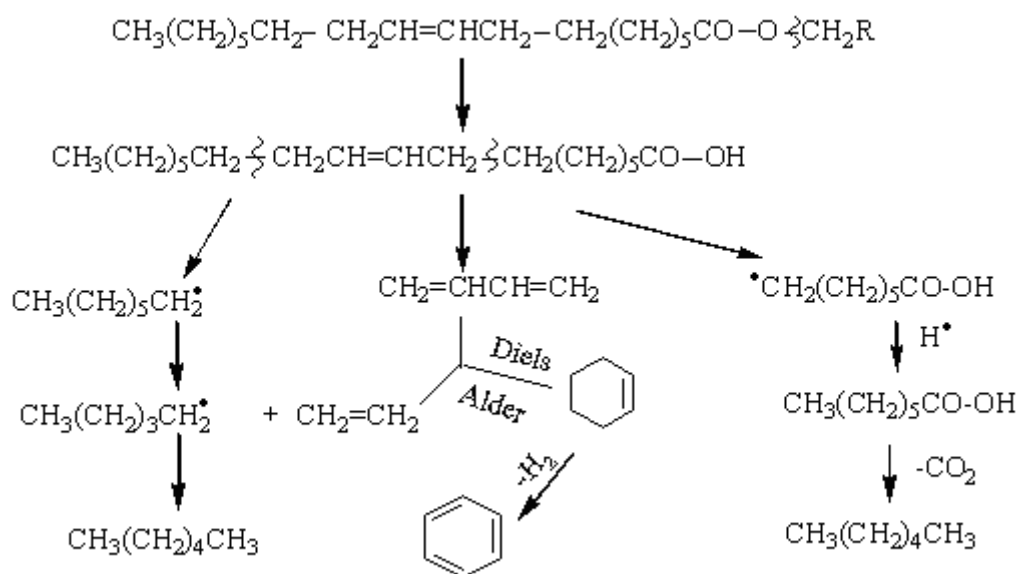
Goering *et al.* (1982) ได้ทดลองใช้ไมโครอิมัลชันทั้งชนิดที่มีประจุและไม่มีประจุของ เอทานอลในน้ำมันถั่วเหลือง กับเครื่องยนต์ดีเซลในระยะเวลาสั้นๆ พบว่าให้คุณสมบัติใกล้เคียงกับ น้ำมันดีเซลหมายเลข 2 ถึงแม้ค่าซีเทนและปริมาณพลังงานจะต่ำกว่า แต่งานวิจัยนี้ไม่ได้ ทำการศึกษาถึงความสึกหรอของเครื่องยนต์จากการทดลอง

Ziejewski *et al.* (1984) ได้ทำการเตรียมสารอิมัลชันของน้ำมันดอกทานตะวัน (alkali-refines and winterized) 53 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร กับเอทานอล (190-proof ethanol) 13.3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ 1-บิวทานอล 33.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าสารอิมัลชันที่ไม่มี ประจุนี้มีความหนืด 6.31 cSt ที่ 40 องศาเซลเซียส ค่าซีเทนเท่ากับ 25 และปริมาณเล็กน้อยกว่า 0.01 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณ 1-บิวทานอลมากขึ้นทำให้ความหนืดของเชื้อเพลิงลดลงและ รูปแบบการฉีดเชื้อเพลิงของระบบหัวฉีดดีขึ้น จากการทดลองในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 200 ชั่วโมง พบว่าไม่มีการเสื่อมลงของระบบการกรองแต่เกิดสิ่งผิดปกติก็เกิดยางเหนียวติดอยู่ในท่อ ของหัวฉีด การเกิดคราบตะกอนแข็งของคาร์บอนเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และความหนืดของ น้ำมันเครื่องที่เพิ่มขึ้น

2.3 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Thermal cracking or pyrolysis)

ไพโรไลซิส หมายถึง กระบวนการเปลี่ยนสารตั้งต้นชนิดหนึ่งไปเป็นอีกชนิดหนึ่งโดย อาศัยความร้อนหรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย ซึ่งจะไม่ใช้อากาศหรือออกซิเจน และมีการแตกตัว ของพันธะเคมีให้ผลผลิตเป็นสารประกอบขนาดเล็กลง

Schwab *et al.* (1988) ได้ทำการศึกษาโดยการใช้น้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันดอกคำฝอย ที่มีปริมาณกรดโอเลอิกสูงมาทำการไพโรไลซิส ผลที่ได้พบว่าได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอน 73-77 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารตั้งต้นและได้ 80-88 เปอร์เซ็นต์เมื่อใช้น้ำมันดอก คำฝอยเป็นสารตั้งต้น โดยองค์ประกอบหลักจะเป็นอัลเคนและอัลคีนมีปริมาณรวมกันประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักทั้งหมด มีกรดคาร์บอกซิลิกประมาณ 9.6-16.1 เปอร์เซ็นต์ กลไกการแตก สลายด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์แสดง ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการแตกสลายด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์

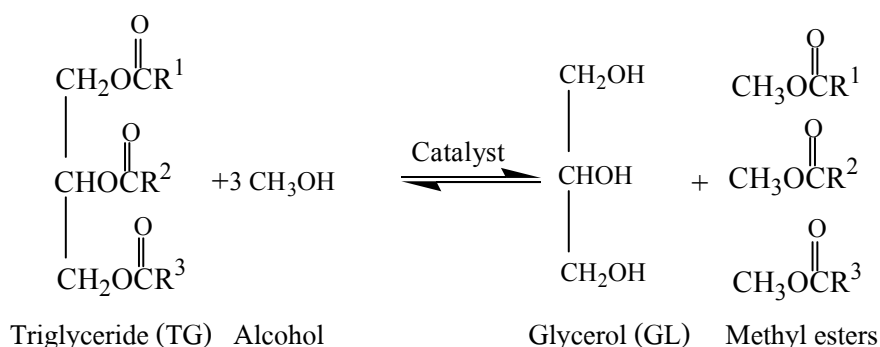
ที่มา: Schwab *et al.* (1988)

ข้อเสียของวิธีกระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนคือ เครื่องมือที่มีราคาแพงขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกับแก๊สโซลีนและน้ำมันดีเซล และออกซิเจนที่ถูกกำจัดออกไปกระบวนการไพโรไลซิสจะทำให้เกิดผลเสียต่อสภาพแวดล้อม นอกจากนี้ กระบวนการนี้มักจะเป็นการผลิตเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติเหมือนแก๊สโซลีนมากกว่าไบโอดีเซล

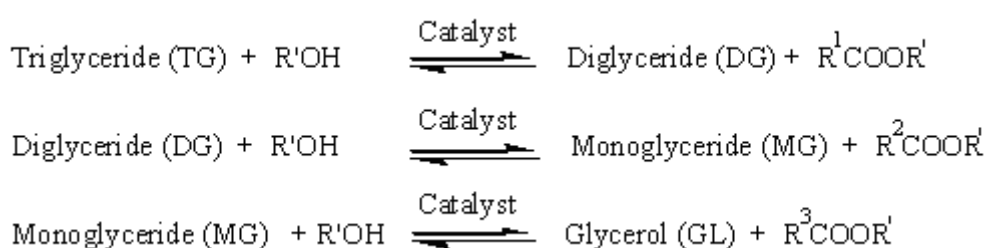
2.4 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)

ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกริยาระหว่างไขมันหรือน้ำมันกับแอลกอฮอล์และจะได้เอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) กับกลีเซอรอล ดังในภาพที่ 2 และ 3

กระบวนการที่สามารถทำให้เกิดปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีอยู่หลายวิธี ที่นิยมนั้นมากคือปฏิกริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยาเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกริยาและเพิ่มปริมาณการเกิดเอสเทอร์ นอกจากนี้ในปัจจุบันได้มีการทำปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกริยาแต่ใช้แอลกอฮอล์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตแทน



ภาพที่ 2 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของกลีเซอรีนกับแอลกอฮอล์



ภาพที่ 3 สมการของปฏิกริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันแต่ละขั้นตอนจนได้กลีเซอรอลและเอสเทอร์

สำหรับ R^1 , R^2 และ R^3 เป็นหมู่แอลคิลที่เป็นสายโซ่ยาวมีจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วงระหว่าง C_8 ถึง C_{18}

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีหลายชนิดแต่ที่นิยมใช้คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสภาพเป็นกรดหรือที่มีสภาพเป็นเบสและเอนไซม์ไลเปส โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสภาพเป็นเบสจะใช้ในอุตสาหกรรมมากกว่าเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเร็วกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสภาพเป็นกรดมาก แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสภาพเป็นกรดจะใช้ได้ดีในกรณีที่น้ำมันที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบมีกรดไขมันอิสระอยู่ในปริมาณที่มาก เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ ดังนั้นในการทำงานจริงต้องมีการใส่แอลกอฮอล์มากเกินไปเพื่อป้องกันปฏิกิริยาย้อนกลับ แอลกอฮอล์ที่ใช้ ได้แก่ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอลและเอมิลแอลกอฮอล์ แต่ที่นิยมใช้กันมากคือ เมทานอลและเอทานอล เพราะมีราคาถูกและคุณสมบัติทางกายภาพที่ชั่วและสายโซ่แอลกอฮอล์ที่สั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาที่เร็ว ละลายในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสได้ง่ายโดยอัตราส่วนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่สมบูรณ์ระหว่าง

แอลกอฮอล์และกลีเซอรีนในอัตราส่วนเท่ากับ 3:1 โดยการเพิ่มแอลกอฮอล์จะทำให้สมมูลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางขวามากขึ้นทำให้ได้เอสเทอร์มากขึ้น การที่จะผลิตให้ได้เอสเทอร์บริสุทธิ์สามารถทำได้ยากเนื่องจากจะมีสารจำพวกโมโนหรือไดกลีเซอรีนผสมอยู่ในเอสเทอร์ ส่วนกลีเซอรอลที่ได้ในขั้นสุดท้ายของปฏิกิริยาจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากเป็นสารที่มีคุณค่าในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางและยา

2.4.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบส

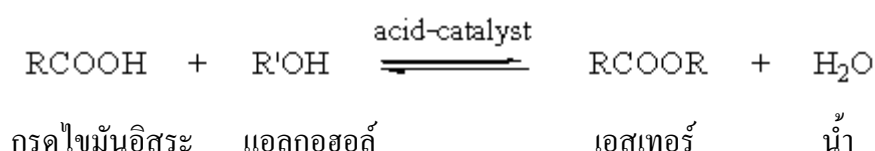
จากการทดลองโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาให้ใกล้เคียงกับจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้เป็นตัวทำละลาย และอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันถั่วเหลืองเท่ากับ 6 ต่อ 1 จากการทดลองพบว่า 90 ถึง 98 เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันถั่วเหลืองจะเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที

ในกรณีที่ต้องการเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาสามารถทำได้โดยเติมเตตระไฮโดรฟูแรน (THF) ซึ่งเป็นตัวทำละลายร่วมช่วยให้แอลกอฮอล์กับน้ำมันละลายกันได้ดีขึ้น และเทคนิคในการแยกไบโอดีเซลจากของผสมหลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุดนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่ที่ใช้ได้ผลดีที่สุดคือการใช้น้ำร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ชะล้างซึ่งจะทำให้ได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ถึง 99 เปอร์เซ็นต์

ข้อจำกัดที่สำคัญในการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ จะทำให้ระบบมีความไวต่อกรดไขมันอิสระและน้ำ โดยกรดไขมันอิสระทำให้เกิดสบู่ของเอสเทอร์ ตามภาพที่ 4 ซึ่งกรดไขมันอิสระเกิดปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสทำให้เกิดสบู่ ส่วนน้ำทำปฏิกิริยากับเมทิลเอสเทอร์ได้กรดไขมันอิสระและเมทานอล ตามภาพที่ 5 ดังนั้นกรดไขมันอิสระและน้ำทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง การเกิดสบู่ไม่เพียงแต่ทำให้เปลืองตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาสaponification เท่านั้น แต่สบู่จะทำให้เกิดคอลลอยด์ (ของผสมสองชนิดที่ไม่ละลายผสมกัน) ซึ่งเป็นผลให้การเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับไบโอดีเซลทำได้ยากขึ้น ดังนั้นก่อนที่จะนำน้ำมันพืชและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสมาใช้เป็นวัตถุดิบจะต้องมีการกำจัดน้ำออกก่อนและทำการกำจัดกรดไขมันอิสระออกด้วย จากข้อกำหนดนี้เองทำให้การใช้ไขมันปรุงอาหารที่ใช้แล้วมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลยังไม่เป็นทางเลือกที่ดีนัก แต่ถ้าต้องการที่จะใช้น้ำมันชนิดนี้เป็นวัตถุดิบก็สามารถทำได้ แต่ต้องนำไปกำจัดกรดไขมันอิสระออกก่อนโดยให้มาทำปฏิกิริยา

ข้อเสียคือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างต่ำมาก เวลาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจึงใช้เวลานาน จากการทดลองของ เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (เทียบกับน้ำมัน) ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 30 ต่อ 1 และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 69 ชั่วโมง น้ำมันพืชจะเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลได้ 90 เปอร์เซ็นต์

การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ในการผลิตไบโอดีเซลมีข้อดี คือ เป็นตัวเร่งที่มีราคาถูก และสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) เพราะสามารถเปลี่ยนกรดไขมันอิสระที่มีมากในน้ำมันที่ผ่านการปรุงอาหารแล้วให้เป็นเอสเทอร์ได้ดังแสดงดังภาพที่ 6 แต่ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันคือ น้ำ ซึ่งน้ำทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดลดลงอย่างมาก ทำให้เอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันลดลง (Kusdiana and Saka, 2004)



ภาพที่ 6 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ

2.4.3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ไลเปสเป็นเอนไซม์ที่จัดอยู่ในกลุ่มไฮโดรเลส (hydrolase) มีชื่อเรียกตามระบบ systematic name ว่า triacylglycerol acylhydrolase และมีชื่อเรียกตามรหัสหรือตามระบบตัวเลข (code or number system) คือ EC 3.1.1.3 ไลเปสสามารถพบได้ทั่วไปทั้งในพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ เอนไซม์ไลเปสได้รับความสนใจในการศึกษาคุณสมบัติทั้งทางด้านสรีรวิทยาและการนำมาประยุกต์ใช้ทางเทคโนโลยีชีวภาพ เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิตตามธรรมชาติมีความสามารถย่อยสลายไขมันโดยมีน้ำเข้าร่วมปฏิกิริยา (hydrolysis) นอกจากเอนไซม์ไลเปสจะช่วยย่อยสลายไขมันที่มีโครงสร้างทางเคมีจำเพาะเจาะจงแล้ว เอนไซม์ไลเปสยังสามารถใช้ได้ทั้งในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและเอสเทอร์ฟิเคชัน เอนไซม์ไลเปสยังสามารถสังเคราะห์เอสเทอร์ได้หลายชนิดขึ้นกับแอลกอฮอล์ที่ใช้ ซึ่งสิ่งที่ทำให้เอนไซม์ไลเปสเป็นที่น่าสนใจคือการนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ในน้ำมันที่ใช้แล้วเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลโดยไม่ก่อให้เกิดของเสีย

ไลเปสที่ผ่านการใช้งานแล้วไม่สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ Shimada *et al.* (2000) จึงได้ทำการทดลองเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาไลเปส *C. antarctica* ที่ตรึงไว้ โดยได้แบ่งขั้นตอนการทำเมทาโนไลซิส 2 แบบคือ แบบ 2 ชั้นและแบบ 3 ชั้น โดยเมทาโนไลซิสแบบ 2 ชั้นตอน ที่ได้ผลดีกับการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้น้ำมันที่ผ่านการนำมาแล้วมาเป็นวัตถุดิบ ส่วนแบบ 3 ชั้นจะถูกนำมาใช้เมื่อไลเปสที่นำมาใช้ถูกทำลายโดยไบโกลในถังปฏิกรณ์ จากการทดลองพบว่าทั้งแบบ 2 ชั้นและ 3 ชั้น ให้เปอร์เซ็นต์การแปลงสภาพมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์และตัวเร่งปฏิกิริยาไลเปสสามารถใช้งานมากกว่า 100 วัน โดยประสิทธิภาพยังคงเท่าเดิม

Dossat *et al.* (2002) ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันโดยใช้เอนไซม์ตรึงรูปในสารละลายเฮกเซน (n-hexane) ใช้แบบจำลอง Ping Pong Bi Bi เพื่ออธิบายจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน พบว่าเมื่อใช้สารตั้งต้นในอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเท่ากับ 1 ต่อ 3 ให้ปริมาณเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับ 65 เปอร์เซ็นต์

Kose *et al.* (2002) ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดฝ้ายโดยใช้เอนไซม์ตรึงรูปจาก *Candida antarctica* สภาพที่เหมาะสมในการทดลองคือความเข้มข้นเอนไซม์ 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนระหว่างน้ำมันและแอลกอฮอล์ เท่ากับ 1 ต่อ 4 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ได้ผลผลิตสูงสุดเท่ากับ 91.5 เปอร์เซ็นต์

จากการรายงานการวิจัยในหลายๆ ฉบับ พบว่าเอนไซม์ไลเปสสามารถให้เปอร์เซ็นต์การแปลงผัน (conversion) สูง แต่ตัวเร่งชนิดนี้มีราคาที่สูงจึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้คือ ขั้นตอนแรกจะใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะให้ผลผลิตไม่สูงมากนักและยังมีสารตั้งต้นรวมทั้งกรดไขมันอิสระเหลืออยู่ จากนั้นจึงใช้เอนไซม์ไลเปสเข้าทำปฏิกิริยาต่อเพื่อให้เปอร์เซ็นต์การแปลงผันสูงขึ้น วิธีนี้สามารถลดต้นทุนในส่วน of เอนไซม์ไลเปสได้

2.4.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ของไหลที่สถานะเหนือวิกฤต

สำหรับการใช้แอลกอฮอล์ที่สถานะเหนือวิกฤตเพื่อแปลงสภาพจากน้ำมันพืชเป็นไบโอดีเซลนั้นจะมี 2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นควบคู่กันภายในกระบวนการ คือ ปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์และอัลคิลเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมัน โดยวิธีการไหลแอลกอฮอล์ที่สถานะเหนือวิกฤตนี้มีข้อดีกว่าวิธีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาล้น

กว่า ไบโอดีเซลที่ได้มีความบริสุทธิ์มากกว่า กระบวนการแยกและเพิ่มความบริสุทธิ์ให้ไบโอดีเซลทำได้ง่ายและไม่มีข้อจำกัดในเรื่องของน้ำและกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมัน แต่กลับเป็นข้อได้เปรียบเนื่องจากน้ำจะช่วยให้แยกไบโอดีเซลและกลีเซอรอลได้ง่ายขึ้น ส่วนกรดไขมันอิสระก็สามารถเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลได้จากปฏิกิริยาเมทิลเอสเทอร์ฟิเคชันที่เกิดควบคู่กับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ส่วนข้อเสียของวิธีการนี้คือ ค่าปฏิบัติการต่างๆ มีราคาแพงเนื่องจากต้องมีการควบคุมความดันและอุณหภูมิในช่วงที่สูง เช่นเมทานอลที่สถานะของไหลเหนือจุดวิกฤต ความดันอย่างต่ำที่ต้องใช้ 8.09 เมกะปาสกาล และอุณหภูมิอย่างต่ำเท่ากับ 239 องศาเซลเซียสจึงจะถึงสถานะเหนือจุดวิกฤต

Jackson และ King (1996) ทำการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ น้ำมันจากข้าวโพดและเมทานอล โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือวิกฤตเป็นตัวกลางและใช้เอนไซม์ไลเปสเข้าร่วมในปฏิกิริยาทำให้ความดัน 17.2 เมกะปาสกาล และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าได้ผลผลิตเกิน 98 เปอร์เซ็นต์

Saka และ Kusdisna (2001) ทำการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ น้ำมันจากเมล็ดเรฟ และเมทานอลที่สถานะเหนือวิกฤต ในอัตราส่วนโดยโมลน้ำมันต่อแอลกอฮอล์เท่ากับ 1 ต่อ 42 พบว่าได้ผลผลิตเกินเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์

Demirbas (2002) ทำการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้น้ำมันต่างกัน 6 ชนิดได้แก่ cottonseed, hazelnut, kernel poppy seed, rapeseed, safflower seed และ sunflower seed และใช้เมทานอลที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ในอัตราส่วนโมลน้ำมันต่อแอลกอฮอล์เท่ากับ 1 ต่อ 42 พบว่าได้ผลผลิตสูงสุดเท่ากับ 98 เปอร์เซ็นต์

Warabi *et al.* (2004) ทำการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ น้ำมันจากเมล็ดเรฟ และแอลกอฮอล์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตแตกต่างกัน 5 ชนิด คือ เมทานอล เอทานอล 1-โพรพานอล 1-บิวทานอล และ 1-ออกทานอล ในอัตราส่วนโมลน้ำมันต่อแอลกอฮอล์เท่ากับ 1 ต่อ 42 พบว่าแอลกอฮอล์ที่มีหมู่แอลคิลที่สั้นจะให้ร้อยละของแอลคิลเอสเทอร์ หรือไบโอดีเซลสูงกว่าแอลกอฮอล์ที่มีหมู่แอลคิลที่ยาว โดยร้อยละของผลผลิตที่ได้เมื่อใช้เมทานอลเท่ากับ 100 เมื่อใช้เอทานอล หรือ 1-โพรพานอลได้ 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วน 1-บิวทานอลได้ 85 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อใช้ 1-ออกทานอลได้ผลผลิตเกินเท่ากับ 62 เปอร์เซ็นต์

Madras *et al.* (2004) ทำการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ น้ำมันดอกทานตะวัน และแอลกอฮอล์ที่สภาวะเหนือวิกฤต ในอัตราส่วนโดยโมลน้ำมันต่อ แอลกอฮอล์เท่ากับ 1 ต่อ 40 โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุด ชุดแรกใช้เมทานอลที่สภาวะเหนือ จดวิกฤต ชุดที่สองใช้เอทานอลที่สภาวะเหนือวิกฤตในการทำปฏิกิริยา พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้ง 2 ชุด เท่ากับ 80-100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนชุดที่ สามเป็นการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุด วิกฤตเป็นตัวกลาง และใช้เอนไซม์ไลเปสจาก *Candida Antarctica* (Novozym-435) เข้าร่วมใน ปฏิกิริยา พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้เท่ากับ 27-30 เปอร์เซ็นต์

Cao *et al.* (2005) ทำการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ น้ำมันถั่ว เหลือง กับเมทานอลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ในอัตราส่วนโมลน้ำมันต่อแอลกอฮอล์เท่ากับ 1 ต่อ 24 และใช้โพรเพนเป็นตัวทำละลายร่วม พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้เท่ากับ 98 เปอร์เซ็นต์

2.4.5 การผลิตไบโอดีเซลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิธีพั่นซ์

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิธีพั่นซ์มีข้อดีกว่าแบบเอกพันธ์ตรงที่สามารถ แยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้ง่าย และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิธีพั่นซ์ ได้แก่

2.4.5.1 น้ำ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ชนิดเบส น้ำมีส่วนร่วมทำให้เกิดสบู่ขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4 และ 5 ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และยังลดประสิทธิภาพ การทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิธีพั่นซ์ที่เป็นของแข็งนั้น น้ำจะจับกับ active site ซึ่งมีผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งไม่สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้หรือลดประสิทธิภาพ ลงนั่นเอง ดังนั้นอาจแก้ปัญหาได้โดยการกำจัดน้ำออกจากน้ำมันที่นำมาผลิต ไบโอดีเซล หรือ ผลิต ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการกำจัดน้ำออกจาก active site ได้ หรือตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่น้ำ ไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการกระตุ้นปฏิกิริยา จากการทดลองของ Ebiura *et al.* (2005) พบว่าปริมาณน้ำที่ อยู่ในน้ำมันไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมากนัก ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลกระทบของน้ำต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

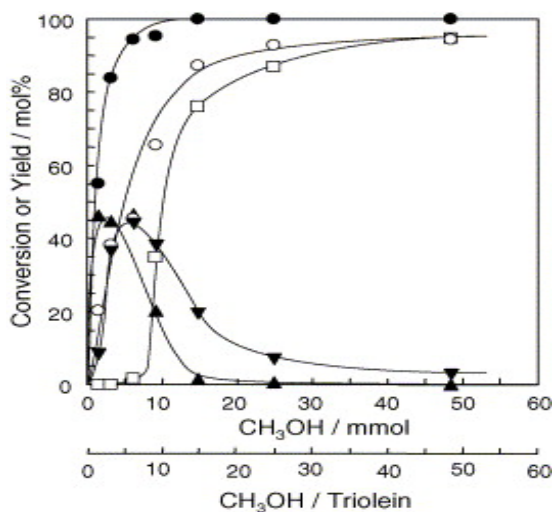
Catalyst	H ₂ O (mmol)	Yield	
		MEO (%)	GLY (%)
K ₂ CO ₃ /Al ₂ O ₃	0	91	89
	0.5	92	86
KF/Al ₂ O ₃	0	91	89
	0.5	87	82

หมายเหตุ MEO: methyl oleate; GLY: glycerol.

ที่มา: Methers et al. (2006)

2.4.5.2 กรดไขมันอิสระ จากการทดลองของ Suppress *et al.* (2001) พบว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ สำหรับน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระมากกว่าร้อยละ 27 โดยน้ำหนัก มีผลกระทบให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ แต่ถ้าน้ำมันมีกรดไขมันอิสระน้อยกว่าร้อยละ 2.6 โดยน้ำหนัก จะไม่มีผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

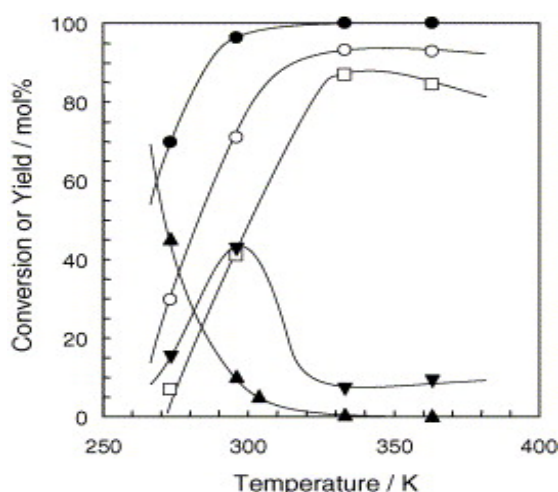
2.4.5.3 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน จากการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ จึงจำเป็นต้องใช้อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่ค่อนข้างสูงเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าหรือเพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่สูง จากการทดลองของ Ebiura *et al.* (2005) พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลเพิ่มขึ้นมากกว่า 25 มิลลิโมล ของเมทานอล (MeOH/triolein > 25) พบว่าค่าของผลผลิตของเมทิลโอเลต (methyl oleate) เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังภาพที่ 7 จากภาพแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอลส่งผลให้ร้อยละของการแปลงผันเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากการตรวจเอกสารพบว่าอัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่เหมาะสมนั้นต้องมีอัตราส่วนอย่างน้อย 6 ต่อ 1 หรือมากกว่า สำหรับในกรณีที่มีกรดไขมันอิสระอยู่ในน้ำมันในปริมาณที่สูงควรให้อัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันตั้งต้นในปริมาณที่สูงตามไปด้วย นอกจากนั้นการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลนี้จะช่วยลดระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาให้สั้นลงด้วย



ภาพที่ 7 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันไตรโอล์น (triolein) ต่อร้อยละการแปลงผันของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน triolein conversion (●), methyl oleate yield (○), glycerol yield (□), total diolein yield (▲), and total monoolein yield (▼)

ที่มา: Ebiura *et al.* (2005)

2.4.5.4 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันให้ค่าการแปลงผันที่สูงเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูง โดยขึ้นกับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์จะให้ค่าการแปลงผันมากกว่าร้อยละ 90 เมื่อใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่า 125 องศาเซลเซียส ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์จะให้ค่าการแปลงผันมากกว่าร้อยละ 90 โดยใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเพียง 40 ถึง 60 องศาเซลเซียสเท่านั้น จากการทดลองของ Ebiura *et al.* (2005) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการแปลงผันของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด K_2CO_3/Al_2O_3 แสดงดังภาพที่ 8 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ส่งผลให้ได้ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้นสูงตามไปด้วย



ภาพที่ 8 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการแปลงผันของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

triolein conversion (●), methyl oleate yield (○), glycerol yield (□), total diolein yield (▲), and total monoolein yield (▼)

ที่มา: Ebiura *et al.* (2005)

2.4.5.5 ตัวทำละลายร่วม (Co-solvent) สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์สารตั้งต้นจะแยกตัวออกจากกันทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลำบากวิธีการแก้ปัญหาคือการนำเอาตัวทำละลายร่วมเข้ามาใช้เพื่อไม่ให้เกิดการแยกตัวออกจากกัน และสามารถทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น สำหรับตัวทำละลายร่วมที่ใช้คือ นอร์มอลเฮกเซนและเตตระไฮโดรฟูแรน ซึ่งตัวทำละลายร่วมนี้ช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปได้ง่ายขึ้นเท่านั้นไม่ได้เกิดปฏิกิริยาแต่อย่างใด จากการทดลองของ Kim *et al.* (2004) ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับน้ำมันถั่วเหลืองต่อนอร์มอลเฮกเซน คือ 5 ต่อ 1 ในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

จากการเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการต่างๆ ทั้งข้อดีและข้อเสีย ทำให้งานวิจัยนี้สนใจในตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เพื่อลดข้อเสียที่เกิดขึ้นของทั้ง 4 วิธี เพราะว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์มีข้อดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ตรงที่สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้ง่าย และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพราะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2O/\text{Faujasite}$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำ เนื่องจากสบู่ดำเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้ดีในที่แห้งแล้งและกำลังได้รับการส่งเสริมและศึกษาวิจัยเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล โดยคาดหวังว่าจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันไบโอดีเซลปริมาณสูง

3. ประโยชน์และผลกระทบของการใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์

3.1 ด้านสิ่งแวดล้อม

3.1.1 สามารถลดมลพิษทางอากาศ ซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ คณะกรรมการไบโอดีเซลแห่งชาติ (National Biodiesel) สำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อม (US Environmental Protection Agency) ของสหรัฐอเมริกา ได้ทำการวิจัยและทดลองใช้ไบโอดีเซลสูตรต่างๆกับเครื่องยนต์ดีเซล และได้รายงานว่าไบโอดีเซลสูตร B100 และ B20 สามารถลดมวลปลดปล่อยจากการเผาไหม้ได้อย่างมีนัยสำคัญ

3.1.2 สามารถลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้จะถูกเปลี่ยนเป็นสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช

3.1.3 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วช่วยลดการนำน้ำมันที่ใช้แล้วไปประกอบอาหารซ้ำ และยังช่วยป้องกันมิให้น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว (ซึ่งมีสารไดออกซินที่เป็นสารก่อมะเร็ง) ไปผลิตเป็นอาหารสัตว์

3.2 ด้านสมรรถนะเครื่องยนต์

3.2.1. การผสมไบโอดีเซลในระดับร้อยละ 1-2 สามารถช่วยเพิ่มดัชนีการหล่อลื่นให้กับน้ำมันดีเซล จากผลการทดลองของสถาบันวิจัยและเทคโนโลยีของ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) พบว่าการเติมไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและน้ำมันมะพร้าวในอัตราร้อยละ 0.5 สามารถเพิ่มดัชนีการหล่อลื่นได้ถึง 2 เท่า (หนึ่งฤทัย, 2547)

3.2.2. ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้นเนื่องจากในไบโอดีเซลมีออกซิเจนอยู่ประมาณร้อยละ 10 ทำให้การผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันมีการกระจายสม่ำเสมอ และเป็นการเพิ่มอัตราส่วนของอากาศต่อน้ำมันได้เป็นอย่างดี จึงทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น

3.2.3. ถึงแม้ว่าความร้อนของไบโอดีเซล จะต่ำกว่าน้ำมันดีเซลประมาณร้อยละ 10 แต่ข้อดีของนี้ ไม่มีผลกระทบต่อ การใช้งานเพราะการใช้ไบโอดีเซลทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น จึงทำให้กำลังไม่ลดลง

3.3 ด้านเศรษฐศาสตร์

3.3.1 ช่วยสร้างงานในชนบท ด้วยการสร้างตลาดพลังงานไว้รองรับผลผลิตทางการเกษตรที่เหลือจากการบริโภค

3.3.2 ช่วยลดการนำเข้าน้ำมันดิบ จากต่างประเทศได้บางส่วนซึ่งในแต่ละปีประเทศไทยต้องสูญเสียเงินตราต่างประเทศเพื่อนำเข้าน้ำมันดิบกว่า 300,000 ล้านบาท ด้านการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงประเทศ

3.3.3 ประเทศไทยมีสัดส่วนปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลสูงกว่าน้ำมันเบนซินมาก ตลาดน้ำมันดีเซลในประเทศไทยมีมูลค่ามากกว่าน้ำมันเบนซินสองเท่า และในอนาคตมีแนวโน้มที่โรงกลั่นอาจจะผลิตน้ำมันดีเซลได้ไม่เพียงพอต่อการใช้ประโยชน์ภายในประเทศ ดังนั้นการใช้ไบโอดีเซลจึงช่วยลดความไม่สมดุลการผลิตของโรงกลั่นได้

3.3.4 การผสมน้ำมันไบโอดีเซลในอัตราส่วนร้อยละ 1-2 จะสามารถเพิ่มความหล่อลื่นในน้ำมันดีเซลได้ โดยเฉพาะกรณีที่จะมีการลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันดีเซล

3.4 ด้านความมั่นคง

การใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ ถือเป็นการเสริมสร้างความมั่นคง และเสถียรภาพทางด้านพลังงานของประเทศ อย่างไรก็ตาม แม้พลังงานทดแทนไบโอดีเซลจะมีข้อดีไม่น้อยเพียงใด ก็ย่อมมีข้อด้อยเหมือนพลังงานประเภทอื่นด้วยเช่นกัน

3.5 ข้อด้อยและผลกระทบที่มีต่อเครื่องยนต์ของไบโอดีเซล

3.5.1 น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์

มีคุณสมบัติต่างจากน้ำมันดีเซลค่อนข้างมาก จึงมีปัญหาเรื่องการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ เครื่องสะดุด มีผลต่อลูกสูบและวาล์ว มีตะกอนขาวค้างอยู่ในถังน้ำมัน และมีความหนืดสูงทำให้เครื่องยนต์สตาร์ทติดยากในที่อากาศเย็นๆ สำหรับการใช้น้ำมันมะพร้าว สูตรภูมิปัญญาชาวบ้านที่มีการผสมน้ำมันก๊าดร้อยละ 5 เพื่อลดความหนืดนั้นควรทำความสะอาดถังน้ำมันก่อนใช้ รวมทั้งระมัดระวังการอุดตันของไส้กรองน้ำมันในช่วงอากาศเย็น

3.5.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม

น้ำมันดีเซลแบบนี้เกิดจากการผสมกันระหว่างน้ำมันพืชหรือสัตว์ กับน้ำมันก๊าด-น้ำมันดีเซล ทำให้ลดปัญหาเรื่องความหนืดลงไปได้บ้าง แต่ยังคงมีปัญหาเมื่อมีอากาศเย็นและไ้กรองเกิดการอุดตันเร็วกว่าปกติ

3.5.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์

ไบโอดีเซลประเภทนี้มีค่าซีเทน (cetane) และค่าดัชนีการจุดติดไฟ สูงกว่าน้ำมันดีเซลทำให้การจุดระเบิดทำได้ดี การสันดาปสมบูรณ์ ความหนืดคงที่ แต่ข้อเสียของไบโอดีเซลประเภทนี้คือมีราคาแพงเนื่องจาก ต้นทุนสูงกว่าไบโอดีเซลชนิดอื่น น้ำมันไบโอดีเซลตามมาตรฐานสากลนั้น มีคุณสมบัติเทียบเคียงกับน้ำมันดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียมดังนั้นผลกระทบต่อเครื่องยนต์ถือว่าไม่มีผลทางด้านลบ หรือถ้าเป็นกรณีเครื่องยนต์เก่า อาจมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนซีลยาง (rubber) ซึ่งอาจถูกไบโอดีเซลทำลายบางส่วนเท่านั้น

3.6 สูตรการใช้น้ำมันไบโอดีเซลในต่างประเทศ

3.6.1 B2 (ไบโอดีเซล 2%: ดีเซล 98%) มีจำหน่ายทั่วไปในมลรัฐมินนิโซตา ประเทศสหรัฐอเมริกา และจะบังคับใช้ทั้งมลรัฐในปี 2548

3.6.2 B5 (ไบโอดีเซล 5%: ดีเซล 95%) มีจำหน่ายทั่วไปในฝรั่งเศส โดยกว่าครึ่งหนึ่งของน้ำมันดีเซลที่จำหน่ายเป็นน้ำมันสูตร B5 และเริ่มจำหน่ายในประเทศไทย ตั้งแต่ พ.ศ. 2551

3.6.3 B20 (ไบโอดีเซล 20%: ดีเซล 80%) เป็นน้ำมันผสมที่คณะกรรมการไบโอดีเซลแห่งชาติ และสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แนะนำให้ใช้ตามกฎหมายยานยนต์เพื่อเพลิงทดแทนของประเทศ (Alternative Motor Fuels Act:AMFA 1988) ปัจจุบันนิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเฉพาะบริษัทและรถของหน่วยงานราชการกว่า 147 แห่ง รวมทั้งการใช้ยานยนต์ในพื้นที่ที่ต้องคำนึงถึงมลพิษเป็นพิเศษ เช่น รถรับส่งนักเรียน รถประจำทาง เรือ หรือเครื่องจักรกลที่ใช้ในเมืองแร่ ทั้งที่ได้รับการรับรองจากบริษัทผู้ผลิตระบบหัวฉีดน้ำมันและเครื่องยนต์

3.6.4 B40 (ไบโอดีเซล 40%: ดีเซล 60%) เป็นสูตรที่ใช้ในรถยนต์ส่วนบุคคลในประเทศฝรั่งเศสทั้งนี้เพื่อผลในการลดมลพิษ

3.6.5 B100 (ไบโอดีเซล 100) เป็นน้ำมันไบโอดีเซลร้อยละ 100 ที่ใช้ในประเทศเยอรมนีและออสเตรีย โดยได้รับการรับรองจากบริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ของประเทศ

ไบโอดีเซลที่ผลิตและจำหน่ายเป็นการค้าในต่างประเทศต้องมีคุณภาพมาตรฐานกำหนด ปัจจุบันสำหรับสหรัฐอเมริกาได้กำหนดมาตรฐานกำหนด ASTM D 6751 สหภาพยุโรปได้กำหนดมาตรฐาน EN 14214 ประเทศเยอรมันได้กำหนดมาตรฐาน DIN 51606 ส่วนประเทศไทยมีการผลิตไบโอดีเซลในระดับโรงงานที่อำเภอคอนสาร จังหวัดสุราษฎร์ธานี มีกำลังการผลิต 30,000 ลิตรต่อวัน โดยใช้น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันพืชใช้แล้ว เป็นการผลิตเพื่อใช้ในกิจการของตนเองโดยใช้กับเรือเฟอร์รี่ และใช้ในการศึกษาวิจัย (หนึ่งฤทัย, 2547)

สบู่ดำ

1. ประวัติสบู่ดำ (History of *Jatropha curcas* Linn)

สบู่ดำ (ชื่อวิทยาศาสตร์: *Jatropha curcas* Linn., ชื่อสามัญ: Physic nut) พืชน้ำมันที่กำลังเป็นที่สนใจของผู้คนทั้งในและต่างประเทศในขณะนี้ นักพฤกษศาสตร์จัดกลุ่มไว้เป็นไม้พุ่มขนาดเล็ก ถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปอเมริกาเขตร้อน เป็นพืชในวงศ์ Euphorbiaceae วงศ์เดียวกับยางพารา ละหุ่ง และมันสำปะหลัง มีน้ำยางสีขาวใสลิ้นๆ เป็นพอง มีคุณสมบัติคล้ายสบู่อยู่ในทุกส่วนของ ลำต้น “สบู่” เป็นภาษาโปรตุเกส หมายถึง ต้นไม้ชนิดหนึ่งที่ใช้ไขมันจากเมล็ดมาเป็นส่วนผสมในการทำสบู่ สำหรับชำระล้างร่างกาย และซักล้างเสื้อผ้า ของใช้ มีบันทึกไว้ว่าค้นพบโดย พ่อค้าชาวโปรตุเกสที่เดินเรือไปทวีปอเมริกากลาง และนำเข้ามาในทวีปเอเชีย และแพร่มายังประเทศไทยสมัยกรุงศรีอยุธยาตอนปลาย ราวๆ 300 ปีก่อน โดยมีการแนะนำให้ผู้คนสมัยนั้นปลูกและพอกำรับซื้อเมล็ดไปทำสบู่ ในทวีปแอฟริกา สมัยก่อนปลูกกันมากที่แหลม Verde ในที่ดินที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ และเป็นแนวเขตรั้วบ้าน คอกสัตว์ หรือบริเวณหลุมฝังศพ เพื่อกันสัตว์ไม่ให้เข้าไปคุ้ยเขี่ย สำหรับในประเทศไทยมีรายงานว่า เคยมีการปลูกเป็นรั้วบ้าน ในภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ โดยผู้เฒ่า ผู้แก่ใช้อย่างใสๆ ที่หักออกจากก้านใบ หรือส่วนยอดใช้ทาแผลสด โดยเฉพาะแผลที่ปากให้เด็กๆ ที่เป็นโรคปากนกกระจอก หรือใช้กวาดลิ้นเด็กที่เป็นฝ้าขาว และใช้เนื้อในเมล็ดสีขาวเสียบไม้ จุดแทนเทียนไข ในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 เนื่องจากขาดแคลนน้ำมันก๊าดที่ใช้จุดตะเกียง

สบู่ดำ มีชื่อเรียกแตกต่างกันไปในแต่ละท้องถิ่น เช่น ภาคเหนือ เรียก มะหุ้งฮั่ว ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เรียก หมากเฒ่า มะเข่า หรือสีหลอด ภาคใต้เรียก หงส์เทศ (เพราะต้นโต) และภาคกลางเรียก สบู่ดำ ชาวเขาเรียก ไท้ยู หรือเกงยู (เพราะน้ำมันมีสีดำ) พม่าเรียก แจ้ทซุ เขมรเรียก ทะวอง จีนกลางเรียก หม่าฟ่งสู๊ แต่จิ๋วเรียก มั่วซองชีว ญี่ปุ่นเรียก บูราคิริ และภาษาอังกฤษเรียก physic nut หรือ purging nut (*Jatropha* spp.) พืชสกุลนี้จัดเป็นไม้สกุลใหญ่ กระจายอยู่ในเขตร้อนและกึ่งร้อน จเร สดากกร (2527) รายงานว่า พบสบู่ดำ 175 ชนิด ในอินโดจีน พบ 4 ชนิด 3 ชนิด พบในพม่าและมาเลเซีย ในประเทศไทยเองพบ 5 ชนิด คือ *J. gossypifolia* (สบู่แดง) *J. podagrica* (หนุมานนั่งแท่น) *J. integerima* (ปัดดาเวีย) *J. multifida* (มะละกอฝรั่ง ผื่นคัน) และ *J. curcas* (สบู่ดำ) (นันทวรรณ, 2549)

2. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

สบู่ดำ เป็นไม้พุ่มยืนต้นขนาดกลาง สูงประมาณ 2-7 เมตร มีอายุไม่น้อยกว่า 20 ปี จัดอยู่ในวงศ์ Euphorbiaceae เช่นเดียวกับยางพารา สบู่แดง ปัตตาเวีย มะละกอฝรั่ง หนุมานนั่งแท่น โป๊ยเซียน มั่นสำปะหลัง มะยม มะขามป้อม ผักหวานบ้าน เป็นต้น (อนุวัณ, 2549)

2.1 ลำต้น

มีเปลือกลำต้นเรียบ มีสีเทา-น้ำตาล ลำต้นเกลี้ยง อวบน้ำ เป็นไม้เนื้ออ่อน ไม่มีแก่น หักง่าย มีน้ำยางสีขาวใส

2.2 ใบ

เป็นใบเดี่ยวรูปไข่ กว้างหรือค่อนข้างกลม จัดเรียงแบบสลับ โคนใบเว้ารูปหัวใจ ปลายใบแหลม ขอบใบเรียบหรือหยักเว้า 3-5 หยัก

2.3 ดอก

ลักษณะดอกมีช่อดอกแบบ panicle หรือ panicle cyme ประกอบด้วยดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในช่อดอกเดียวกัน ดอกทั้ง 2 ชนิด มีกลีบรอง และกลีบดอก อย่างละ 5 กลีบ ดอกตัวผู้มีเกสรเรียงเป็นวง 2 วง วงละ 5 อัน ดอกตัวเมียมีรังไข่ ก้านเกสรตัวเมียมี 6 แฉก ดอกมีขนาดเล็กสีเขียวแกมเหลือง มีกลิ่นหอมอ่อนๆ ออกเป็นช่อ ที่ซอกใบหรือปลายยอด ในช่อดอกเดียวกันมีดอกตัวผู้มากกว่าดอกตัวเมีย (อัตราดอกตัวผู้ : ดอกตัวเมีย เท่ากับ 6-7:1) ดอกแต่ละช่อบานไม่พร้อมกัน มีช่อดอกประมาณ 15-30 ช่อต่อต้น แต่ละช่อดอกมีดอกย่อย 70-120 ดอก แต่จะติดผลเพียง 8-14 ผล

2.4 ผล

ผลที่เกิดจากช่อดอกเดียวกันจะสุกแก่ไม่พร้อมกัน ผลอ่อนมีสีเขียว เมื่อแก่มีสีเหลือง คล้ายลูกจันทน์ ผลมีลักษณะกลมรีเล็กน้อย ผลมีขนาดปานกลาง กว้าง 2-3 เซนติเมตร ยาว 2.5-3.5 เซนติเมตร ผลมี 3 พูๆ ละ 1 เมล็ด เมื่อสุกแก่ผลจะปริแตก ผลสด 1 กิโลกรัม มีจำนวน 85-90 ผล

2.5 เมล็ด

รูปกลมรี เปลือกนอกสีดำ เนื้อในสีขาว มีสารพิษ (curcin) หากบริโภคจะเกิดอาการ อาเจียนและท้องเสีย เมล็ดกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร ยาวประมาณ 2 เซนติเมตร น้ำหนัก 100 เมล็ด ประมาณ 70 กรัม เมล็ด 1 กิโลกรัม มีประมาณ 1,300-1,500 เมล็ด



ภาพที่ 9 เมล็ดและผลสบู่ดำ

3. การใช้เครื่องจักรกลเกษตรกับสบู่ดำ

การใช้สบู่ดำเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซล โดยหลักการแล้วสามารถแยกได้ 2 ประเภท

3.1 ไบโอดีเซลสบู่ดำ

ไบโอดีเซลสบู่ดำ หรือเอสเตอร์สบู่ดำ ปัจจุบันมีการส่งเสริมค่อนข้างมากในประเทศ อินเดีย เพื่อทดลองใช้กับยานยนต์ เช่น รถไฟ รถยนต์ ฯลฯ คุณสมบัติของไบโอดีเซลสบู่ดำจะใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ทำให้สามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ แต่ปัญหาที่สำคัญคือเกษตรกรไม่สามารถที่จะผลิตไบโอดีเซลสบู่ดำด้วยตนเองได้

3.2 น้ำมันสบู่ดำ

น้ำมันสบู่ดำ คือน้ำมันพืช (straight vegetable oil, SVO) ที่ได้จากการบีบอัดเมล็ดสบู่ดำ ปัจจุบัน บางประเทศในทวีปแอฟริกา ซึ่งน้ำมันดีเซลมีราคาสูงมากเมื่อเทียบกับรายได้ของเกษตรกร ได้มีการทดลองให้เกษตรกรเก็บเกี่ยวสบู่ดำที่ปลูกตามหัวไร่ปลายนา และบีบน้ำมันสบู่ดำด้วยเครื่องมือที่ใช้แรงงานคน แล้วนำไปตกตะกอนและกรองละเอียด เพื่อนำน้ำมันสบู่ดำมาใช้งานต่างๆ ที่ไม่สามารถทดแทนด้วยแรงงานคนหรือแรงงานสัตว์ได้ เช่น สูบน้ำ ปั่นไฟฟ้า ฯลฯ อย่างไรก็ตามแนวคิดทำนองนี้กรมวิชาการเกษตรเคยพยายามถ่ายทอดให้เกษตรกรไทยปฏิบัติตั้งแต่ปี พ.ศ. 2525 แต่ก็ไม่ได้รับการยอมรับจากเกษตรกร เพราะขณะนั้นประเทศไทยเริ่มเข้าสู่ยุคของการขาดแคลนแรงงานภาคเกษตร ค่าจ้างแรงงานภาคเกษตรมีราคาสูงใกล้เคียงกับค่าจ้างแรงงานขั้นต่ำ ขณะที่การเก็บเกี่ยวสบู่ดำ และการบีบน้ำมันสบู่ดำต้องใช้แรงงานและเวลาค่อนข้างมาก

อย่างไรก็ตามมีคุณสมบัติข้อสำคัญที่น้ำมันสบู่ดำต่างจากมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วค่อนข้างมาก ได้แก่ค่าความหนืด (kinematic viscosity) ซึ่งน้ำมันสบู่ดำมีค่าความหนืดสูงถึง 50.7 centistoke ขณะที่มาตรฐานดีเซลหมุนเร็วมีความหนืดอยู่ราว 1.8-5.0 centistoke แสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งถ้าใช้น้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิง อาจจะทำให้การฉีดน้ำมันไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพต่ำ และอาจเกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์ได้ ดังนั้นโดยหลักการแล้วถ้าจะใช้น้ำมันสบู่ดำต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ให้มีการอุ่นน้ำมันให้มีความหนืดลดลง และมีการดัดแปลงอื่นๆ อีก เช่น เปลี่ยนกรองน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้น แม้ว่าจะมีรายงานการทดลองในประเทศไทย ตั้งแต่ปี 2525 ว่าสามารถใช้น้ำมันสบู่ดำกับเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรที่ไม่ผ่านการดัดแปลง แต่ปัจจุบันเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรได้ใช้เทคโนโลยีสูงกว่าในอดีต การใช้น้ำมันสบู่ดำโดยไม่ดัดแปลงเครื่องยนต์ให้มีการอุ่นน้ำมัน และเปลี่ยนกรองน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้น จะทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพต่ำลง และอาจเกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์ได้ อย่างไรก็ตามถ้าเกษตรกรต้องการใช้น้ำมันสบู่ดำกับเครื่องยนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปลง เพื่อลดความเสี่ยง ที่จะทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์ ควรนำน้ำมันสบู่ดำไปผ่านกระบวนการตกตะกอนและกรองละเอียด และใช้น้ำมันสบู่ดำผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตรา 1 ต่อ 20 เพื่อให้ค่าความหนืดของน้ำมันที่ผสมแล้วใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และต้องตระหนักว่าปัจจุบันยังไม่มีผู้ผลิตเครื่องยนต์ดีเซลรายใดที่รับรองเป็นทางการให้สามารถใช้น้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงได้ ซึ่งถ้าเกษตรกรใช้น้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงอาจส่งผลต่อการรับประกันเครื่องยนต์ดังกล่าว (อัคคพล, 2549)

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำเปรียบเทียบกับมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วของไทย (ปี พ.ศ. 2523)

คุณสมบัติ	สบู่ดำ	มาตรฐานดีเซลหมุนเร็ว
Specific gravity	0.9188	0.82 - 0.90
Flash point (°C)	240	ไม่ต่ำกว่า 52
Cetane value	51.0	ไม่ต่ำกว่า 50
Distillation (°C)	295	ไม่สูงกว่า 370

3.3 การใช้ประโยชน์จากสบู่ดำ

3.3.1 น้ำมันสบู่ดำ

การสกัดน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำ

วิธีการสกัดแยกน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำที่นิยมทำกันมากคือ ใช้วิธีการบีบอัด (pressing) จะได้น้ำมันประมาณ 25-30% มีน้ำมันตกค้างในกาก 10-15% อาจใช้เครื่องอัดแบบไฮดรอลิก (hydraulic press) หรือเครื่องอัดแบบสกรู (screw press) การแยกด้วยวิธีนี้จะได้น้ำมันปริมาณมากหรือน้อยขึ้นกับแรงอัดที่ใช้ ถ้าใช้แรงอัดสูงจะได้น้ำมันมาก แต่น้ำมันที่ได้จะมีคุณภาพลดลง เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจะไปเร่งปฏิกิริยาเคมีบางอย่าง ทำให้น้ำมันเสื่อมเสียได้เร็วขึ้น ดังนั้นการบีบอัดอาจทำได้ 2 แบบ คือ การบีบอัดโดยใช้แรงดันสูง เพื่อให้ได้น้ำมันมาก หรือการบีบอัดแบบ pre-press โดยบีบด้วยแรงดันต่ำก่อน แล้วจึงสกัดน้ำมันที่เหลือในกากต่อด้วยสารทำละลาย (สุปรียา, 2549)

คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของน้ำมันสบู่ดำ

น้ำมันสบู่ดำจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวปนเหลือง ใส และยังคงใสที่อุณหภูมิห้อง มีคุณสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ และองค์ประกอบกรดไขมัน (รพีพันธุ์ และคณะ, 2525) ดังตารางที่ 5 และ ตารางที่ 6

การใช้ประโยชน์จากน้ำมันสบู่ดำในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ประเทศไทยเกิดการขาดแคลนน้ำมันก๊าดสำหรับจุดตะเกียง เกษตรกรทางภาคอีสานได้นำเมล็ดสบู่ดำมาตำให้ละเอียด ใช้จุดให้แสงสว่างแทนเทียนไขได้เป็นอย่างดี หรือมีการนำเอากากของเมล็ดที่สกัดน้ำมันออกแล้วมาใส่ในกระบอกไม้ไผ่ ใช้จุดแทนเทียนไขได้ดีเช่นกัน น้ำมันสบู่ดำจะมีลักษณะใสที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะทำให้สามารถใช้น้ำมันได้ในประเทศที่มีอากาศหนาวเย็น และมีค่าไอโอดีนสูงจึงมีคุณสมบัติเป็น semi drying oil คือมีคุณสมบัติในการแห้งเร็ว จึงอาจมีการนำไปใช้เป็นน้ำมันทาสีน้ำมันชักเงาได้ และในหลายประเทศมีการนำไปใช้ทำสบู่ แต่กระบวนการผลิตยังใช้ต้นทุนสูงเนื่องจากต้องมีการผสมกับไขมันจากสัตว์ น้ำมันอื่นๆ และกลิ่นหอม เพื่อให้ได้สบู่ที่มีคุณภาพสูง รวมทั้งการนำไปใช้ทำเทียนไข

ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ ของน้ำมันสบู่ดำ

คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์	ค่าการวิเคราะห์
ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid, %as oleic acid)	4.80
ค่าสaponนิฟิเคชัน (Saponification value)	197.13
ค่าไอโอดีน (Iodine value, Wijs)	97.08
ดัชนีหักเห (Refractive index) ที่ 25°C	1.4670
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ที่ 25°C	0.9136
ความหนืด (Viscosity)ที่ 25°C (cp)	45.68

ที่มา: รพีพันธุ์ และคณะ (2525)

ตารางที่ 6 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันสบู่ดำ

องค์ประกอบกรดไขมัน	ค่าการวิเคราะห์ (%)
Palmitic acid (C 16:0)	16.17
Stearic acid (C18:0)	5.11
Total saturated fatty acid	21.28
Oleic acid (C18:1)	44.88
Linoleic acid (C18:2)	33.83
Total unsaturated fatty acid	78.71

ที่มา: รพีพันธ์ และคณะ (2525)

น้ำมันสบู่ดำมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลแต่จะมีความหนืดมากกว่า รพีพันธ์ และคณะ (2525) ได้นำน้ำมันสบู่ดำมาทดลองกับเครื่องยนต์โดยนำน้ำมันสบู่ดำมาทดลองเดินเครื่องยนต์คูโบต้าดีเซล 1 สูบ แบบลูกสูบนอนระบบ 4 จังหวะ ปริมาตรกระบอกสูบ 400 ซีซี 7 แรงม้า/2200รอบต่อนาที พบว่า เครื่องยนต์เดินเป็นปกติไม่มีการน็อก ความสิ้นเปลืองน้ำมันน้อยกว่าการใช้น้ำมันดีเซลเล็กน้อย และนำน้ำมันสบู่ดำทดสอบร่วมกันกับแก๊สหุงต้ม ทดลองเดินเครื่องกับเครื่องยนต์ดีเซล พบว่าเมื่อใช้แก๊สหุงต้มด้วยจะช่วยให้เครื่องยนต์ประหยัดน้ำมันสบู่ดำได้เฉลี่ย 77.1% พร้อมทั้งได้วิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ดังนี้

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันสบู่น้ำมันดีเซลหมุนเร็วของประเทศไทย ญี่ปุ่นและประเทศไทย

รายการวิเคราะห์	จากบริษัท Fuji Koosan Oil Refinery, Tokyo Japan		จากการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย	
	น้ำมันสบู่น้ำมัน	น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว- ญี่ปุ่น ¹	น้ำมันสบู่น้ำมัน	น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว-ไทย ²
Specific gravity	0.9186	0.82-0.84	0.9188	0.82-0.90
Flash point (°C)	240	50 up	110	>52
Carbon residue (%)	0.64	0.15 less	-	<0.05
Cetane value	51.0	50 up	-	>50
Distillation (°C)	295	350 less	-	<370
Kinematic viscosity (cs)	50.73	2.7 up	-	1.8-5.0
Sulphur (%)	0.13	1.2 less	0.16	<1

1. มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น
2. มาตรฐานน้ำมันดีเซลหมุนเร็วของประเทศไทย ตามประกาศของกระทรวงพาณิชย์ ฉบับที่ 5 พ.ศ. 2523 ประกาศใน ราชกิจจานุเบกษาเล่มที่ 97 ตอนที่ 59 วันที่ 15 เมษายน 2523

จากนั้นได้ทดสอบและวิเคราะห์ไอเสีย พบว่าควันดำจากเครื่องยนต์ที่ใช้เดินด้วยน้ำมันสบู่น้ำมันค่าเฉลี่ย 13.42% และมีปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว ส่วนการตรวจหาซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากปลายท่อไอเสีย พบว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยน้ำมันสบู่น้ำมันไม่พบซัลเฟอร์ไดออกไซด์เลยในขณะที่เดินด้วยน้ำมันดีเซลหมุนเร็วพบปริมาณ 125 ppm เมื่อทำการเดินเครื่องยนต์ดีเซลครบ 1,000 ชั่วโมง ได้ถอดชิ้นส่วนของเครื่องยนต์มาตรวจสภาพพบว่าเสื่อสูบ ลูกสูบ แหวน ลิน หัวฉีดและอื่นๆ ไม่มียางเหนียวจับ ทุกชิ้นยังคงสภาพดีและได้มีรายงานของกรมส่งเสริมการเกษตรในการนำน้ำมันสบู่น้ำมันไปใช้กับเครื่องยนต์ดังนี้

- 1) นำน้ำมันสบู่น้ำมันมาทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลทุบด้า ขนาด 7 แรงม้า ที่ติดตั้งบนรถไถนาเดินตามได้ผลดี โดยไม่ต้องปรับปรุงแก้ไขเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ในอัตราเร่ง 1,500-2,000 รอบต่อนาที พบว่ามีการใช้น้ำมันสบู่น้ำมันโดยเฉลี่ย และมีควันดำไอเสีย

ใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันดีเซล เมื่อเดินเครื่องครบ 1,000 ชั่วโมง ได้ถอดชิ้นส่วน อาทิ เสื้อสูบ ลูกสูบ แหวนลิ้น หัวฉีด มาตรวจสอบความสึกหรอ พบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และไม่มียางเหนียวจับ

2) น้ำมันสนูปด้าทดสอบกับรถยนต์ดีเซล ยี่ห้อฮิซุซุ 1,584 ซีซี 94 แรงม้า โดยวิ่งบนถนนที่อัตราความเร็ว 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เครื่องยนต์ไม่ร้อนเมื่อวิ่งด้วยความเร็วปกติ ไม่ต้องตัดแปลงโครงสร้างเครื่องยนต์ ซึ่งติดตั้งและมีกำลังแรงดี สามารถเร่งความเร็วได้สูงสุดถึง 140 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3) ผสมน้ำมันสนูปด้า 10% กับน้ำมันเบนซิน 90% (โดยปริมาตร) ทดสอบกับรถจักรยานยนต์ฮอนด้า 4 จังหวะ พบว่าวิ่งได้เรียบสม่ำเสมอ แต่ถ้าผสม 15% ทำให้หัวเทียนบดง่าย เครื่องติดยาก เดินไม่สะดวก

4) ผสมน้ำมันสนูปด้า 30% กับน้ำมันเบนซิน 70% (โดยปริมาตร) ทดสอบกับรถจักรยานยนต์ฮอนด้า 2 จังหวะ พบว่าเครื่องเดินเรียบปกติ แต่ถ้าผสมเกิน 30% ทำให้เครื่องติดยาก กำลังตก เมื่อเดินเครื่อง 500 ชั่วโมงถอดส่วนต่างๆ ดู ไม่พบความสึกหรอหรือผิดปกติ

5) ผสมน้ำมันสนูปด้า 10% กับน้ำมันเบนซิน 90% (โดยปริมาตร) ทดสอบกับเครื่องปั่นไฟฮอนด้า 4 จังหวะ พบว่าได้ผลดี ไม่มีปัญหา

6) น้ำมันสนูปด้าผสมกับน้ำมันดีเซลและเบนซินได้ดี ไม่จำเป็นต้องล้างถังเมื่อใช้น้ำมันแต่ละชนิดหมดลง

นอกจากการนำน้ำมันสนูปด้ามาใช้กับเครื่องยนต์โดยตรงแล้ว ยังมีการนำน้ำมันสนูปด้ามาผลิตเป็นไบโอดีเซล โดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน แล้วนำไปใช้กับเครื่องยนต์ ซึ่งเอสเทอร์ที่ได้จะมีคุณสมบัติที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลคือมีค่า cetane number สูง ทำให้มีการเผาผลาญดีกว่า มีจุดวาบไฟสูง ทำให้ปลอดภัยในการเก็บ มีปริมาณออกซิเจนสูงถึง 10% ซึ่งจะช่วยให้สารไฮโดรคาร์บอนเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์มากกว่า และไม่มีซัลเฟอร์

3.3.2 ส่วนประกอบอื่นๆ ใบ ใช้เลี้ยงไหมอริ ใช้ทำปุ๋ยอินทรีย์ ลำต้น ปลุกเป็นแนวรั้ว ทำไม้อัด ทำกระดาด ตัดเป็นท่อนค้ำให้เด็กกินแก้โรคซางหรือตาขโมย หรือแช่น้ำอาบแก้โรคพุพอง เปลือกต้นใช้ทำสีย้อมผ้าสกัดเอาสารแทนนินมาใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง กิ่งใบ ลำต้น จากการตัดแต่งใช้เป็นเชื้อเพลิง (biomass) น้ำยาง น้ำยางจากก้านใบรักษาโรคปากนกกระจอก ห้ามเลือด แก้ปวดฟัน ผสมน้ำมันมะรูดากวาดป้ายลิ้น เด็กที่เป็นฝีขาวหรือคอเป็นตุ่ม เปลือกผลสบู่ดำใช้เป็นวัสดุเพาะชำทำปุ๋ยหมักทำน้ำหมักชีวภาพ ทำเชื้อเพลิง เมล็ด สกัดน้ำมันจากเมล็ดโดยตรง ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลที่มีรอบต่ำ น้ำมันจากเมล็ดผลิตเป็นไบโอดีเซล ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไปได้โดยตรงหรือผสมกับน้ำมันดีเซลตามอัตราที่ต้องการกลีเซอรอล ผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซล ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง กากเมล็ด หลังจากการบีบน้ำมันใช้เป็นเชื้อเพลิง ให้กับเครื่องเทอร์ไบน์ไอน้ำ (steam turbine) สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือใช้ทำปุ๋ยหมัก เมล็ดใช้เป็นยาถ่าย ยาระบาย น้ำมันจากเมล็ดใช้ทาแก้โรคผิวหนังหรือผิวหนังอักเสบ บรรเทาอาการปวดข้ออันเนื่องมาจากรูมาตอยด์ น้ำมันและสารสกัดจากน้ำมัน สามารถนำมาใช้กำจัดศัตรูพืช เช่น หนอนเจาะสมอฝ้าย ศัตรูผัก มันฝรั่งและข้าวโพด สารสกัดเมทานอลจากสบู่ดำ ซึ่งประกอบด้วยสารพิษบางชนิด มีการทดลองนำมาใช้ควบคุมพยาธิในหอยที่นำมาบริโภค (อุดมวิทย์ และอนุวัฒน์, 2549)

3.4 พืชวิทยาของสบู่ดำ (*Jatropha curcas* L.)

จากการสืบค้นและรวบรวมข้อมูลของสถาบันการแพทย์แผนไทยพบว่าทุกส่วนของสบู่ดำมีความเป็นพิษ ซึ่งส่วนใหญ่พบกับสัตว์ทดลอง (นันทวรรณ, 2549)

3.4.1 ใบ มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อและฆ่าพยาธิโดยยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียกลุ่ม *Staphylococcus*, *Bacillus* และ *Micrococcus* สำหรับยาง (sap) ที่ความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ และ 100 เปอร์เซ็นต์ สามารถฆ่าพยาธิไส้เดือนและพยาธิปากขอ และยับยั้งการเจริญของลูกน้ำยุง และยางจะมีความเป็นพิษสูงมากต่อหนูถีบจักรเมื่อเข้าทางปากหรือฉีดเข้าช่องท้อง

3.4.2 กิ่งก้านหรือส่วนต้น จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการ พบว่ามีฤทธิ์ยับยั้ง cytopathic effect ของเชื้อ HIV โดยมีพิษต่ำ

3.4.3 ผล ทดสอบกับปลาการ์ฟ พบว่าพิษของ phorbol ester ทำให้ปลาเจริญเติบโตช้าลง มีมูกในอุจจาระและไม่กินอาหาร แต่ถ้าหยุดให้ phorbol ester ปลาจะกลับมาเจริญเป็นปกติ ได้ทดสอบกับตัวอ่อนในครรภ์ของหนู พบว่าผลสบูดำทำให้หนูแท้งได้

3.4.4 เมล็ด สารพิษในเมล็ดคือ curcin มีฤทธิ์ต่อสัตว์หลายชนิดและมนุษย์ดังนี้ ฤทธิ์กับหนู พบว่าสารพิษ curcin มีฤทธิ์ยับยั้งการสร้างโปรตีน แต่ในทางกลับกันพบว่าในเมล็ดสบูดำ มีสารบางชนิด ซึ่งมีฤทธิ์เป็น tumor promoter กล่าวคือไม่เป็นสารก่อมะเร็ง แต่สามารถกระตุ้นให้เซลล์ที่มีอันติผิดปกติเนื่องของสารก่อมะเร็ง แบ่งตัวอย่างรวดเร็วและอาจพัฒนาเจริญเป็นก้อนมะเร็งได้ พิษเฉียบพลันของเมล็ดสบูดำ พิษกับหนู เมื่อให้ทางปากในหนูถีบจักร พบว่าทำให้หนูตายเนื่องจากการคั่งในหลอดเลือด และ/หรือ เลือดออกในลำไส้ใหญ่ ปอด พิษกับลูกไก่ พบว่าเมื่อนำเมล็ดมาผสมอาหารให้ลูกไก่กิน ทำให้ลูกไก่โตช้า ดับและโตโต พิษในสัตว์ เช่น แกะ แพะ ทำให้ท้องเสีย ขาดน้ำ ไม่กินอาหาร และมีเลือดออกในอวัยวะภายใน เช่น กระเพาะอาหาร ปอด ไต หัวใจผิดปกติ มีเลือดออกหลายแห่งในร่างกาย พิษที่พบในเด็ก ที่รับประทานเมล็ดสบูดำได้แก่ อาการกระสับกระส่าย คลื่นไส้ อาเจียน ท้องเดิน และขาดน้ำ พิษที่พบในผู้ใหญ่ กรณีที่เป็นสายพันธุ์ที่มีสารเป็นพิษสูง หากรับประทานเพียงแค่ 3 เมล็ด ก็เป็นอันตรายแก่ระบบทางเดินอาหาร แต่บางพันธุ์รับประทานถึง 50 เมล็ดก็ไม่เป็นอันตราย

3.4.5 ราก มีฤทธิ์ต้านอักเสบ พงรากเมื่อทานใบหูของหนูถีบจักร จะช่วยต้านอักเสบจากการถูกสาร TPA ได้ และสารสกัดด้วยเมทานอลของพงราก เมื่อให้ทางปากจะต้านอักเสบของอุ้งเท้าหนูที่ได้รับสาร carrageenan

3.4.6 ยาง ยางสบูดำทำให้เลือดแข็งตัวเร็วขึ้น (พบในคน) แต่ถ้าเจือจางมากๆ จะทำให้เลือดไม่แข็งตัว

3.4.7 ไม่ระบุส่วน ฤทธิ์ด้านการแพร่กระจายของเซลล์มะเร็งจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการ พบว่าสบูดำมีฤทธิ์ในการลด in vitro invasion และการหลั่งสารเอ็นไซม์ matrix metallo proteinase ของเซลล์

ตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalysts)

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารที่ทำปฏิกิริยา ไม่ว่าจะเป็นแก๊สหรือของเหลว ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาในสิ่งมีชีวิตที่เร่งด้วยเอนไซม์ และปฏิกิริยาในสารละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาอย่างชัดเจน ทำให้ง่ายต่อการศึกษา แต่มีข้อเสียคือมักสลายตัวหรือเสียดสภาพในสถานะที่ใช้ความร้อนหรือความดัน เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์อยู่ในวัฏภาคเดียวกับสารตั้งต้น จึงมีข้อดีคือประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูง และสามารถเลือกให้เร่งปฏิกิริยาที่ต้องการได้ง่ายกว่า อีกทั้งสถานะการทดลองที่ใช้ไม่รุนแรง สามารถศึกษากลไกของปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีต่างๆ และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการแพร่ของสารตั้งต้นไปหาตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากอยู่ในวัฏภาคเดียวกัน แต่มีข้อเสียคือการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก วิธีการที่ใช้ส่วนใหญ่คือการกลั่นหรือการสกัดด้วยตัวทำละลาย และการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ทำได้ยากกว่า และอายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์นั้นสั้นกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์

1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalysts)

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างจากสารที่ทำปฏิกิริยา เช่นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สหรือของเหลว การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์พบได้ในอุตสาหกรรมหลาย ๆ อย่าง เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน เชื้อเพลิงเส้นใยสังเคราะห์ ตัวทำละลาย เนื่องจากสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือได้ง่ายกว่าระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ ข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์คือ สามารถแยกสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่าย สามารถใช้ได้ ในสถานะที่อุณหภูมิ และ/หรือ ความดันสูงได้ ตัวเร่งปฏิกิริยามีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และอาจนำกลับมาใช้ได้ยากกว่า แต่มีข้อเสียคือใช้สถานะของปฏิกิริยาสูงและมีปัญหาเกี่ยวกับการแพร่ของสารตั้งต้นไปหาตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากอยู่ในวัฏภาคที่ต่างกัน

2. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ (Metal Supported Catalysts)

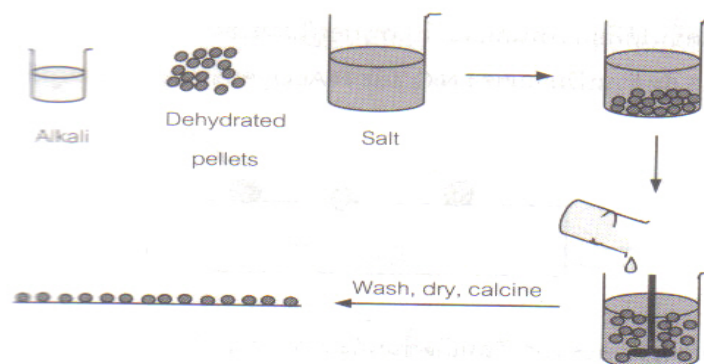
การทำให้ออกไซด์กระจายตัวบนตัวรองรับเป็นวิธีการที่นิยมมาก สามารถทำได้ 4 วิธีคือการตกตะกอน การดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออน และการทำให้ชุ่มชื้น (impregnation) แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสีย ซึ่งต้องพิจารณาจากการใช้ ตัวรองรับที่ให้อาจเป็นผงหรือเป็นก้อนเล็ก ๆ ในการเติมองค์ประกอบโลหะลงไปบนผิวหน้าด้านในของตัวรองรับ อาจมีข้อจำกัดเรื่องการแพร่เข้าไปในรูพรุน

2.1 การตกตะกอน

การตกตะกอนคือการทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างผงอนุภาคของตัวรองรับกับเกลือของสารละลายซึ่งอาจจะเป็นออกซาลेट ไนเตรต ซัลเฟต หรือคลอไรด์ ในตัวกลางที่เป็นเบส เช่น NaOH, KOH, NH_4OH , NaCO_3 หรือ NaHCO_3 ทำให้ได้ไฮดรอกไซด์หรือคาร์บอเนตของโลหะที่ไม่ละลายในน้ำสารเหล่านี้สามารถเปลี่ยนเป็นออกไซด์ได้โดยการให้ความร้อน การตกตะกอนเหมาะกับการเตรียมเพื่อให้มีปริมาณโลหะ (loading) ประมาณ 10-20% ถ้าต้องการปริมาณที่ต่ำกว่านี้ ควรพิจารณาใช้วิธีอื่น

การเตรียมทำได้โดยการคลเคล้ากันของผงของตัวรองรับกับสารละลายเกลือตามปริมาณที่เหมาะสมก่อนการทำปฏิกิริยา แต่ในบางกรณีตัวรองรับอาจจะต้องดูดไล่อากาศในตัวรองรับเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีอากาศในรูพรุน หลังจากนั้นจึงเติมสารละลายที่เป็นเบสเพื่อให้เกิดการตกตะกอน ขั้นตอนคือการกรองหรือการแยก แล้วล้างกำจัดสารต่างๆ ได้แก่ สารละลายที่เป็นเบส ซึ่งเป็นไอออนของสารตั้งต้น และสารที่จับอยู่บนผิวหน้าที่มากเกินไปออก ขั้นตอนการผลิตแสดงไว้ในภาพที่ 10 กระบวนการที่เกิดขึ้นในการจับตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับหรือการตกตะกอนของโซล บนผิวหน้าและภายในรูพรุนของตัวรองรับ และอันตรกิริยาระหว่างไฮดรอกไซด์หรือคาร์บอเนตของโลหะกับผิวหน้า การเกิดปฏิกิริยาจะดียิ่งขึ้นถ้าหมู่ไฮดรอกไซด์ของตัวรองรับเริ่มเกิดปฏิกิริยาด้วย ในการตกตะกอนนี้ สิ่งที่เราควรหลีกเลี่ยงคือการเกิดนิวคลีเอชัน และการเพิ่มขนาดของตะกอนอย่างรวดเร็ว เนื่องจากโซลขนาดใหญ่ซึ่งไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนได้ง่าย และอาจจะจับอยู่ที่ผิวนอกเท่านั้น การลดอัตราเร็วในการเกิดนิวคลีเอชันสามารถทำได้โดยการผสมสารละลายเบสลงไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เย็น การดัมหรือการสั่นแรงๆ (turbulence) และการผสมสารละลายเข้าด้วยกันต้องเป็นไปอย่างต่อเนื่อง หลังจากล้างแล้ว อบตัวรองรับให้แห้งเพื่อไล่น้ำที่ตกค้างอยู่ในรูพรุน แม้ว่าขั้นตอนนี้จะไม่มีปัจจัยใดที่วิกฤตแต่การให้ความ

ร้อนต้องระวังไม่ให้เกิดความดันจากไอน้ำมากเกินไป ขั้นตอนถัดมาคือการคลี่ไนซ์เพื่อเปลี่ยนไฮดรอกไซด์และคาร์บอเนต ให้อยู่ในรูปของโลหะหรือออกไซด์ที่จับอยู่บนอะลูมินาจะสลายตัวเป็นออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 °C ในขณะที่นิเกิลไฮดรอกไซด์หรือซัลไฟด์ มีเสถียรภาพถึงที่อุณหภูมิ 600 °C

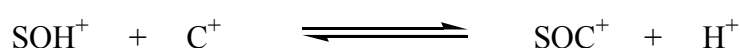


ภาพที่ 10 ขั้นตอนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการตกตะกอน
ที่มา: จตุพร และนุรักษ์ (2547)

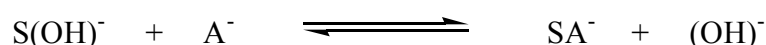
2.2 การดูดซับ

คือการนำเอาวัสดุที่เป็นตัวรองรับมาแช่ในสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมกับการดูดซับ การดูดซับเป็นวิธีการที่เหมาะสมเมื่อต้องการปริมาณองค์ประกอบกัมมันต์ต่ำ ผงหรืออนุภาคจะถูกนำมากำจัดน้ำและทำให้ชุ่มในสารละลายที่เหมาะสมในเวลาที่พอเหมาะ การจับแบบนี้จะสม่ำเสมอและองค์ประกอบกัมมันต์ จะเข้าไปจับในรูพรุนอย่างทั่วถึงระหว่างการทำให้ชุ่ม โดยทั่วไปการดูดซับไอออนิกจะมีสมดุล (equilibrium) เกิดขึ้นดังนี้

สมดุลสำหรับไอออนบวก (C^+) โดย S คือหมู่ฟังก์ชัน



และ สมดุลสำหรับไอออนลบ (A)

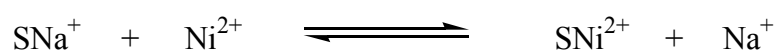


หาสมมูลได้จากความเข้มข้นของ C^+ และจากค่าฟิเชอร์สำหรับตัวดูดซับไอออนบวก C นั้น สัมพรรคภาพ (affinity) เรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ $C^{4+} > C^{3+} > C^{2+} > C^+ \sim H^+$ ส่วนการดูดซับไอออนลบนั้นจะขึ้นกับสภาพการเกิดขั้ว (polarizability) และประจุของไอออนลบ ดังนั้นลำดับของการดูดซับจะเป็นดังนี้ $SO_4^{2-} > I^- > Br^- > Cl^- > F^-$

ข้อเสียของเทคนิคการดูดซับคือปริมาณที่ทำให้เกิดการอิ่มตัวมีค่าต่ำ ตัวอย่างเช่น ในสารละลายนิกเกิล และอะลูมินา สามารถเตรียมให้มีปริมาณโลหะได้เพียง 2-3% เท่านั้น การดูดซับหลายครั้งจะทำให้ได้ปริมาณโลหะที่สูงขึ้น แต่ต้องใช้เวลามาก ซึ่งการใช้วิธีอื่นอาจจะเหมาะสมกว่า

2.3 การแลกเปลี่ยนไอออน

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนจะเหมือนกับการดูดซับแบบไอออนิก เพียงแต่มีการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นนอกเหนือจากโปรตอน ไอออนที่มีประจุต่ำ เช่น Na^+ จะแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุสูงกว่า เช่น Ni^{2+} และมีสมมูลเกิดขึ้นดังนี้ (S คือหมู่ฟังก์ชันใดๆ)

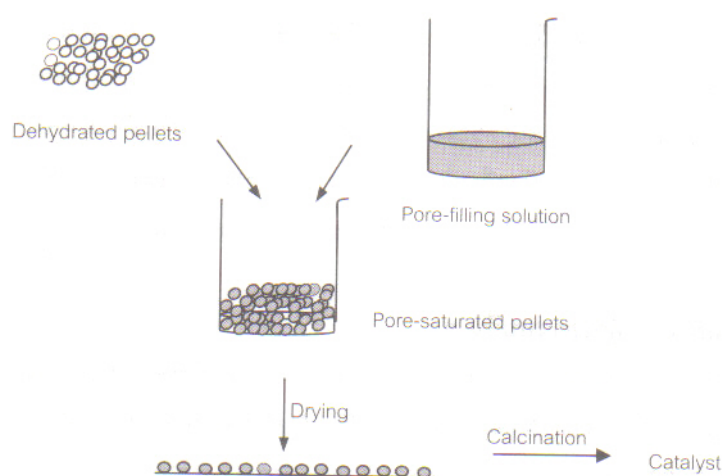


การแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อไอออนตัวใหม่ที่เข้ามาแทนที่สามารถจับกับตัวรองรับได้แข็งแรงกว่าไอออนเดิม ส่วนใหญ่เมื่อพูดถึงการแลกเปลี่ยนไอออน เรามักจะนึกถึงการแช่ตัวรองรับลงในสารละลายของเกลือของโลหะที่ต้องการแลกเปลี่ยน แล้วจนได้ปริมาณการแลกเปลี่ยนที่ต้องการ ข้อดีของการแลกเปลี่ยนไอออนก็จะได้การกระจายตัวของไอออนโลหะที่เป็นเนื้อเดียว แต่การแลกเปลี่ยนมีข้อจำกัดเนื่องจากต้องใช้เวลาาน และเมื่อการแลกเปลี่ยนอิ่มตัวแล้วจะไม่สามารถเพิ่มปริมาณไอออนได้อีก

2.4 การจุ่มชุ่ม (Impregnation)

เทคนิคการจุ่มชุ่ม เป็นเทคนิคที่ง่ายและสะดวกที่สุด เพราะเป็นการจับตัวรองรับโดยตรงจุดประสงค์คือการเติมรูพรุนด้วยสารละลายเกลือของโลหะที่มีความเข้มข้นเพียงพอสำหรับค่าปริมาณโลหะที่ต้องการ สารละลายที่ใช้ต้องมีปริมาณที่เติมรูพรุนได้พอดี เรียกว่าค่า incipient wetness ขั้นตอนการเตรียมแสดงในภาพที่ 11 เริ่มจากการให้ความร้อนแก่ตัวรองรับหรือนำไปดูด

อากาศออกด้วยสุญญากาศเพื่อกำจัดความชื้นในรูพรุนซึ่งจะช่วยให้การแพร่ของสารละลายเข้าไปในรูพรุนได้ดีขึ้น จากนั้นหยดสารละลายในปริมาณที่พอดีที่จะเติมรูพรุนและทำให้ผิวหน้าภายนอกของตัวรองรับเปียกพอดี ลงไปบนตัวรองรับ ซึ่งปริมาณดังกล่าวสามารถคำนวณได้ก่อนการเตรียมจากปริมาตรของรูพรุนหรือทำการทดสอบก่อนโดยใช้ตัวทำละลายหยดลงบนตัวรองรับที่ทราบปริมาณแน่นอนแล้วทำการวัดปริมาตรที่ทำให้ตัวรองรับเปียกพอดี แล้วจึงนำปริมาตรตัวทำละลายที่ได้มาใช้ในการคำนวณความเข้มข้นของสารละลายเพื่อให้ได้ปริมาณโลหะ ตามต้องการ



ภาพที่ 11 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการทำให้ชุ่มชื้น

ที่มา: จตุพร และนุรักษ์ (2547)

การทำแห้งจะทำให้เกิดการตกผลึกของเกลือบนผิวหน้าของรูพรุน ขั้นตอนนี้ถ้าไม่ระวังอาจจะทำให้การกระจายตัวของสารในรูพรุนไม่สม่ำเสมอ ถ้าการทำให้แห้งช้าเกินไปจะทำให้สารละลายเคลื่อนลงไปอยู่ด้านล่างของรูพรุนก่อนเกิดการตกตะกอน ทำให้ผลึกที่ได้อยู่ตอนล่างของรูพรุน ทำให้ผลึกเกิดขึ้นเฉพาะช่วงบนของรูพรุน การทำให้แห้งในอัตราเร็วที่เหมาะสมจะทำให้ได้ขนาดของผลึกที่เท่า ๆ กัน แต่เนื่องจากความหลากหลายของขนาดและรูปร่างของรูพรุน จึงเป็นการยากที่จะหาสภาพที่เหมาะสมที่สุดของรูพรุนแต่ละแบบ ต้องทำการทดลองเพื่อหาอัตราที่เหมาะสมที่สุด

การคัลไซน์เป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ เพราะถ้าตัวเร่งปฏิกิริยาเจอกับความชื้นในอากาศ ผลึกในรูพรุนอาจจะละลายในน้ำที่เกิดการควบแน่นได้ การคัลไซน์เป็นการเปลี่ยนเกลือโลหะให้อยู่ในรูปของโลหะหรือออกไซด์ และจะหยุดการกระจายของสารละลายได้

3. ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะชนิดไม่มีตัวรองรับ

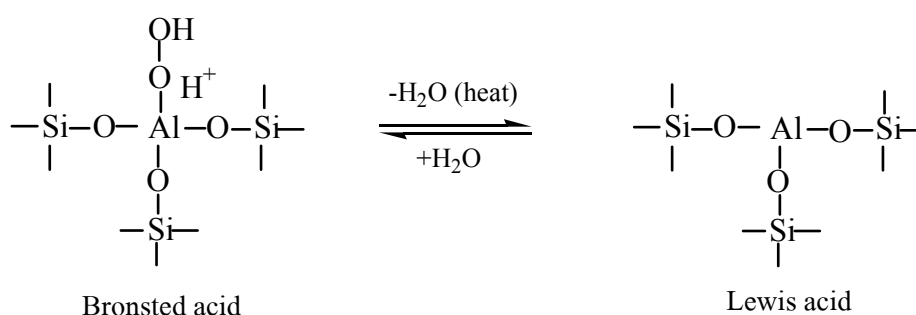
ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะชนิดไม่มีตัวรองรับ (unsupported metal) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับในระบบที่ตัวกลางเป็นของเหลว การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะชนิดไม่มีตัวรองรับนั้น มีความสะดวกน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดมีตัวรองรับ อย่างไรก็ตามความน่าสนใจในงานบางประเภทยังจำเป็นต้องใช้โลหะชนิดไม่มีตัวรองรับชนิดละเอียด ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ได้แก่ คอลลอยด์ของแพลทินัม การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไม่มีตัวรองรับนี้ ทำได้โดยนำเอาสารละลายของกรดคลอโรแพลตินิก มาทำให้เจือจางโดยการเติมสารประกอบโซเดียมซิเตรต (sodium citrate) ซึ่งทำให้เกิดอนุภาคมีขนาดเท่ากันตลอด โดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 1.5 นาโนเมตร

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาดเล็กและมีขนาดเท่ากันนั้นทำได้ยาก ดังนั้นจึงต้องมีการทำงานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคนิคการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาดเล็ก ซึ่งโดยมากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทที่เรียกว่า เรนนิคเกิล (Raney nickel) หรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีนิกเกิลเป็นแกน (skeletal nickel) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้เตรียมได้จากการทำอัลลอยของโลหะนิกเกิลกับอะลูมิเนียมด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่เท่ากัน และนำอัลลอยที่เตรียมได้ไปละลายด้วยสารละลายเบส เพื่อละลายเอาอะลูมิเนียมออกจากอัลลอยของนิกเกิล-อะลูมิเนียม อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ยังคงมีอะลูมิเนียมและอะลูมินาหลงเหลืออยู่ สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไม่มีตัวรองรับตัวอื่นๆ ทำได้เช่นเดียวกับตัวเร่งปฏิกิริยาเรนนิคเกิล โดยใช้โลหะชนิดอื่นๆ แทนนิกเกิลหรืออะลูมิเนียม (วิทยา, 2547)

4. ตัวเร่งปฏิกิริยากรด (Acid catalyst)

ในการเกิดปฏิกิริยา cracking, polymerization และ isomerization ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะต้องมีสมบัติเป็นกรด และสามารถทำให้เกิด carbonium ion ซึ่งเป็นสารตัวกลาง (intermediate) เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ตำแหน่งที่มีฤทธิ์เป็นกรด (acid site) อาจจะเป็นแบบบรอนสเตด (brønsted acid site) ซึ่งทำหน้าที่ให้โปรตอนไปยังสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated hydrocarbon) หรือเป็นชนิดลิวอิส (Lewis type) ที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนโดยการดึง hydride ion

แหล่งที่มาของความเป็นกรด (source of acidity) เช่นในกรณีของซิลิกา-อะลูมินา หรือ mixed-oxide catalyst แหล่งที่มาของความเป็นกรดอาจอธิบายได้ในเทอมของทฤษฎีที่ถูกพัฒนาขึ้นมาโดย Linus Pauling ถ้าไอออนของอะลูมินาซึ่งมีประจุ +3 ไปแทนที่ไอออนของซิลิกอน (มีประจุ +4) อย่างสม่ำเสมอ ในโครงสร้างผลึกของซิลิกา ที่ประกอบด้วยซิลิกาเตตระฮีดรอน ประจุที่เป็นลบจะต้องถูกทำให้เป็นกลางโดยประจุบวก อย่างเช่น โปรตอน ที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำ และไปเกิดเป็นไฮดรอกซิล (hydroxyl group) บนอะตอมของอะลูมิเนียม โครงสร้างที่ได้จะมีคุณสมบัติเป็น bronsted acid เมื่อ อะลูมิเนียมและซิลิกาทั้งคู่เป็นเตตระฮีดรอน ถ้ามีการให้ความร้อน โมเลกุลของน้ำจะหลุดออกมา และตำแหน่งที่เป็น bronsted acid จะเปลี่ยนไปเป็นตำแหน่งที่เป็น lewis acid แทนดังแสดงในภาพที่ 12 อะตอมของอะลูมิเนียมมีสมบัติเป็นอิเล็กโตรไฟล์ (electrophile) และสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ทำให้เกิด carbonium ion ที่ดูดซับบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาในกรณีของ mixed-oxide ในตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่นๆ เช่น $\text{SiO}_2\cdot\text{MgO}$, $\text{SiO}_2\cdot\text{ZrO}$ และ $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{MgO}$ ก็สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน (Satterfield, 1991)



ภาพที่ 12 โครงสร้างซิลิกา-อะลูมินาที่ทำให้เกิด Bronsted acid และ Lewis acid

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Corma *et al.* (1997) ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันไตรโอล์อิน (triolein) และน้ำมันเรพ (rapeseed oil) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสเช่น Cs-MCM, Cs-sepiolite, MgO และไฮโดรทาลไซต์ (hydrotalsite) ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง โดยได้ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้นเป็นร้อยละ 26, 45 และ 92 ตามลำดับ

Vicente *et al.* (1998) ได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิธีพันธุเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ที่สถานะเดียวกัน โดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), Zirconium-based และ immobilized lipase เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน ที่สถานะอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง พบว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์สูงสุด ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา zirconium-based และ immobilized lipase พบว่าไม่เกิดผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์

Gryglewicz (1999) ได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิธีพันธุ ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดเรพ (rapeseed oil) ไปเป็นเมทิลเอสเทอร์ งานวิจัยนี้พบว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของ น้ำมันเมล็ดเรพ กับเมทานอลสามารถถูกเร่งปฏิกิริยาได้โดยใช้เบสออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แบเรียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ba}(\text{OH})_2$) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแคลเซียมเมทอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{Me}_3\text{O})_2$) จากการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ba}(\text{OH})_2$) เมื่อทำปฏิกิริยากับเมทานอลแล้วจะเกิดเป็นสารประกอบแบเรียมเมทอกไซด์ ($\text{Ba}(\text{CH}_3\text{O})_2$) ซึ่งมีความเป็นพิษ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแคลเซียมเมทอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{Me}_3\text{O})_2$) นั้นมีความน่าสนใจที่ราคาถูกแต่พบว่าให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ต่ำ ดังนั้นจึงต้องมีการกระตุ้นโดยอาศัยคลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic) ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมเมทอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{Me}_3\text{O})_2$) และใช้สารเตตระไฮโดรฟูแรน (THF) ในปริมาณร้อยละ 10 เป็นตัวทำละลายร่วม สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยจะให้ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์สูงถึงประมาณร้อยละ 90 – 93 และผลที่ได้ก็ใกล้เคียงกับการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Crabbe *et al.* (2001) ได้แสดงความเห็นว่าน้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil) เป็นน้ำมันพืชที่สำคัญ 1 ใน 4 ของตลาดโลก และมีราคาถูกกว่าน้ำมัน canola น้ำมันเมล็ดเรพ (rapeseed) และน้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งมีความเหมาะสมในการใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลมากกว่าน้ำมันชนิดอื่น เพราะได้เปรียบ

ในแง่ของต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า โดย Crabbe และคณะได้ทำการทดลองผลิตเมทิลเอสเทอร์โดยใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยนำน้ำมันปาล์มดิบมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน กับ เมทานอลเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล จากผลการทดลองสรุปว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเพื่อเปลี่ยนน้ำมันปาล์มดิบให้อยู่ในรูปของเมทิลเอสเทอร์ ควรใช้สัดส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเชิงโมลเท่ากับ 40 ต่อ 1 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริก 5% ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 ชั่วโมง

Leclercq *et al.* (2001) ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันเรพ (rapeseed oil) โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอจาไซต์ (Na faujasite) และไฮโดรทาลไซต์ที่ใช้ในทางการค้า (commercial hydrotalsite) มาทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับซีเรียม โดยทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเรพเท่ากับ 275 ต่อ 1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 22 ชั่วโมง โดยมีการไหลย้อนของเมทานอล (methanol reflux) ได้ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดซีเรียมที่แลกเปลี่ยนไอออนกับโซเดียมฟอจาไซต์และไฮโดรทาลไซต์ ร้อยละ 70 และ 34 ตามลำดับ

Supress *et al.* (2001) ศึกษาปฏิกิริยา alcoholysis ระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้หินแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา 18 นาที ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ให้ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้นเท่ากับ 78 เปอร์เซ็นต์ และที่ 260 องศาเซลเซียส ให้ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้นมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์

Al-Widyan and Al-Shyoukh (2002) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซล โดยการนำน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาดำเนินไปของปฏิกิริยา และศึกษาการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงดีเซล โดยทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กรดซัลฟิวริกและไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างๆ กับเมทานอลในปริมาณที่มากเกินไป จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นสูงขึ้น (1.5-2.25M) จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยลง และพบอีกว่าซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 2.25 โมล นอกจากนั้นแอลกอฮอล์ที่ 100% excess จะมีผลต่อการลดลงของเวลาที่ทำปฏิกิริยาลดด้วย

โดยทั่วไปแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีอัตราเร็วของปฏิกิริยา และผลผลิตสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดมาก จึงเป็นที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมากกว่าดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่จึงสนใจตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสเป็นหลัก

Antolin *et al.* (2002) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกรณ์แบบกะ เพื่อทดสอบสภาวะที่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน เป็นเมทิลเอสเทอร์ คือ 0.28% w/w ของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ทำปฏิกิริยากับน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันในตัวทำละลายเมทานอลที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 35 ต่อ 1 โดยปริมาตร และใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส พบว่าเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้ค่าเปอร์เซ็นต์ผลได้ของเมทิลเอสเทอร์สูงถึงร้อยละ 96 ของปริมาณน้ำมันเริ่มต้น

แต่เป็นที่น่าสนใจว่า สารตั้งต้นในกระบวนการนี้ต้องปราศจากน้ำ หรือมีปริมาณน้ำผสมอยู่น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ในสารดังกล่าว จะสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาบางส่วนให้เปลี่ยนเป็นปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน(saponification) แทนที่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของสบู่แทน เป็นการลดปริมาณผลผลิตของไบโอดีเซลให้น้อยลง ซึ่งเห็นว่า สารตั้งต้นที่ใช้โดยเฉพาะน้ำมันพืชต้องแห้ง และ ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เมื่อทำปฏิกิริยากับเมทานอล จะเกิดน้ำในปฏิกิริยาดังสมการที่ 13 ซึ่งน้ำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนปฏิกิริยาและมีสบู่เกิดขึ้นแทนผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์

การนำน้ำมันจากพืชมาเป็นเชื้อเพลิงทดแทน สำหรับในส่วนของ ไบโอดีเซล ได้ทำการทดลอง โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่อุณหภูมิในช่วง 60-80 องศาเซลเซียส และใช้โซเดียมเมทอกไซด์ (NaOCH_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยพบว่า ปฏิกิริยาเกิดได้ดีและให้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างสูง อีกทั้งใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยมาก คือ 40 นาทีเนื่องจาก โซเดียมเมทอกไซด์จะถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทันที โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการรวมตัวกับเมทานอลก่อน ทำให้ประหยัดเวลาในผลิตลงส่วนหนึ่ง แต่เนื่องจากว่า โซเดียมเมทอกไซด์เป็นสารที่มีราคาสูง จึงไม่นิยมนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จึงมีผู้สนใจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้น หรือตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ ที่สามารถควบคุมชนิดของผลิตภัณฑ์ และมีความว่องไวในปฏิกิริยาเช่นเดียวกัน จากโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งไม่รวมตัวกับสารตั้งต้น ทำให้มีข้อได้เปรียบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์อยู่คือตัวเร่งปฏิกิริยาจะอยู่ต่างเฟสกับสารตั้งต้นและสามารถกรองแยกออกได้ง่าย ไม่ต้องผ่านขั้นตอนการล้างด้วยน้ำ เพื่อเลี่ยงปัญหาการเกิดน้ำในปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังถือเป็นการลดขั้นตอนในการผลิตและลดต้นทุนของน้ำมันไบโอดีเซลได้

Mustafa (2003) ได้ทำการศึกษาออกไซด์ของไนโตรเจนอิมัลชันจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซล โดยได้ทำการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จากน้ำมันถั่วเหลืองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตให้ผลของผลิตภัณฑ์ออกมาค่อนข้างดีกว่า เมื่อเทียบกับแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ แต่ยังคงต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์

Galen *et al.* (2004) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ระหว่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ (metal catalyst) ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซิงค์คาร์บอเนต (ZnCO_3) นิกเกิล (nickel) พาเลเดียม (palladium) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) กับ ซีโอไลต์ (zeolite) โดยให้ปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิ 60, 120 และ 150 องศาเซลเซียส โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาทำให้ร้อนก่อนที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ก่อนจะนำไปใช้ในการเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 60 ไปเป็น 150 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเมทิลเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยจะพบว่า ซิงค์ออกไซด์ ให้เปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นสารประกอบโลหะตัวอื่นคือร้อยละ 80 ในขณะที่ซีโอไลต์มีการจัดเรียงตัวที่ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทำให้เกิดการแพร่ผ่านรูพรุนที่ดีกว่า งานวิจัยสรุปว่าซีโอไลต์ให้ค่าการแปลงผัน (conversion) เท่ากันที่อุณหภูมิต่ำกว่า และได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์เป็นร้อยละ 95 ซึ่งสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ

Kim *et al.* (2004) ได้ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ โดยได้ทำการทดลองโดยใช้ $\text{Na}/\text{NaOH}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ร่วมกับนอร์มอลเฮกเซน (n-hexane) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายร่วม (co-solvent) ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และให้เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง จากการทดลอง

พบว่าเมื่อใช้ $\text{Na}/\text{NaOH}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ในการเร่งปฏิกิริยาร่วมกับตัวทำละลายร่วมที่สถานะเดียวกันจะให้ร้อยละผลได้สูงเมื่อเทียบกับการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

Ebiura *et al.* (2005) ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันไตรโอะลีน (triolein) โดยใช้ลูมินาที่มีโลหะของเบสอยู่ที่ผิว ($\text{K}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$) โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 333 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงได้เปอร์เซ็นต์ของผลผลิต (%yield) ของเมทิลโอเลอเอต (methyl oleate) และกลีเซอรอล เท่ากับ 94 และ 89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Kim *et al.* (2004) ทำการทดลองโดยใช้น้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalyst) คือ $\text{Na}/\text{NaOH}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล (stainless steel) ขนาด 100 มิลลิลิตร มีใบกวนและขดลวดให้ความร้อน โดยความร้อนจะถูกควบคุมแบบ proportional integral derivative (PID) โดยใช้น้ำมันถั่วเหลืองจำนวน 50 มิลลิลิตร เมทานอลจำนวน 18.3 มิลลิลิตร ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันถั่วเหลืองเป็น 9:1 ตัวทำละลายร่วมที่เลือกใช้ คือ n-hexane เป็นจำนวน 10 มิลลิลิตร และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ $\text{Na}/\text{NaOH}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ จำนวน 1 กรัม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วใบกวน 300 รอบต่อนาที ปฏิกิริยาสิ้นสุดที่ 2 ชั่วโมง ผลการทดลองที่ได้ผลผลิตที่เป็นไบโอดีเซลมากถึง 94 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลการทดลองใกล้เคียงกับตัวเร่งชนิดเบส (โซเดียมไฮดรอกไซด์) และใช้ตัวทำละลายร่วมเป็นเฮกเซนจะทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นอีก 5-7 เปอร์เซ็นต์ จากเดิมที่ไม่ได้ใส่ตัวทำละลายร่วม เพราะตัวทำละลายร่วมทำหน้าที่ให้น้ำมันกับเมทานอลรวมตัวกันดีขึ้นโดยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างตัวทำละลายร่วมและน้ำมันถั่วเหลืองเป็น 1:5

Suppes *et al.* (2004) ได้ทดลองใช้น้ำมันถั่วเหลืองจำนวน 0.3 มิลลิลิตร และตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 0.03 กรัม โดยตัวเร่งปฏิกิริยาถูกทำให้เป็นผงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดี จากผลการทดลองของ Suppes *et al.* (2004) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ETS-10 zeolite ให้ผลผลิตของไบโอดีเซล (methyl ester) มากที่สุดซึ่งมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Faujasite ประมาณ 4 เท่า ซึ่ง ETS-10 zeolite มีค่าการแปลงผันถึง 92 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 3 ชั่วโมง เพราะเนื่องจาก ETS-10 zeolite มีความเป็นเบสมากกว่า Faujasite และ ETS-10 zeolite ยังมีรูพรุนมากกว่า Faujasite จึงทำให้อนุภาคมีการแพร่ได้ดีขึ้น

Vicente *et al.* (1998) ผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันทานตะวันได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกันทั้งที่เป็นแบบกรดและเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (homogeneous catalyst) และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalyst) เพื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์การแปลงผันของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า NaOH ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การแปลงผันมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ แต่ตัวเร่งที่เป็นเซอร์โคเนียม (zirconium) มีค่าเปอร์เซ็นต์การแปลงผันน้อยที่สุด ซึ่งจากทฤษฎีพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์จะได้เปอร์เซ็นต์การแปลงผันสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ แต่เนื่องจากว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์จะแยกผลผลิตไบโอดีเซลได้ยากกว่าตัวเร่งแบบวิวิธพันธ์ และการทดลองครั้งที่ 2 ของ Vicente *et al.* (1998) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชัน จากการทดลองพบว่าผลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมากกว่าอุณหภูมิโดยทั้ง 2 การทดลอง ใช้ความดันที่ 1 บาร์ เนื่องจากถ้าใช้ความดันสูงจะทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงตามไปด้วย อุณหภูมิที่ทำการทดลองคือ 60 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่ใช้จะต้องไม่เกินจุดเดือดของสารตั้งต้น เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคือ 8 ชั่วโมง น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของ เมทานอล อยู่ในช่วง 0.5-1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมันพืชเท่ากับ 6:1 พบว่า โซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าการแปลงผันสูงที่สุดคือ 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธ์ให้ค่าการแปลงผันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Jitputti *et al.* (2006) ได้ทำการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์หลายชนิดในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันมะพร้าวได้แก่ ZrO_2 , ZnO , SO_4^{2-}/SnO_2 , SO_4^{2-}/ZrO_2 , $KNO_3/KLzeolite$ และ KNO_3/ZrO_2 ผลการทดลองพบว่า SO_4^{2-}/ZrO_2 และ SO_4^{2-}/SnO_2 มีความสามารถทำปฏิกิริยา (activity) สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ โดยในน้ำมันปาล์มตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองต่างให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ (methyl ester yield) สูงถึง 90.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผลจากน้ำมันมะพร้าวก็นั้นเหมือนกันคือได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ สูงสุดคือ 86.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ SO_4^{2-}/ZrO_2 และ 80.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ SO_4^{2-}/SnO_2 จะเห็นได้ว่า SO_4^{2-}/ZrO_2 และ SO_4^{2-}/SnO_2 ต่างมีประสิทธิภาพสูงทั้งในน้ำมันปาล์มและน้ำมันมะพร้าว

Kumar *et al.* (2005) ได้ทดลองนำน้ำมัน Pongamia pinnata ผสมกับเมทานอลโดยผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ตัวเร่งปฏิกิริยาคือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมัน Pongamia pinnata กับเมทานอลเท่ากับ 1:10 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าให้ผลผลิตไบโอดีเซล (methyl ester) สูงถึง 92 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อมีการใช้ตัวทำละลายร่วม (co-solvent) ได้

ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเป็น 95 เปอร์เซ็นต์ และการทดลองที่ 2 ของ Kumar *et al.* (2005) ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ที่เป็นของแข็งได้แก่ HB-zeolite, montmorillonite K-10 และ ZnO ซึ่งอัตราส่วนโมลระหว่างน้ำมัน Pongamia pinnata กับเมทานอลเป็น 1:10 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้ ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลผลิตไบโอดีเซลมากที่สุดเป็น 83 เปอร์เซ็นต์ ส่วน HB-zeolite และ montmorillonite K-10 ได้ผลผลิตไบโอดีเซลประมาณ 47-59 เปอร์เซ็นต์

Ebiura (2005) ได้รายงานเกี่ยวกับการนำอะลูมินา มาทำปฏิกิริยากับเกลือของโลหะอัลคาไล (alkali metal salt) โดยนำมาใช้เป็นตัวเร่งสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรโอเลอีนกับเมทานอลและปฏิกิริยาไกลเซอโรไลซิส (glycerolizes) ของไตรโอเลอีนกับกลีเซอรอล โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเกลือของโลหะอัลคาไลที่ทำปฏิกิริยากับอะลูมินานั้นมีผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ในปฏิกิริยาซึ่งต้องทำการศึกษา เช่น สัดส่วนของเมทานอลกับไตรโอเลอีนกับปริมาณผลิตภัณฑ์ของผลได้ (methyl oleate) และผลกระทบของน้ำต่อปฏิกิริยาที่มีต่อตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ จะมีน้ำอยู่ด้วยซึ่งวัตถุดิบอาจมีผลต่อการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา

Wenlei Xie *et al.* (2006) ได้ทำการทดลองใช้ตัวเร่งวิวิธพันธุ์ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้ $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยที่จะทำการศึกษาดัชนีตัวเร่งที่ได้จากการเตรียม และสถานะในการทำปฏิกิริยา นั่นคือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกับเมทานอล, ปริมาณตัวเร่งที่ใช้ในปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยา ตัวเร่งที่ได้จากการเตรียม 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 wt% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยที่วิธีการเตรียมตัวเร่ง ใช้วิธีการจุ่มชุ่ม (Impregnation)

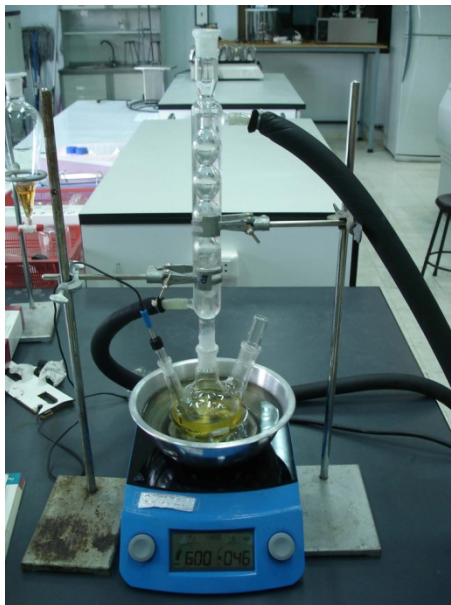
ในการทำปฏิกิริยา ตัวเร่งที่ให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่มากที่สุด คือ 35 wt% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในการเผา (Calcine) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง, อัตราส่วนโดยโมลของ เมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง เป็น 15:1, เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 7 ชั่วโมง, ปริมาณตัวเร่งเป็น 6.5 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำมัน ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์การแปลงผัน 87%

Wenlei Xie *et al.* (2006) ได้ทำการทดลองใช้ตัวเร่งวิวิธพันธุ์ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้ $\text{KI}/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยที่จะทำการศึกษาดัชนีตัวเร่งที่ได้จากการเตรียม และสถานะในการทำปฏิกิริยา นั่นคือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกับเมทานอล, ปริมาณตัวเร่งที่ใช้ในปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยา ตัวเร่งที่ได้จากการเตรียม 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 wt% $\text{KI}/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยที่วิธีการเตรียมตัวเร่ง ใช้วิธีการจุ่มชุ่ม (Impregnation) ในการทำปฏิกิริยา ตัวเร่งที่ให้เปอร์เซ็นต์การ

เปลี่ยนแปลงที่มากที่สุด คือ 35 wt% KI/Al_2O_3 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในการเผา (Calcine) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง, อัตราส่วนโดยโมลของ เมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง เป็น 15:1, เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง, ปริมาณตัวเร่งเป็น 2.5 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำมัน ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง 96%

อุปกรณ์วัสดุปิโตรเลียมเคมีและวิธีการ

อุปกรณ์



ภาพที่ 13 เครื่องแก้วและชุดอุปกรณ์แบบกะ

1. เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดถึงตำแหน่งที่ 4
2. เครื่องให้ความร้อนไฟฟ้า (hot-plate magnetic stirrer)
3. เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)
4. นาฬิกาจับเวลา (stop watch)
5. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath)
6. ชุดเครื่องปฏิบัติการพร้อมชุดรีฟลักซ์ (ภาพที่ 13)
7. เครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโตกราฟี: Shimadzu รุ่น GC 2010
8. เครื่องวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD):

Philips รุ่น X'Pert

9. เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวด้วยวิธี BET Nitrogen Adsorption (Autosorb I, Quantachrome รุ่น Autosorb 1)
10. ขวดบรรจุสาร (vial) และฝาหมุนปิด PTFE-septa ความจุ 2 มิลลิลิตร

11. ขวดวัดปริมาตร ความจุ 100 มิลลิลิตร

12. ไมโครปิเปต (Microliter pipette) ขนาด 20-100 μl และ 200-1000 μl

วัตถุดิบ

น้ำมันสบู่ดำ ได้จากศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร (จักรกลเกษตร) จังหวัดพิษณุโลก คุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 คุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำ

คุณสมบัติ	น้ำมันสบู่ดำ จากพิษณุโลก
ความหนาแน่นที่ 30 °C (g/cm^3)	0.910
Kinematic viscosity ที่ 40 °C (cP)	38.72
Dynamic viscosity ที่ 40 °C (cP)	34.31
สี	สีเหลืองใส

สารเคมี

1. โพแทสเซียมไนเตรท (potassium nitrate) บริสุทธิ์ 99.99% บริษัท Ajax Finchem
2. ฟอจาไซต์ (Faujasite)
3. เฮปเทน (heptane) บริสุทธิ์ 99.82 % บริษัท Fisher Scientific
4. เมทิลเฮปตะดิกานโนเอท (methyl heptadecanoate) บริสุทธิ์ มากกว่า 95.0% บริษัท Fluka
5. เมทานอล (methanol) บริสุทธิ์ 99.9 % บริษัท Merck
6. กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) บริสุทธิ์ 95-97 % บริษัท Merck

วิธีการทดลอง

1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

งานวิจัยนี้ใช้ สารละลาย KNO_3 เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมและใช้ Faujasite เป็นตัวรองรับ โดยฟอจาไซต์มีพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน เป็น $420 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $20 \text{ \AA}$ ตามลำดับ โดยเตรียมตัวเร่งที่มีปริมาณ KNO_3 แตกต่างกัน คือ 20, 25, 30 และ 35% โดยใช้วิธี การทำจุ่มชุ่มแบบแห้ง (dry impregnation or incipient wetness impregnation) จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปอบแห้งที่ 393 K เป็นเวลา 15 ชั่วโมง เมื่อเสร็จจากกระบวนการข้างต้นแล้ว นำสารที่ได้ไปทำการคัลไซด์ที่ 773 K เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สุดท้ายจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 20, 25, 30 และ 35% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ตามลำดับ

ขั้นตอน การเตรียมตัวเร่ง $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$

1. ชั่งตัวรองรับซีโอไลต์ชนิด Faujasite
2. นำโพแทสเซียมไนเตรท เป็นปริมาณ 20, 25, 30 และ 35 wt% เทียบกับ Faujasite ไปละลายในน้ำกลั่น
3. นำสารละลายโพแทสเซียมไนเตรท มาหยดลงบนตัวรองรับ กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110°C องศาเซลเซียสในเตาอบเป็นเวลา 15 ชั่วโมง
5. บดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ให้เป็นผงละเอียด
6. นำไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 773 K ในเตาเผาอุณหภูมิสูงเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
7. เก็บตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ในภาชนะแห้งและสารดูดความชื้น เพื่อเตรียมการทำปฏิกิริยา

2. ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

นำน้ำมันสบู่ดำที่ปรับสภาพแล้วและเมทานอล อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำ (น้ำหนักโมเลกุล = 880.623 g/mol) ต่อเมทานอล คือ 1:6, 1:21 และตัวเร่งปฏิกิริยา 20, 25, 30 และ 35 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ โดยที่ปริมาณตัวเร่งที่ใช้ในปฏิกิริยาคือ 2, 5 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำ บรรจุลงในขวดแก้ว 2 คอ ขนาด 250 มิลลิลิตรที่มีชุดรีฟลักซ์ติดอยู่ด้านบน ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 64.7°C องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ความเร็วรอบการกวน 600 รอบต่อนาที

ความดันบรรยากาศ เมื่อครบเวลาทำการปิดเครื่องกวนสารและลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ทำการกรองแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออก นำผลิตภัณฑ์ที่กรองแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกแล้วมาบรรจุในกรวยแยก เพื่อแยกเอาน้ำมันไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอล ซึ่งอยู่ทางด้านล่างของกรวยแยก ล้างน้ำมันไบโอดีเซลด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แยกน้ำซึ่งอยู่ด้านล่างของกรวยแยกออก ทำซ้ำประมาณ 5-6 ครั้ง จนน้ำกลั่นใสไม่มีสิ่งเจือปน แล้วใช้โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไบโอดีเซล ดูดความชื้นออก ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซล

จากนั้นนำไบโอดีเซลที่ได้ไปวิเคราะห์ ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (% FAME) และคุณสมบัติทางกายภาพที่เกี่ยวข้อง

3. การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาและน้ำมันไบโอดีเซล

3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์ตัวเร่งหลังจากการคัดไซค์โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) โดยใช้ Philips X'Pert ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยใช้รังสี $\text{Cu K}\alpha$, ช่วง 2θ ระหว่าง $5-70^\circ$ ซึ่งอัตราเร็วการสแกนเป็น $2.5^\circ/\text{นาท}$ ข้อมูลประมวลผลโดย DiffraPlus software

การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวด้วยวิธี BET Nitrogen Adsorption (Autosorb I, Quantachrome) หลังจากการคัดไซค์ ด้วยเครื่อง Autosorb ผลิตโดย Quantachrome รุ่น Autosorb 1

3.2 น้ำมันไบโอดีเซล

การวิเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลเป็นการหาค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph, GC) ของ Shimadzu รุ่น GC 2010 ตามมาตรฐาน prEN 14103:2001 ใช้คอลัมน์ capillary column ชนิด CP WAX 52CB (30 m x 0.32 mm x 0.25 μm film thickness) ของบริษัท Shimadzu สภาพวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี คืออุณหภูมิ injector 200°C อัตราการไหลของแก๊สผ่านคอลัมน์ 1.2 ml/min, อุณหภูมิคอลัมน์เริ่มต้น 190°C คงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 210°C คงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 23 นาที

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซล (C) มีสูตรคำนวณ
คือ

$$C = \left[\frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \right] \left[\frac{(C_{EI})(V_{EI})}{W} \right] (100) \quad (1)$$

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

A_{EI} = พื้นที่ใต้กราฟของเมทิลเฮปตะดีคาโนเอต (C17:0)

C_{EI} = ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลเฮปตะดีคาโนเอต หน่วย มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

V_{EI} = ปริมาตรของสารละลายเมทิลเฮปตะดีคาโนเอต หน่วย มิลลิลิตร

W = น้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซล หน่วยมิลลิกรัม

ตัวอย่างการคำนวณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซล
และค่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์แสดงในภาคผนวก ข สำหรับตัวอย่างโครมาโทแกรม และ
พื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม แสดงใน ภาคผนวก ค

4. การออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE)

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงผลของปัจจัย (factor) ที่มีต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน
ของน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำกับเมทานอล ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาในช่วงแรกคือ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ
20, 25, 30 และ 35 wt% KNO_3 /Faujasite อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำ (น้ำหนักโมเลกุล =
880.623 g/mol) ต่อเมทานอล คือ 1:6, 1:21 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 2, 5 และ 8 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำ ให้คงที่ ทำการทดลองแบบ general full factorial design เพื่อศึกษาผล
ของปัจจัยเหล่านี้ สภาวะที่ทำการศึกษานี้แสดงไว้ในตารางที่ 9

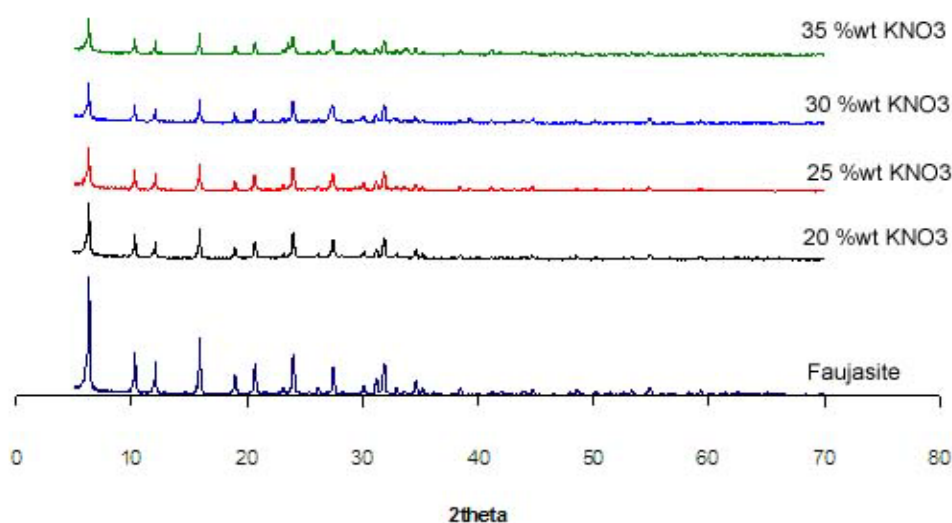
ตารางที่ 9 สภาวะที่ใช้ทดลองสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำกับ
เมทานอล

ครั้งที่	ชนิดตัวเร่ง (KNO ₃ /Faujasite)	น้ำมัน : เมทานอล	ปริมาณตัวเร่ง
1	20%	1:6	2%
2	20%	1:6	5%
3	20%	1:6	8%
4	20%	1:21	2%
5	20%	1:21	5%
6	20%	1:21	8%
7	25%	1:6	2%
8	25%	1:6	5%
9	25%	1:6	8%
10	25%	1:21	2%
11	25%	1:21	5%
12	25%	1:21	8%
13	30%	1:6	2%
14	30%	1:6	5%
15	30%	1:6	8%
16	30%	1:21	2%
17	30%	1:21	5%
18	30%	1:21	8%
19	35%	1:6	2%
20	35%	1:6	5%
21	35%	1:6	8%
22	35%	1:21	2%
23	35%	1:21	5%
24	35%	1:21	8%

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ได้ pattern ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 14 XRD Pattern ของตัวเร่ง $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ เทียบกับ Faujasite

จาก pattern ที่ได้ จะเห็นว่า peak หลักที่ปรากฏในทุกตัวอย่างเป็น peak ของผลึก Faujasite และพบเท่านั้นที่ปรากฏในทุกตัวอย่าง ไม่พบ peak ของผลึก K_2O หรือ KNO_3 แสดงว่า K_2O ที่ได้จากการแตกตัวของ KNO_3 ที่ 500°C ยังอยู่ในรูปอสัณฐาน สำหรับความสูงของ peak ที่ลดลงในตัวอย่างที่มี KNO_3 เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีปริมาณผลึก faujasite น้อยลงตามสัดส่วนของตัวเร่งที่เตรียมได้

เมื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวด้วยวิธี BET Nitrogen Adsorption (Autosorb I, Quantachrome) (ตารางที่ 10) พบว่า การ load KNO_3 ลงบนพื้นผิวของ Faujasite มีผลให้พื้นที่ผิวโดยรวมของตัวเร่งลดลงและมีขนาดรูพรุนลดลงด้วยเช่นกัน คาดว่าเนื่องมาจาก KNO_3 ไปเกาะตามรูพรุนของ Faujasite

ตารางที่ 10 พื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET ของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ขนาดรูพรุน ($\text{\AA}$)
Faujasite	420	20
$\text{K}_2\text{O}/\text{Faujasite}$ ที่ 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$	380	17
$\text{K}_2\text{O}/\text{Faujasite}$ ที่ 25 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$	366	14
$\text{K}_2\text{O}/\text{Faujasite}$ ที่ 30 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$	270	14
$\text{K}_2\text{O}/\text{Faujasite}$ ที่ 35 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$	257	14

2. ผลการออกแบบการทดลอง

เมื่อทำการทดลองตามสภาวะที่ออกแบบไว้ (ตารางที่ 9) ได้ผลดังตารางที่ 11 และนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตระหว่างเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 15 และ 16 จากการพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ เมื่อพิจารณาผลของปัจจัยหลัก (main effect) ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์แสดงดังแผนภาพที่ 15 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ จะมีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นในการทดลองนี้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีแนวโน้มทำให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นเนื่องจากพื้นที่ผิวในการสัมผัสระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้น และอัตราส่วนระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลมีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ เมื่อพิจารณาผลกระทบระหว่างปัจจัยที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์แสดงดังแผนภาพที่ 16 พบว่าไม่มีผลร่วมอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

ปริมาณตัวเร่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาซึ่งพิจารณาได้จากแผนภาพที่ 17 และ 18 โดยพบว่าเมื่อปริมาณตัวเร่งที่ใช้ในปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การแปลงผันมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณตัวเร่ง ทุกปฏิกิริยาที่ได้ผลดังตารางที่ 11 แผนภาพที่ 17 และ 18 ซึ่งพบว่าปริมาณของตัวเร่ง 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันให้ค่าเปอร์เซ็นต์การแปลงผันที่ดีที่สุด

จากแผนภาพที่ 17 และ 18 พบว่าชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อ เปอร์เซ็นต์การแปลงผัน โดยพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{K}_2\text{O}/\text{Faujasite}$ ที่ 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ปริมาณตัวเร่งเป็น 2, 5 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อ

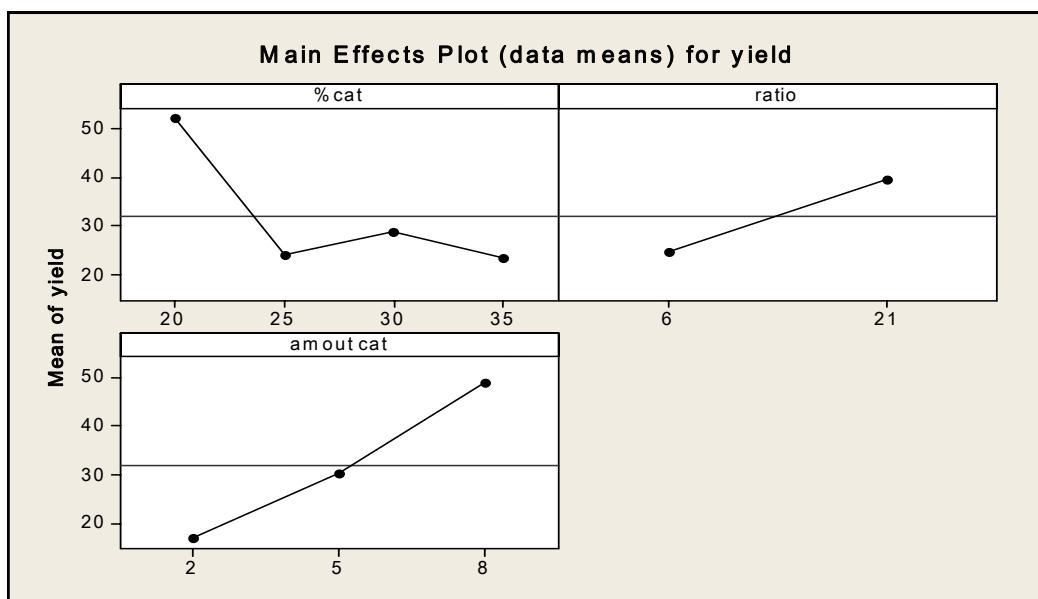
น้ำมันสบูดำ เป็น 6 ต่อ 1 และ 21 ต่อ 1 ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การแปลงผันที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งชนิดอื่น

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสบูดำจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลมีค่ามากกว่าเปอร์เซ็นต์การแปลงผันแปรผันตามอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสบูดำ อย่างไรก็ตามจากแผนภาพที่ 19, 20, 21 และ 22 พบว่าอัตราส่วนโดยโมลเป็น 21 ต่อ 1 ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การแปรผันที่ดีกว่า 6 ต่อ 1 เมื่อใช้ตัวเร่ง $K_2O/Faujasite$ ที่ 20, 25, 30 และ 35 wt% $KNO_3/Faujasite$ ปริมาณตัวเร่งเป็น 2, 5 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน

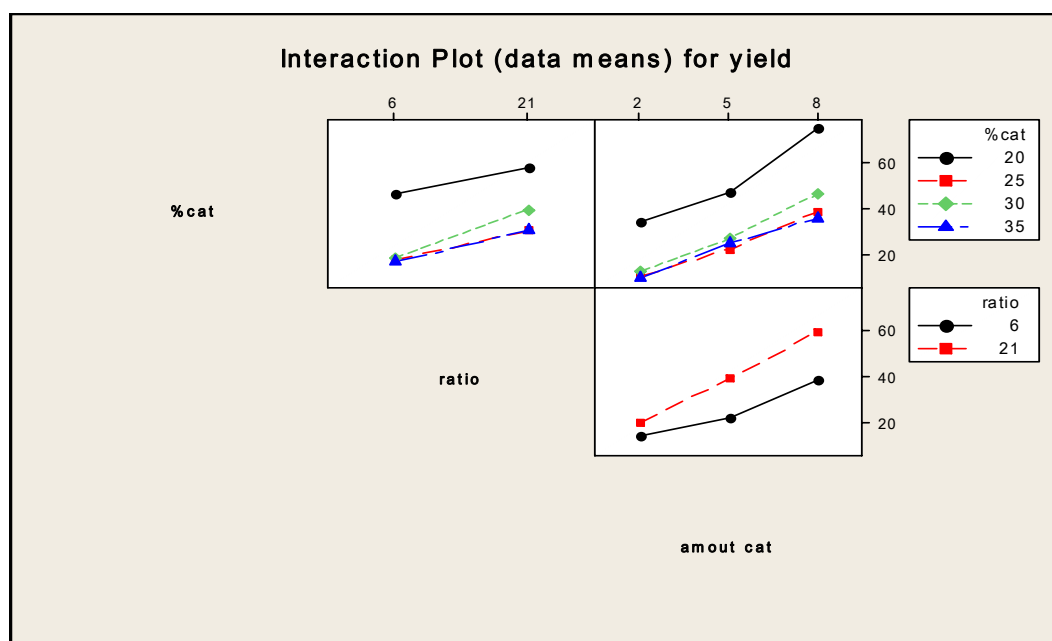
จากแผนภาพที่ 17 และ 18 พบว่า เปอร์เซ็นต์การแปลงผันที่ดีที่สุดเป็น 75.2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด $K_2O/Faujasite$ ที่ 20 wt% $KNO_3/Faujasite$ ปริมาณตัวเร่งเป็น 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน เท่ากับ 21 ต่อ 1

ตารางที่ 11 ผลการทดลองจากสภาวะที่ทำการออกแบบ

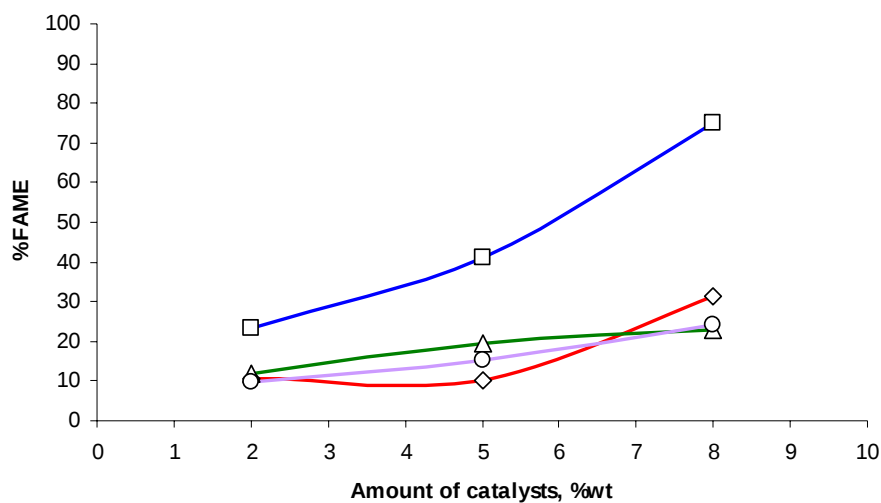
ครั้งที่	ชนิดตัวเร่ง (KNO ₃ /Faujasite)	น้ำมัน : เมทานอล	ปริมาณตัวเร่ง	%เมทิลเอสเทอร์
1	20%	1:6	2%	23.1
2	20%	1:6	5%	40.9
3	20%	1:6	8%	75.0
4	20%	1:21	2%	45.5
5	20%	1:21	5%	53.0
6	20%	1:21	8%	75.2
7	25%	1:6	2%	10.7
8	25%	1:6	5%	10.1
9	25%	1:6	8%	31.4
10	25%	1:21	2%	10.3
11	25%	1:21	5%	34.3
12	25%	1:21	8%	46.2
13	30%	1:6	2%	11.7
14	30%	1:6	5%	19.7
15	30%	1:6	8%	22.7
16	30%	1:21	2%	13.9
17	30%	1:21	5%	34.2
18	30%	1:21	8%	70.6
19	35%	1:6	2%	9.9
20	35%	1:6	5%	15.4
21	35%	1:6	8%	24.3
22	35%	1:21	2%	9.8
23	35%	1:21	5%	34.0
24	35%	1:21	8%	47.2



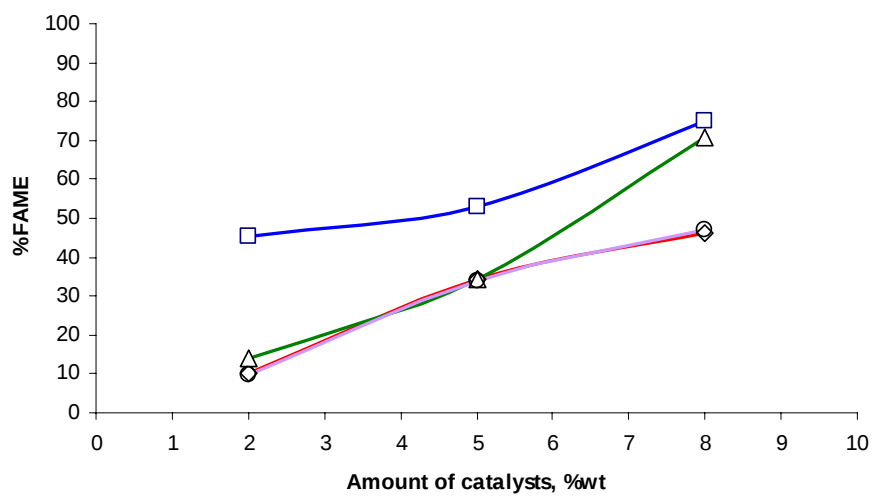
ภาพที่ 15 ผลของปัจจัยหลักที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์



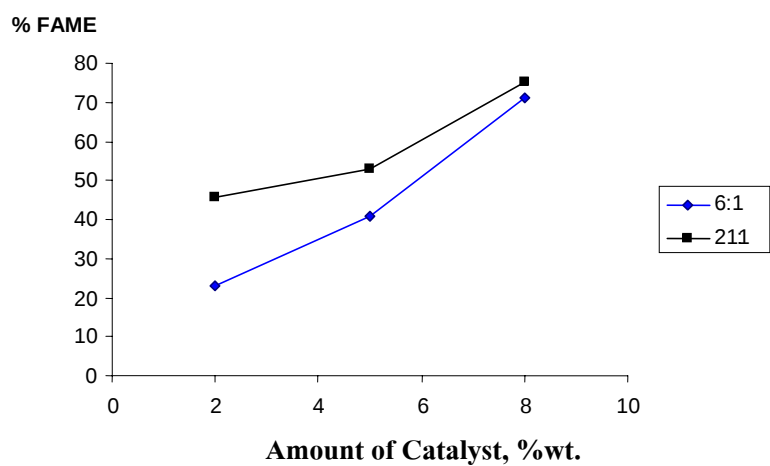
ภาพที่ 16 ผลกระทบระหว่างปัจจัยใดๆ ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์



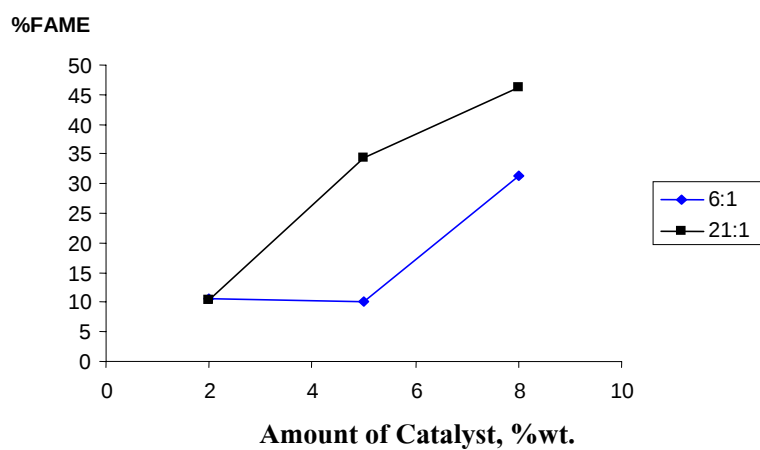
ภาพที่ 17 ผลของปริมาณตัวเร่งที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 20(□), 25(◇), 30(Δ) และ 35(○)
wt% KNO₃/Faujasite อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสนุ่ดำเท่ากับ 6 ต่อ 1



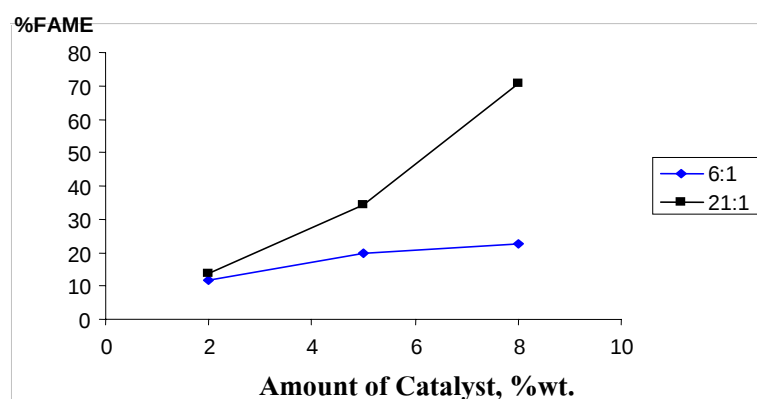
ภาพที่ 18 ผลของปริมาณตัวเร่งที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 20(□), 25(◇), 30(Δ) และ 35(○)
wt% KNO₃/Faujasite อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสนุ่ดำเท่ากับ 21 ต่อ 1



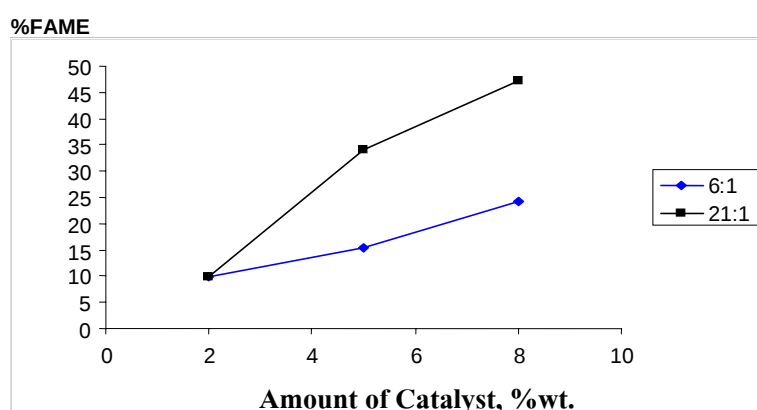
ภาพที่ 19 ผลของปริมาณตัวเร่งที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$
อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสุญุดำเท่ากับ 6 ต่อ 1 และ 21 ต่อ 1



ภาพที่ 20 ผลของปริมาณตัวเร่งที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 25 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$
อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสุญุดำเท่ากับ 6 ต่อ 1 และ 21 ต่อ 1



ภาพที่ 21 ผลของปริมาณตัวเร่งที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 30 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสุญุดเท่ากับ 6 ต่อ 1 และ 21 ต่อ 1



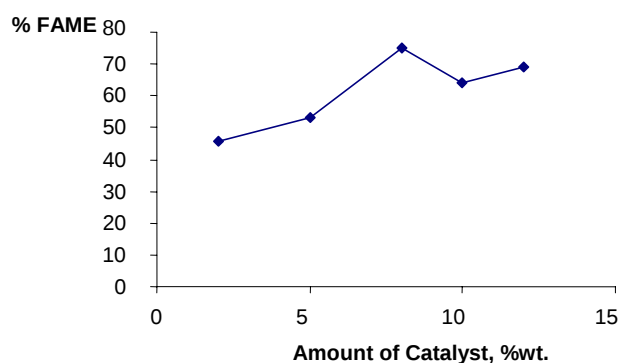
ภาพที่ 22 ผลของปริมาณตัวเร่งที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 35 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสุญุดเท่ากับ 6 ต่อ 1 และ 21 ต่อ 1

ดังนั้นในงานวิจัยนี้สามารถเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด $\text{K}_2\text{O}/\text{Faujasite}$ ที่ 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ปริมาณตัวเร่งที่มากกว่า 8% โดยน้ำหนักของน้ำมัน และอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันสุญุดมากกว่า 1:21 เพื่อทำการศึกษาลักษณะที่ดีที่สุดต่อไป ซึ่งในการทดลองจะใช้ปริมาณตัวเร่ง 10, 12% โดยน้ำหนักของน้ำมัน และอัตราส่วนน้ำมันต่อเมทานอลมากกว่า 1:21

3. ผลการวิเคราะห์ไบโอดีเซล

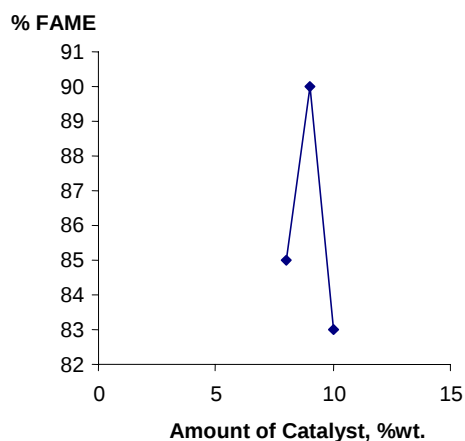
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด $K_2O/Faujasite$ โดยศึกษาผลของตัวแปร 3 ตัวหลัก คือ ปริมาณ KNO_3 บน Faujasite (20, 25, 30 และ 35 wt% $KNO_3/Faujasite$) ปริมาณตัวเร่งที่ใช้ทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ โดยที่อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา คือ 64.7 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ความดันบรรยากาศ หลังจากผ่านขั้นตอนต่างๆ ตามที่กล่าวมาข้างต้นจนได้ไบโอดีเซล จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ด้วย GC ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 17 และ 18 ซึ่งแสดงผลเฉพาะการใช้ตัวเร่งในปริมาณ 2, 5 และ 8% โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเป็น 6 ต่อ 1 และ 21 ต่อ 1 ตามลำดับ

จากผลการทดลอง พบว่า สำหรับทุกตัวเร่งที่ใช้เมื่อเพิ่มปริมาณการใช้จาก 2 เป็น 8% โดยน้ำหนัก มีผลให้เกิดปฏิกิริยาได้เมทิลเอสเทอร์เพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำจาก 6 เท่าเป็น 21 เท่า มีผลเชิงบวกเช่นเดียวกัน เพราะการเพิ่มเมทานอลซึ่งเป็นทั้งสารตั้งต้นของปฏิกิริยาและทำหน้าที่เป็นตัวเจือจางลดความหนืดของน้ำมันสบู่ดำ ทำให้เกิดการสัมผัสกันของสารตั้งต้นกับตัวเร่งได้มากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาจึงดีขึ้นด้วย เมื่อเปรียบเทียบผลได้ในทุกเบทซ์ที่ทดลอง พบว่า เบทซ์ที่ใช้ตัวเร่ง 20 wt% $KNO_3/Faujasite$ ปริมาณร้อยละ 8 ของน้ำหนักสบู่ดำ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 21 เท่า ให้เมทิลเอสเทอร์สูงที่สุด คือ 75.2% ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $KNO_3/Faujasite$ ในการทดลองต่อมา โดยทำการเพิ่มปริมาณตัวเร่งในการทำปฏิกิริยาให้มากขึ้น ผลที่ได้แสดงในภาพที่ 23 ซึ่งพบว่าการเพิ่มปริมาณจาก 8% โดยน้ำหนัก เป็น 10 และ 12 กลับให้ผลเชิงลบ คือ ได้เมทิลเอสเทอร์ลดลง คาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากปริมาณตัวเร่งที่มากขึ้นส่งผลทำให้ความหนืดของของผสมระหว่างสารตั้งต้นและตัวเร่งเพิ่มมากขึ้น ทำให้การสัมผัสกันของสารตั้งต้นและตัวเร่งลดลง การเกิดปฏิกิริยาจึงลดลงตามไปด้วย (ไม่สามารถเพิ่มความเร็วรอบให้มากกว่า 600 รอบ/นาที ด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือ)



ภาพที่ 23 ผลของปริมาณตัวเร่งที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 21 ต่อ 1

เพื่อแก้ไขปัญหาเรื่องความหนืดที่เพิ่มขึ้นจึงได้ทดลองซ้ำโดยเพิ่มปริมาณเมทานอลเป็น 30 เท่า ปรากฏว่าได้ผลดีขึ้น สามารถสังเคราะห์ไบโอดีเซลได้สูงสุด 90% เมื่อใช้ตัวเร่ง 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณ 9% เมื่อใช้ตัวเร่งในปริมาณ 10% ซึ่งทำให้เกิดผลเชิงลบ คือ ได้เมทิลเอสเทอร์ลดลง คาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากปริมาณตัวเร่งที่มากขึ้นส่งผลทำให้ความหนืดของของผสมระหว่างสารตั้งต้นและตัวเร่งเพิ่มมากขึ้น ทำให้การสัมผัสกันของสารตั้งต้นและตัวเร่งลดลง การเกิดปฏิกิริยาจึงลดลงตามไปด้วย (ไม่สามารถเพิ่มความเร็วรอบให้มากกว่า 600 รอบ/นาที ด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือ) ดังผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 24 จากนั้นนำไบโอดีเซลที่ได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5 เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน ซึ่งพบว่าโดยรวมแล้วมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน ถึงแม้ว่าบางด้านยังต่ำกว่ามาตรฐานเล็กน้อย



ภาพที่ 24 ผลของปริมาณตัวเร่งที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$
อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสุญุดำเท่ากับ 30 ต่อ 1

ตารางที่ 12 คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้

คุณสมบัติ	ค่าที่วัดได้	ค่ามาตรฐาน *
เมทิลเอสเทอร์ (wt%)	90	≥ 96.5
ความหนาแน่น (Density) ที่ 15 °C g/cm ³	0.89	0.86 – 0.90
ความหนืด (Viscosity) ที่ 40 °C mm ² /s	6.1	3.5 – 5.0
จุดวาบไฟ (Flash point) (°C)	176	≥ 120
จุดหมอก (Cloud point) (°C)	9	-

* ตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน (B 100)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. จากผลการศึกษาด้วยโปรแกรมการออกแบบการทดลอง พบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้ คือ ชนิดตัวเร่งที่มีปริมาณ KNO_3 แตกต่างกัน ปริมาณตัวเร่งที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณ 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ให้น้ำมันไบโอดีเซลที่มีเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงที่สุดคือ 75.2 ในบรรดาตัวเร่งทั้งหมดที่ใช้
3. การเพิ่มปริมาณตัวเร่งไม่เกิน 8% โดยน้ำหนัก ในการทำปฏิกิริยามีผลให้ได้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มากขึ้น เช่นเดียวกันกับการเพิ่มปริมาณเมทานอลจาก 6 เป็น 21 เท่าของน้ำมันสบู่ดำตั้งต้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งมากกว่า 8% โดยน้ำหนัก กลับทำให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลง ซึ่งสามารถแก้ไขโดยการเพิ่มปริมาณเมทานอล
4. การสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยใช้ $\text{K}_2\text{O}/\text{Faujasite}$ ที่เตรียมจาก 20 wt% KNO_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน ด้วยปริมาณการใช้ตัวเร่ง 9% โดยน้ำหนัก ใช้เมทานอล 30 เท่าของน้ำมันสบู่ดำ ทำปฏิกิริยาที่ 64.7 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง และกวนด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาที ให้ไบโอดีเซลที่มีเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุด 90%
5. ไบโอดีเซลที่ได้ยังมีคุณสมบัติหลักต่ำกว่ามาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาต่อ

งานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาต่อ เพื่อการพัฒนาต่อไปดังนี้

1. ศึกษาแนวทางการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่
2. ปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความสามารถในการเร่งมากขึ้น โดยอาจลองเปลี่ยนชนิดตัวรองรับ

3. ทดลองใช้ตัวทำละลายร่วม (co-solvent) เช่น เตตระไฮโดรฟูแรน (THF), 1,4-ไดออกเซน (1,4-dioxane) และ ไดเอทิลอีเทอร์ (diethyl ether) เพื่อเพิ่มการละลายระหว่างน้ำมันสนู้ดากับเมทานอล

4. ศึกษาการขยายขนาดการผลิตในระดับชุมชน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547. การเร่งปฏิกิริยา. ครั้งที่ 1
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- หนึ่งฤทัย คุ่มเสาร์. 2547. พลังงานทดแทนจากน้ำมันแฉะ. วารสารสิ่งแวดล้อม. ปีที่ 8 ฉบับ
ที่ 32: 38-43
- นันทวรรณ สโรบล. 2549. พืชวิทยาของสบู่ดำ (*Jatropha curacas L.*). สบู่ดำ. แหล่งที่มา:
<http://www.doa.go.th/fieldcrops/phanut/oth/tox.HTM>, 30 ตุลาคม 2549.
- นันทวรรณ สโรบล. 2549. สบู่ดำ. สบู่ดำ. แหล่งที่มา:
<http://www.doa.go.th/fieldcrops/phanut/oth/his.HTM>, 30 ตุลาคม 2549.
- ไพบุลย์ เหล่าลดดา. 2547. ไบโอดีเซล BIODIESEL (๑). ในไบโอดีเซล. แหล่งที่มา:
<http://asoke.info/09Communication/DharmaPublicize/Kid/k170/065.html>, 1 มีนาคม
2548.
- ระพีพันธุ์ ภาสบุตร. 2544. การใช้สบู่ดำกับเครื่องยนต์ดีเซลในไร่นา.
- ระพีพันธุ์ ภาสบุตร, สุขสันต์ สุทธิผลไพบุลย์, ไพจิตร จันทรวงศ์, วีระศักดิ์ อนันมบุตร, มาลี ประภาวัต,
วิไล กาญจนภูมิ และ อรพรรณ หวังดีธรรม. 2525. เติบโตด้วยน้ำมัน "สบู่ดำ". 43
หน้า.
- วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. 2547. ปฏิกิริยาเร่ง เคมีเกี่ยวกับผิวและปิโตรเคมี. ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์
ส.ส.ท., กรุงเทพฯ.
- สุปรียา สุขเกษม. 2549. การใช้ประโยชน์จากสบู่ดำ. สบู่ดำ. แหล่งที่มา:
<http://www.doa.go.th/fieldcrops/phanut/util/001.HTM>, 20 2549.

- อัศคพล เสนาณรงค์. 2549. การใช้เครื่องจักรกลเกษตรกับสบู่ดำ. สบู่ดำ. แหล่งที่มา: <http://www.doa.go.th/fieldcrops/phinut/mac/001.HTM>, 30 พฤศจิกายน 2549.
- อุดมวิทย์ ไวยการ และ อนุวัฒน์ จันทรสวรรณ. 2549. การใช้ประโยชน์จากสบู่ดำ: นอกจากน้ำมัน. สบู่ดำ. แหล่งที่มา: <http://www.doa.go.th/fieldcrops/phinut/util/index.HTM>, 30 2549.
- อนุวัฒน์ จันทรสวรรณ. 2549. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์. สบู่ดำ. แหล่งที่มา: <http://www.doa.go.th/fieldcrops/phinut/oth/bot.HTM>, 30 พฤศจิกายน 2549.
- Al-Widyan, M.I. and A.O. Al-Shyukh. 2002. Experimental evaluation of the transesterification of waste palm oil into biodiesel. **Bioresource Technology** 85 (3): 253-256.
- Anon., 1982. Filtered used frying fat powers diesel fleet. **J. Am. Oil Chem. Soc.** 59: 780A-781A.
- Antolin, G., F.V. Tinaut, Y. Briceño, V. Castaño, C. Pérez and A.I. Ramírez. 2002. Optimization of biodiesel production by sunflower oil transesterification. **Bioresource Technology** 83 (2): 111-114.
- Barnwal, B.K. and M.P. Sharma. 2004. Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 9: 363-378.
- Cao, W., H. Han and J. Zhang. 2005. Preparation of biodiesel from soybean oil using supercritical methanol and co-solvent. **Fuel**. 84: 347-357.
- Corma, A., S. Iborra, S. Miquel and J. Primo. 1997. Production of food emulsifiers, monoglycerides, by glycerolysis of fats with solid base catalysts. **J. Catal.** 173: 315-321.

- Crabbe, E., C. Nolasco-Hipolito, G. Kobayashi, K. Sonomoto and A. Ishizaki. 2001. Biodiesel production from crude palm oil and evaluation of butanol extraction and fuel properties. **Process Biochemistry** 37 (1): 65-71.
- Demirbas, A. 2002. Biodiesel from vegetable oils via transesterification in supercritical methanol. **Energy Conversion and Management**. 43: 2349-2356.
- Dossat, V., D. Combes and A. Marty. 2002. Lipase-catalyzed transesterification of high oleic sunflower oil. **J. Enzyme Microbial Technol.** 30: 90-94.
- Ebiura, T., T. Echizen, A. Ishikawa, K. Murai and T. Baba. 2005. Selective transesterification of triolein with methanol to methyl oleate and glycerol using alumina load with alkali metal salt as a solid-base catalyst. **Applied Catalyst A** 283: 111-116.
- Fangrui, M. and M. Hanna. 1999. Biodiesel Production: A Review. **Bioresource Technology**. 70: 1-15.
- Fukuda, H., A. Kondo and H. Noda. 2001. Review Biodiesel Production by Transesterification of Oils. **Journal of Bioscience and Bioengineering**. 92 (5): 405-416.
- Galen, J.S., A.D. Mohanprasad, E.J. Daskocil, P.J. Mankidy and M.J. Goff. 2004. Transesterification of soybean oil with zeolite and metal catalysts. **Applied Catalysis** (257): 213-223.
- Goering, C.E., R.N. Campion, A.W. Schwab and E.H. Pryde. 1982. Invegetable oil fuels. proceeding of the international conference on plant and vegetable oils as fuels. Fargo. North Dakota. **American Society of Agricultural Engineers**. 4: 279-286.
- Gryglewicz, S. 1999. Rapeseed oil methyl esters preparation using heterogeneous catalysts. **Bioresource Technology** 70: 249-253.

- Jackson, M.A. and J.W. King. 1996. Methanolysis of seed oil in flowing supercritical carbon dioxide. **J. Am. Oil Chem. Soc.** 73: 353-356.
- Jitputi, J., B. Kittiyanan, K. Bunyakiat, P. Rangsunvigit and P. Jenvanitpanjakul. 2006. Transesterification of Palm Kernel Oil and Coconut Oil by Different Solid Catalysts. **Chemical Engineering Journal**. 116: 61-66.
- Katada, N., J. Endo, K. Notsu, N. Yasunobu, N. Naito and M. Niwa. 2000. Superacidity and Catalytic Activity of Sulfated Zirconia. **J. Phys. Chem. B**. 104: 10321-10328.
- Kim, H.J., B.S. Kang., M.J. Kim, Y.M. Park, D.K. Kim, J.S. Lee and K.Y. Lee. 2004 . Transesterification of vegetable oil to biodiesel using heterogeneous base catalyst. **Catalysis Today**. 93-95: 315-320.
- Kose, O., M. Tuter and H.A. Aksoy. 2002. Immobilized *Candida Antarctica* lipase-catalyzed alcoholysis of cotton seed oil in a solvent-medium. **Bioresource Technology**. 83: 125-129.
- Krawczyk, T. 1996. Biodiesel alternative fuel makes inroads but hurdles remain. **Inform** 7: 801-829.
- Kumar, S. and A. Chadha. 2005. Preparation of biodiesel from curde oil of *Pongamia pinnata*. **Bioresource Technology**. 96: 1425-1429.
- Kusdiana D. and S. Saka. 2004. Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. **Bioresource Technology**. 91: 289-295.
- Leclercq, E., A. Finiels and C. Moreau. 2001. Transesterification of rapeseed oil in the presence of basic zeolites and related solid catalysts. **J. Am. Oil Chem. Soc.** 78: 1161-1165.

- Ma, F. and M. A. Hanna. 1999. Biodiesel production: a review. **Bioresource Technology** (70): 1-15.
- Madras, G., C. Kolluru and R. Kumar. 2004. Synthesis of biodiesel in supercritical fluids. **Fuel**. 83: 2029-2033.
- Meher, L.C., D. Vidya and S.N. Naik. 2006. Technical aspects of biodiesel production by transesterification-a review. **Renewable and sustainable Energy reviews**. 10: 248-268.
- Miao, C.X. and Z. Gao. 1997. Preparation and Properties of Ultrafine $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ Superacid Catalysts. **Materials Chemistry and Physics**. 50: 15-19.
- Mustafa, E.T. 2003. **Investigation of oxides of nitrogen emulsion from biodiesel-fueled engines**. Dissertation thesis, Iowa State University.
- Pryde, E.H., L.H. Princen and K.D. Mukherjee. 1983. **New Sources of Fats and Oils**. American Oil Chemists Society, America.
- Pryde, E. H. 1983. Vegetable oils as fuel alternatives-symposium overview. **J. Am. Oil Chem. Soc.** 61: 1609-1610.
- Saka, S. and D. Kusdiana. 2001. Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. **Fuel**. 80: 225-231.
- Satterfield C.N. 1991. **Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice**. 2 ed. McGraw-Hill, Singapore.
- Shimada, Y., Y. Watanabe., A. Sugihara and Y. Tominaga. 2002. Enzymatic alcoholysis for biodiesel fuel production and application of the reaction to oil processing. **Journal of Molecular Catalysis B**. 17: 133-142.

- Schlick, M.L., M.A. Hanna and J.L. Schinstock. 1988. Soybean and sunflower oil performance in a diesel engine. **Trans. ASAE.** 31: 1345-1349.
- Schwab, A.W., M.O. Bagby and B. Freedman. 1987. Preparation and properties of diesels from vegetable oils. **Fuel.** 66: 1372-1378.
- Suppes, G.J., K. Bockwinkel., S. Lucas., J.B. Botts., M.H. Mason and J.A. Heppert. 2001. Calcium carbonate catalyzed alcoholysis of fats and oils. **J. Am. Oil Chem. Soc.** 78: 139-145.
- Suppes, G.J., M.A. Dasari, E.J. Doskocil, P.J. Mankidy and M.J. Goff. 2004. Transesterification of soybean oil with zeolite and metal catalysts. **Applied Catalysis A: General.** 257: 213-223.
- 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.
- Vicente, G., A. Coteron, M. Martinez and J. Aracil. 1998. Application of the factorial design of experiments and response surface methodology to optimize biodiesel production. **Industrial Crops and Products.** 8: 29-35.
- Warabi, Y., D. Kusdiana and S. Saka. 2004. Reactivity of triglycerides and fatty acids of rapeseed oil in supercritical alcohols. **Bioresource Technology.** 91: 283-287.
- Wang, Y., O. Shiyi, L. Pengzhan and T. Shuze. 2006. Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil. **Journal of Molecular Catalysis A.** Chemical 252: 107-112.
- Wenlei Xie, Hong Peng, Ligong Chen. 2006. Transesterification of soybean oil catalyzed by potassium loaded on alumina as a solid-base catalyst. **Applied Catalysis A: General** 300 67-74.

- Wenlei Xie , Haitao Li. 2006. Alumina-supported potassium iodide as a heterogeneous catalyst for biodiesel production from soybean oil. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical** 255 (2006) 1–9.
- Xie, W., H. Xiaoming and L. Haitao. 2007. Soybean oil methyl ester preparation using NaX zeolites loaded with KOH as a heterogeneous catalyst. **Bioresource Technology**. 98: 936-939.
- Yong Wang, Shiyi Ou, Pengzhan Liu, Feng Xue, Shuze Tang. 2006. Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical** 252 (2006) 107–112.
- Yuan, W., A.C. Hansen and Q. Zhang. 2005. Vapor pressure and normal boiling point predictions for pure methyl esters and biodiesel fuels. **Fuel**. 84:943-950
- 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
การเตรียมเอกสารตั้งต้น

การเตรียมสารตั้งต้นสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การเตรียมอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันสบู่ดำ	= 880.623 กรัมต่อโมล
น้ำหนักโมเลกุลของเมทานอล	= 32.04 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่นของเมทานอล	= 0.79 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ตัวอย่างวิธีการคำนวณ

ใช้น้ำมันสบู่ดำ 40 กรัม

จาก จำนวน โมล = จำนวนสาร(g)/น้ำหนักโมเลกุล(g/mol)

จะได้ จำนวนโมลของน้ำมันสบู่ดำ เท่ากับ $40/880.623 = 0.0454$ โมล

ต้องการเตรียมอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอล = 1 ต่อ 6

จะได้จำนวนโมลของเมทานอล = $6 \times 0.0454 = 0.2724$ โมล หรือ 8.73 กรัม

เพราะฉะนั้น คิดเป็นปริมาตรของเมทานอล = $8.73/0.79 = 11.05$ มิลลิลิตร

ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ 2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำมันสบู่ดำ

ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt % $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ = 0.8 กรัม

ตัวเร่งปฏิกิริยา 25 wt % $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ = 0.8 กรัม

ตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt % $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ = 0.8 กรัม

ตัวเร่งปฏิกิริยา 35 wt % $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ = 0.8 กรัม

เพราะฉะนั้นส่วนผสมที่ได้จากการเตรียมคือ น้ำมันสบู่ดำ : เมทานอล : ตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt % $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ มีค่าเท่ากับ 40 กรัม : 11.05 มิลลิลิตร : 0.8 กรัม สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา 25 wt % $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ มีค่าเท่ากับ 40 กรัม : 11.05 มิลลิลิตร : 0.8 กรัม สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt % $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ มีค่าเท่ากับ 40 กรัม : 11.05 มิลลิลิตร : 0.8 กรัม สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา 35 wt % $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ มีค่าเท่ากับ 40 กรัม : 11.05 มิลลิลิตร : 0.8 กรัม

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ค่า Fatty Acid Methyl Ester ในไบโอดีเซล โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

การวิเคราะห์ค่า Fatty acid methyl ester ในไบโอดีเซล โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

1. อุปกรณ์เครื่องแก้ว

1.1 ขวดบรรจุสาร (vial) และฝาหมุนปิด PTFE – septa ความจุ 2 มิลลิลิตร

1.2 ขวดวัดปริมาตร ความจุ 100 มิลลิลิตร

1.3 ไมโครปิเปต (Microliter pipette) ขนาด 20-100 μ l และ 200-1000 μ l

2. สารเคมี

2.1 เฮปเทน (heptane, บริสุทธิ์ = 99.82% (GC) บริษัท Fisher Scientific)

2.2 เมทิลเฮปตะดะคานะเอท (methyl heptadecanoate, บริสุทธิ์ $\geq$ 95.0% (GC) บริษัท Fluka)

2.3 สารละลายเมทิลเฮปตะดะคานะเอท 10 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร เตรียมโดย ชั่งน้ำหนัก เมทิลเฮปตะดะคานะเอท (methyl heptadecanoate) 1000 มิลลิกรัม ใส่ลงในขวดวัดปริมาตร ความจุ 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายเฮปเทน

3. การเตรียมสารตัวอย่างไบโอดีเซล

ชั่งตัวอย่างไบโอดีเซล 50 มิลลิกรัม ใส่ในขวดบรรจุสาร ขนาด 2 มิลลิลิตร จากนั้นเติม Internal solution 1 มิลลิลิตร โดยใช้ไมโครปิเปต นำไปฉีดเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC)

4. การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์

หลังจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) โดยใช้วิธีแบบ internal standard ใช้ เมทิลเฮปตะดะคานะเอท (methyl heptadecanoate, C17:0) เป็น internal standard

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซล มีสูตรคำนวณคือ

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

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

A_{EI} = พื้นที่ใต้กราฟของเมทิลเฮปตะดิกาโนเอต (C17:0)

C_{EI} = ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลเฮปตะดิกาโนเอต หน่วย มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

V_{EI} = ปริมาตรของสารละลายเมทิลเฮปตะดิกาโนเอต หน่วย มิลลิลิตร

W = น้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซล หน่วยมิลลิกรัม

ตารางผนวกที่ ข1 การวิเคราะห์ผลจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (GC) จากโครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ดังแสดงในภาพภาคผนวก ค3

เมทิลเอสเทอร์	Retention time (min)	พื้นที่ใต้กราฟ (counts)
C14:0	2.446	8892
C16:0	3.136	2602356
C16:1	3.274	150003
C17:0	-	-
C18:0	4.402	1261373
C18:1	4.657	7770849
C18:2	5.110	6501012
C18:3	5.765	27793
C20:0	6.673	32215
C22:0	10.858	1543
C22:1	11.342	1425
C24:0	19.235	8205

การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์

จากสูตรการคำนวณเมทิลเอสเทอร์

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

$$\sum A = 8892 + 2602356 + 150003 + 1261373 + 7770849 + 6501012 + 27793 + 32215 + 1543 + 1425 + 8205$$

$$= 18365666$$

$$A_{EI} = 4721514$$

$$C_{EI} = 10.32 \text{ มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร}$$

$$V_{EI} = 1 \text{ มิลลิลิตร}$$

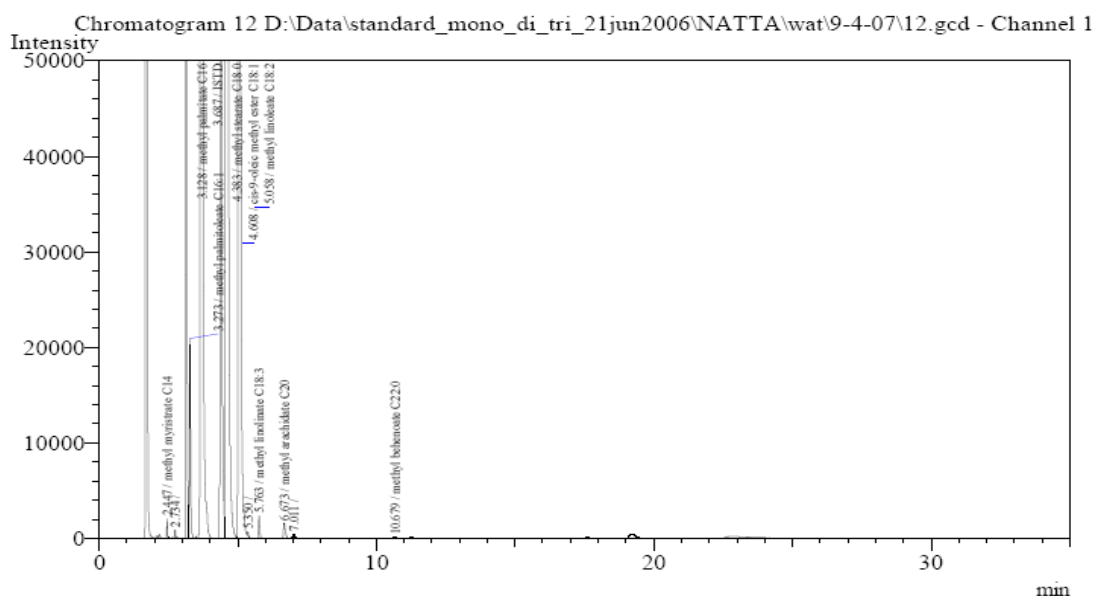
$$W = 56.3 \text{ มิลลิกรัม}$$

$$\text{เมทิลเอสเทอร์} = \frac{(18365666 - 4721514) \times 10.32 \times 1 \times 100}{4721514 \times 56.3}$$

$$= 53 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

ภาคผนวก ค

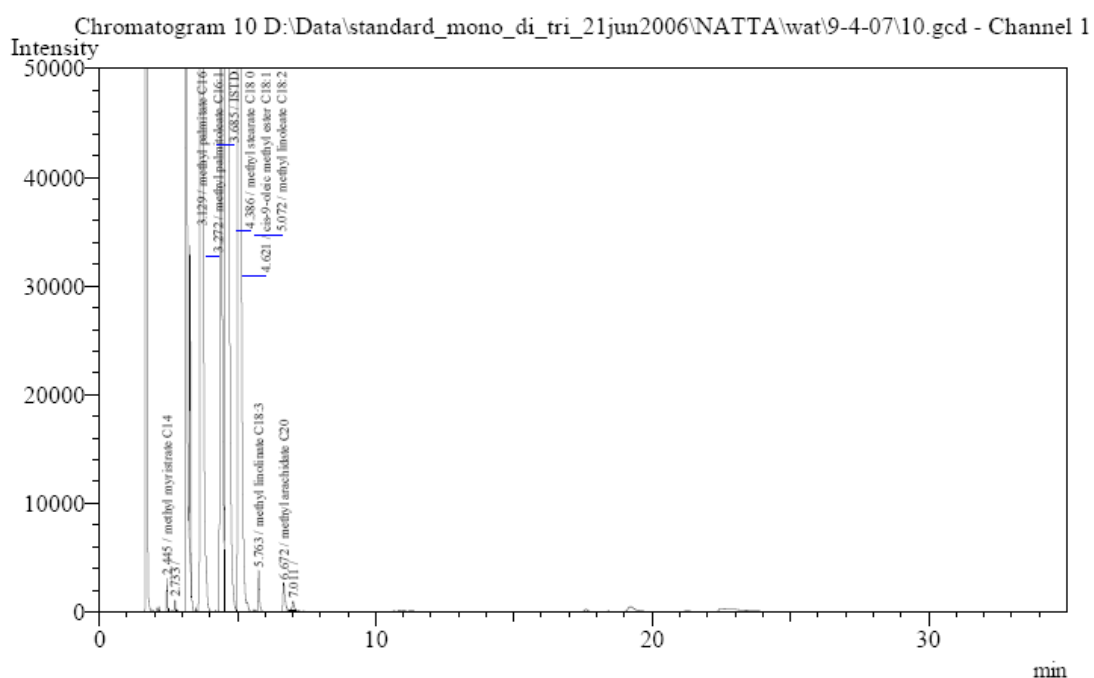
โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.447	3684	2077	0.034	%		methyl myristate C
2	2.734	1696	890	0.016	%		
3	3.128	889613	386293	8.227	%		methyl palmitate C1
4	3.273	55659	20965	0.515	%	V	methyl palmitoleate
5	3.687	4756544	1671667	43.990	%		ISTD
6	4.383	392456	114206	3.630	%		methyl stearate C18
7	4.608	2579956	746391	23.860	%	V	cis-9-oleic methyl es
8	5.058	2109462	620455	19.509	%	SV	methyl linoleate C18
9	5.350	1035	360	0.010	%	T	
10	5.763	9267	2478	0.086	%		methyl linolate C1
11	6.673	9209	1766	0.085	%		methyl arachidate C
12	7.011	2954	564	0.027	%		
13	10.679	1173	208	0.011	%		methyl behenoate C
Total		10812708	3568320				

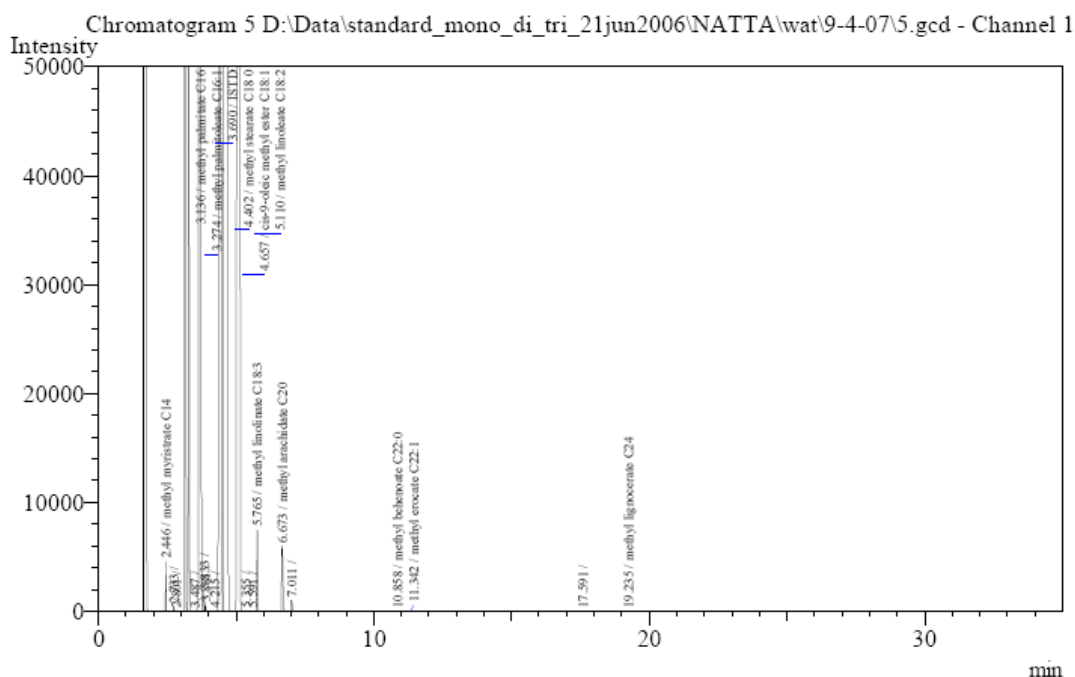
ภาพผนวกที่ ค1 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักสับดูดำ อัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมันสับดูดำต่อ เมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 6 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.445	5410	3090	0.037	%		methyl myristate C
2	2.733	2118	1070	0.015	%		
3	3.129	1466134	606012	10.151	%	S	methyl palmitate C1
4	3.272	58474	28093	0.405	%	T	methyl palmitoleate
5	3.685	4673975	1597659	32.362	%		ISTD
6	4.386	635804	175688	4.402	%		methyl stearate C18
7	4.621	4142297	1106370	28.681	%	V	cis-9-oleic methyl es
8	5.072	3425455	937472	23.717	%	SV	methyl linoleate C18
9	5.763	14280	3791	0.099	%		methyl linolenate C1
10	6.672	14602	2709	0.101	%		methyl arachidate C
11	7.011	4302	848	0.030	%		
Total		14442851	4462802				

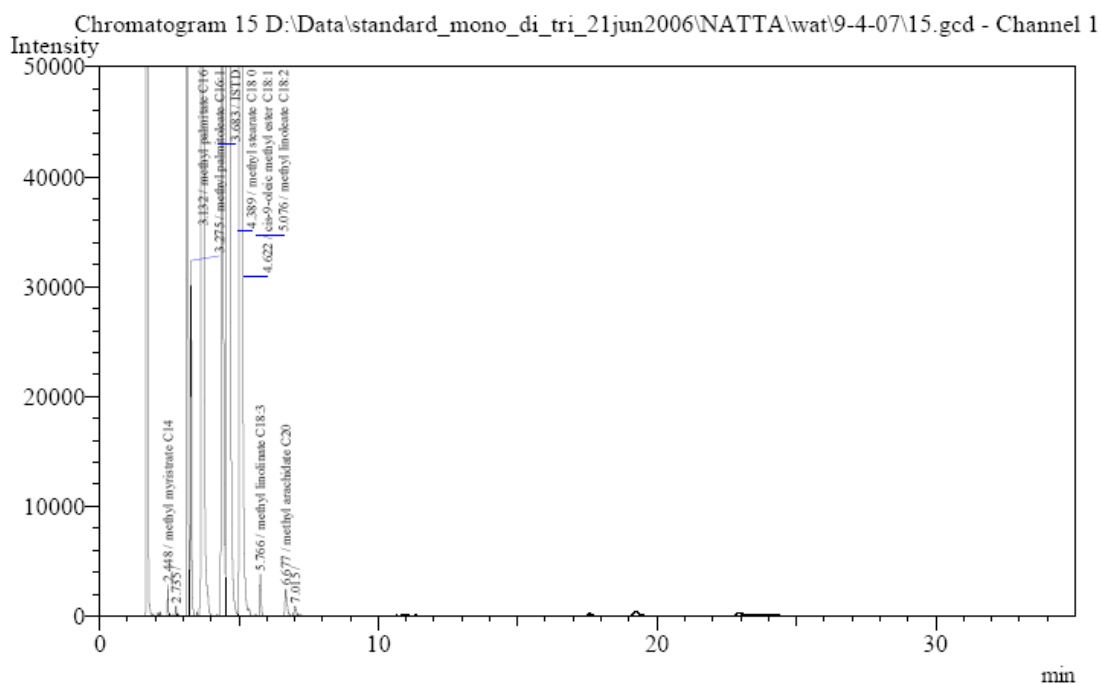
ภาพผนวกที่ ค2 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักสบู่น้ำ อัตราร้อยละโดยมวลของน้ำมันสบู่น้ำต่อ เมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 6 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.446	8892	5703	0.038	%		methyl myristate C
2	2.733	2868	1620	0.012			
3	2.801	1179	375	0.005		V	
4	3.136	2602356	1296507	11.254	%		methyl palmitate C1
5	3.274	150003	69435	0.649	%	V	methyl palmitoleate
6	3.487	1875	840	0.008			
7	3.690	4721514	1805197	20.418	%	V	ISTD
8	3.833	6903	2883	0.030		V	
9	3.881	4356	1760	0.019		V	
10	4.215	1008	402	0.004		V	
11	4.402	1261373	385085	5.455	%		methyl stearate C18
12	4.657	7770849	1909681	33.604	%	V	cis-9-oleic methyl es
13	5.110	6501012	1628796	28.113	%		methyl linoleate C18
14	5.355	2615	819	0.011			
15	5.591	1200	422	0.005			
16	5.765	27793	8732	0.120	%		methyl linolate C1
17	6.673	32215	7356	0.139	%		methyl arachidate C
18	7.011	11340	2278	0.049			
19	10.858	1543	294	0.007	%		methyl behenoate C
20	11.342	1425	255	0.006	%		methyl erocate C22:
21	17.591	4011	450	0.017			
22	19.235	8205	624	0.035	%		methyl lignocerate C
Total		23124535	7129514				

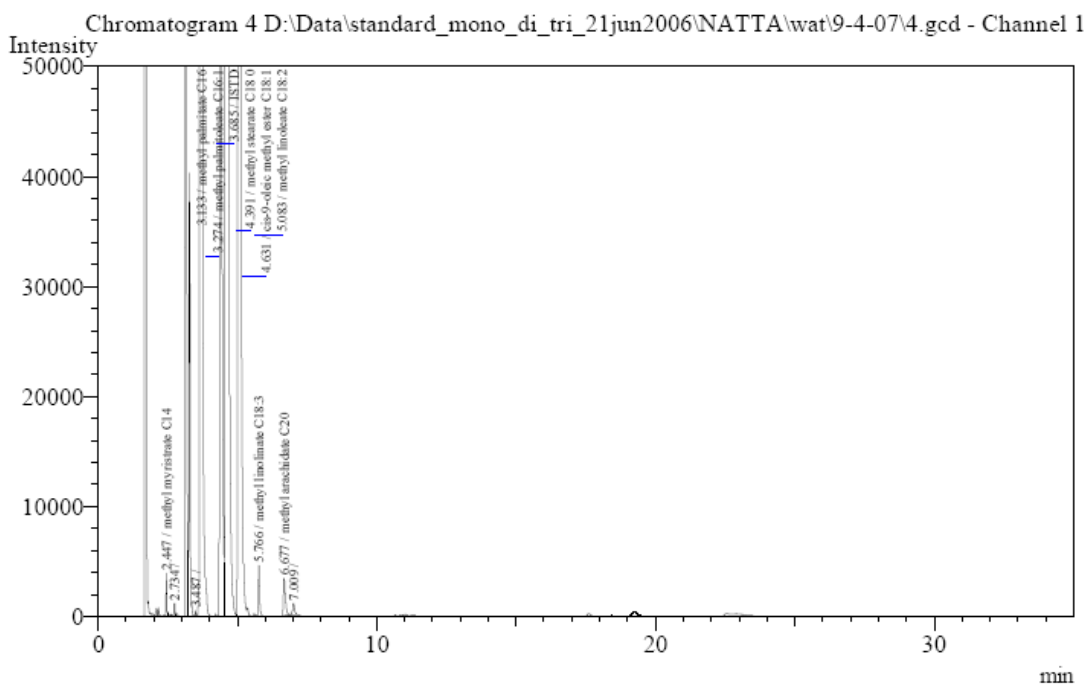
ภาพผนวกที่ ค3 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 8 ของน้ำหนักสบู่อัด อัตราส่วนโดยโมลของ น้ำหนักสบู่อัดต่อ เมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 6 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc	Units	Mark	Name
1	2.448	5012	2820	0.038	%		methyl myristate C14
2	2.735	1817	920	0.014	%		methyl palmitate C16
3	3.132	1341968	582698	10.187	%		methyl palmitoleate C16:1
4	3.275	84484	32384	0.641	%	V	ISTD
5	3.683	3819478	1371839	28.994	%	S	methyl stearate C18:0
6	4.389	586831	164437	4.455	%		methyl oleate C18:1
7	4.622	3929465	1082289	29.829	%	V	methyl linoleate C18:2
8	5.076	3372547	954092	25.602	%	SV	methyl linolenate C18:3
9	5.766	14445	3863	0.110	%		methyl arachidate C20
10	6.677	12995	2494	0.099	%		
11	7.015	4181	813	0.032	%		
Total		13173223	4198649				

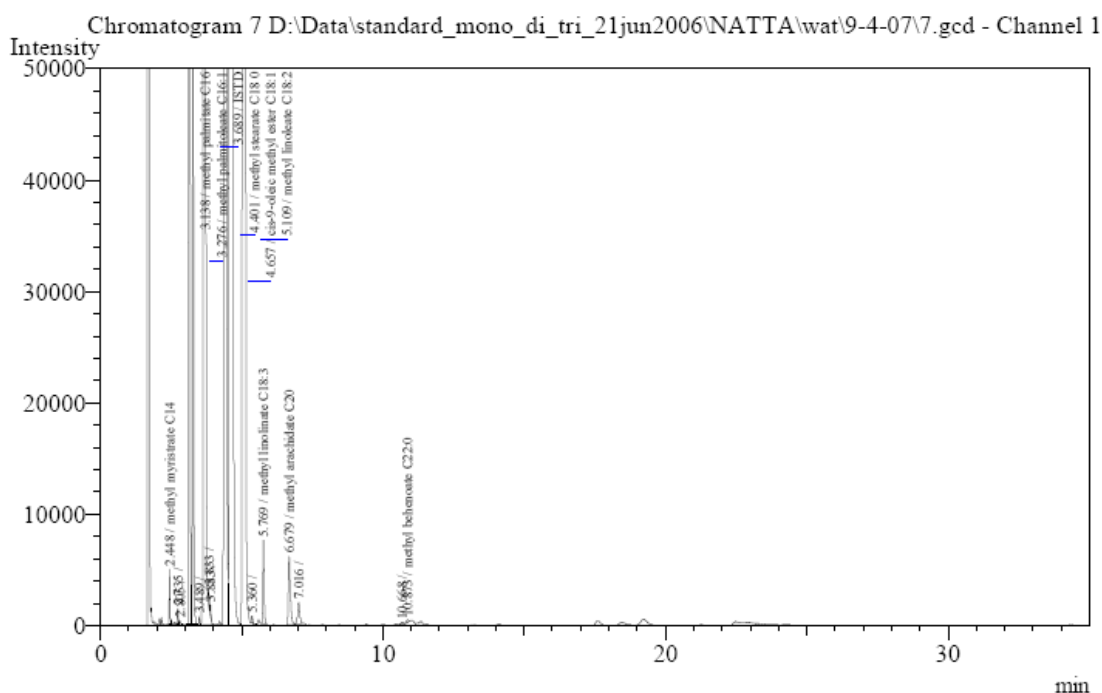
ภาพผนวกที่ ค4 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักสบู่อัด อัตรารีดด้วยโมลของน้ำมันสบู่อัดต่อ เมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.447	6475	3886	0.041	%		methyl myristate C
2	2.734	2220	1157	0.014	%	V	
3	3.133	1679929	764830	10.757	%		methyl palmitate C1
4	3.274	101200	40259	0.648	%	SV	methyl palmitoleate
5	3.487	1130	488	0.007	%	T	
6	3.685	4170547	1525016	26.705	%		ISTD
7	4.391	761216	215985	4.874	%		methyl stearate C18
8	4.631	4864546	1304639	31.149	%	V	cis-9-oleic methyl es
9	5.083	3990353	1108732	25.551	%	SV	methyl linoleate C18
10	5.766	16805	4607	0.108	%		methyl linolate C1
11	6.677	17717	3495	0.113	%		methyl arachidate C
12	7.009	5044	1021	0.032	%		
Total		15617182	4974115				

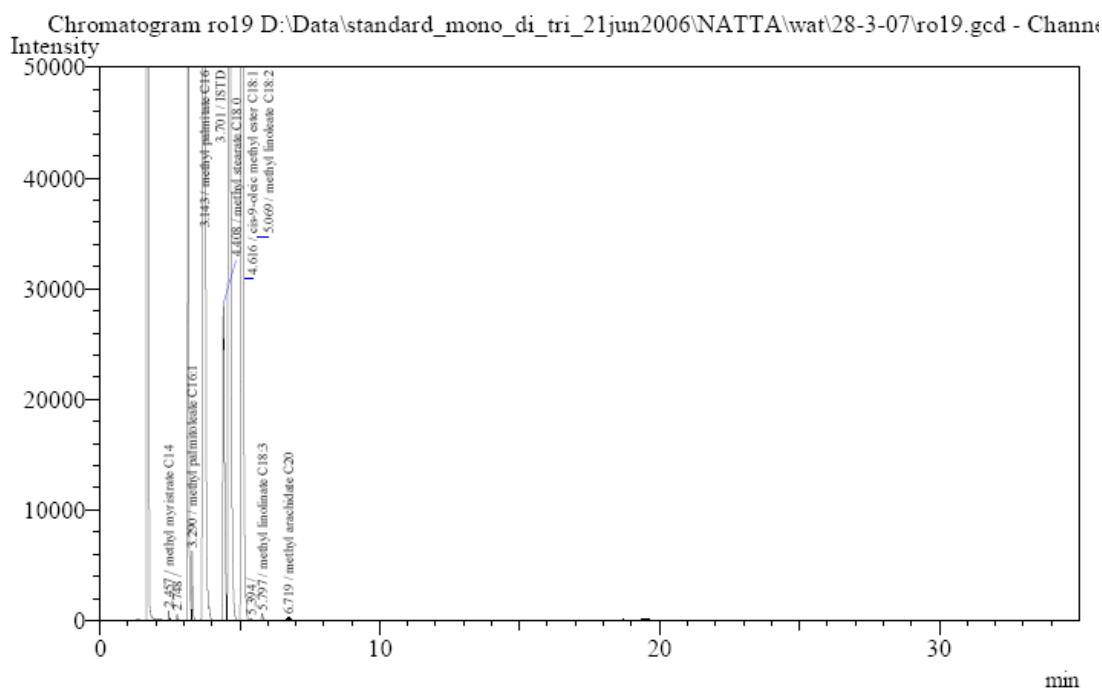
ภาพผนวกที่ ค5 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมันสบูดำต่อ เมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.448	8396	4966	0.037	%		methyl myristate C
2	2.735	2686	1402	0.012			
3	2.805	1101	332	0.005		V	
4	3.138	2584531	1166175	11.444	%	V	methyl palmitate C1
5	3.276	149667	61991	0.663	%	V	methyl palmitoleate
6	3.489	1871	747	0.008			
7	3.689	4467177	1629842	19.781	%	SV	ISTD
8	3.833	2919	1515	0.013		T	
9	3.883	1769	786	0.008		TV	
10	4.401	1241930	337627	5.499	%		methyl stearate C18
11	4.657	7689422	1861463	34.049	%	V	cis-9-oleic methyl es
12	5.109	6360146	1591887	28.163	%	SV	methyl linoleate C18
13	5.360	2036	628	0.009		T	
14	5.769	26331	7554	0.117	%		methyl linolate C1
15	6.679	30781	6149	0.136	%		methyl arachidate C
16	7.016	10275	1957	0.045			
17	10.668	1024	213	0.005			
18	10.873	1197	216	0.005	%		methyl behenoate C
Total		22583259	6675450				

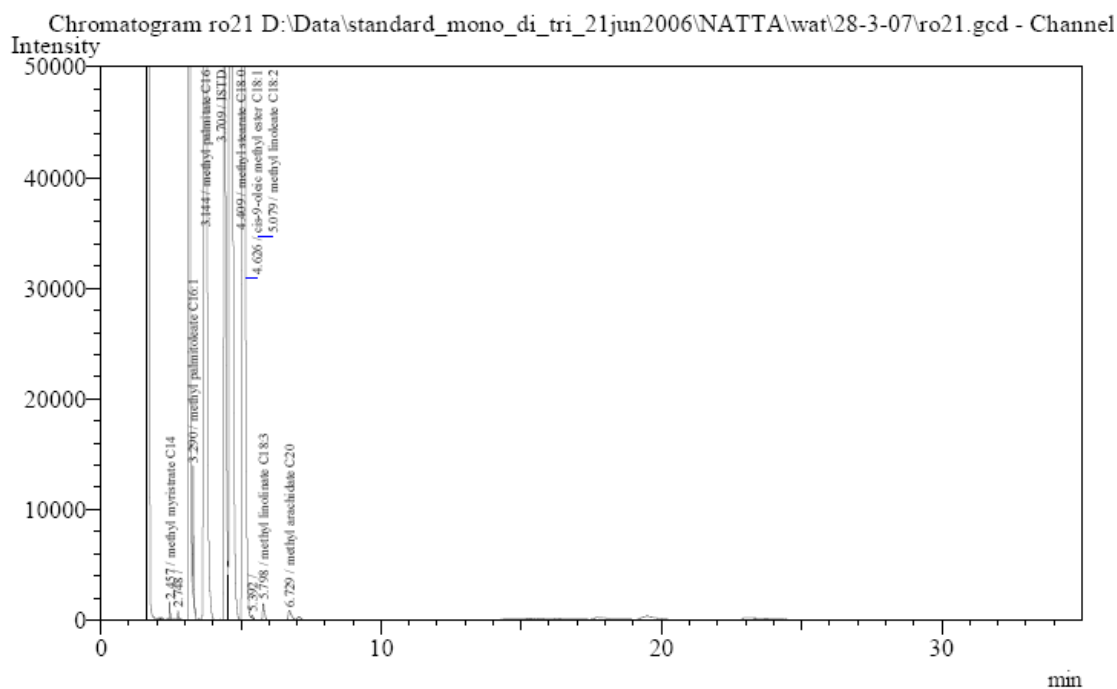
ภาพผนวกที่ ๓๖ โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 8 ของน้ำหนักสับดูดำ อัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมันสับดูดำต่อ เมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.457	1499	823	0.025	%		methyl myristate C
2	2.748	1078	543	0.018	%		
3	3.143	297365	114378	4.897	%		methyl palmitate C1
4	3.290	17685	6265	0.291	%	V	methyl palmitoleate
5	3.701	4050139	1240733	66.695	%	S	ISTD
6	4.408	123129	28771	2.028	%		methyl stearate C18
7	4.616	866266	206253	14.265	%	V	cis-9-oleic methyl es
8	5.069	709010	171827	11.676	%	S	methyl linoleate C18
9	5.394	1123	241	0.018	%	T	
10	5.797	3016	718	0.050	%		methyl linolenate C1
11	6.719	2294	348	0.038	%		methyl arachidate C
Total		6072604	1770900				

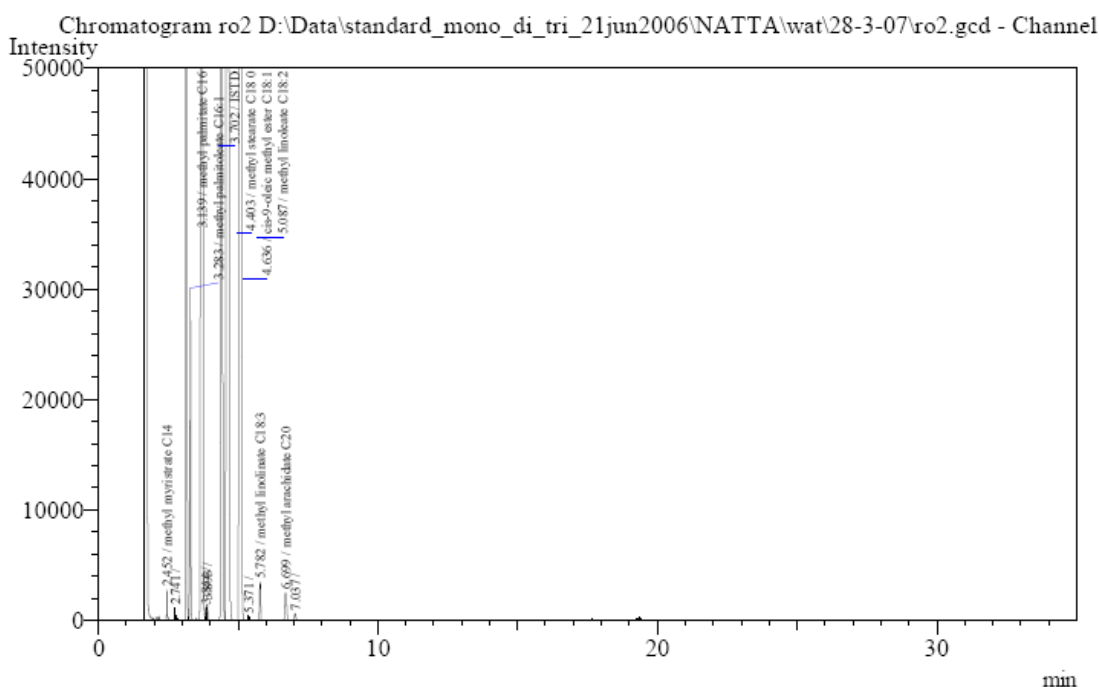
ภาพผนวกที่ ค7 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 25 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักสบู่อัด อัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมันสบู่ดำต่อ เมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 6 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc	Units	Mark	Name
1	2.457	3230	1560	0.030	%	S	methyl myristate C
2	2.748	1595	783	0.015	%		
3	3.144	728239	259957	6.819	%	S	methyl palmitate C1
4	3.290	28042	11559	0.263	%	T	methyl palmitoleate
5	3.709	5810072	1672754	54.407	%		ISTD
6	4.409	305811	66692	2.864	%		methyl stearate C18
7	4.626	2093533	466243	19.604	%	V	cis-9-oleic methyl es
8	5.079	1693607	391475	15.859	%	SV	methyl linoleate C18
9	5.392	1015	261	0.010	%	T	
10	5.798	7340	1551	0.069	%		methyl linoleate C1
11	6.729	6391	859	0.060	%		methyl arachidate C
Total		10678875	2873694				

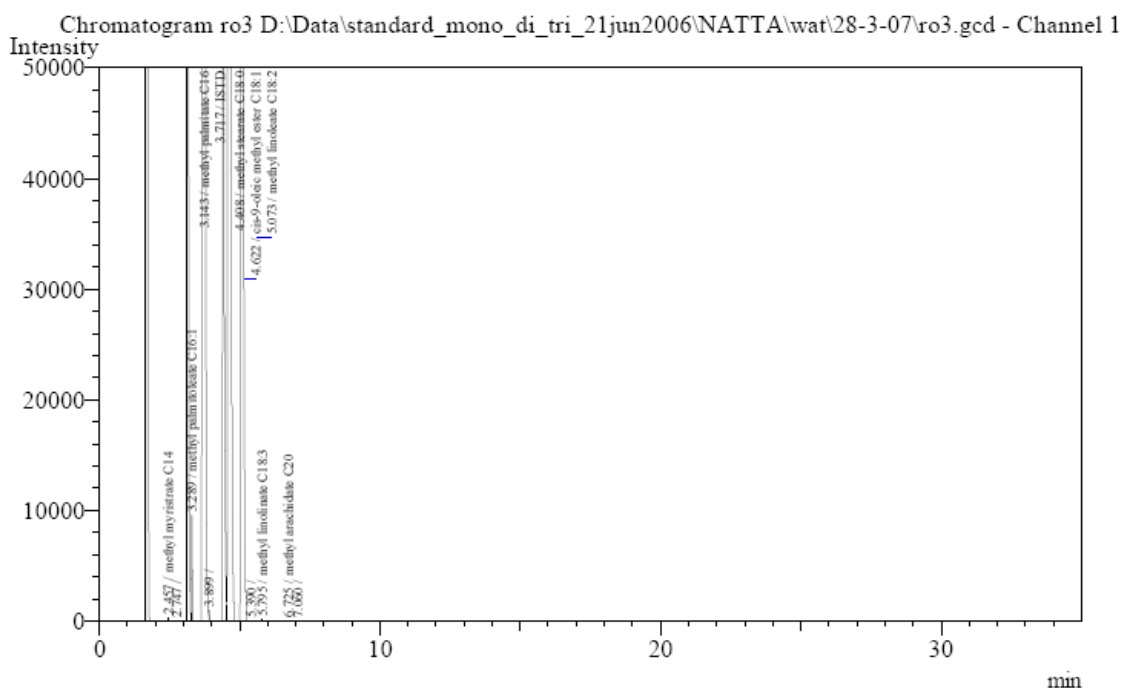
ภาพผนวกที่ ค8 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 25 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 6 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.452	4394	2757	0.033	%		methyl myristate C
2	2.741	1970	1117	0.015	%		
3	3.139	1206847	602063	9.131	%		methyl palmitate C1
4	3.283	66937	30278	0.506	%	V	methyl palmitoleate
5	3.702	4963947	1874015	37.555	%		ISTD
6	3.844	3298	1399	0.025	%	V	
7	3.893	4535	1674	0.034	%	V	
8	4.403	548755	182812	4.152	%		methyl stearate C18
9	4.636	3491364	1075044	26.414	%	V	cis-9-oleic methyl es
10	5.087	2893514	899118	21.891	%		methyl linoleate C18
11	5.371	2178	641	0.016	%		
12	5.782	12293	3746	0.093	%		methyl linoleate C1
13	6.699	13092	2792	0.099	%		methyl arachidate C
14	7.037	4531	896	0.034	%		
Total		13217655	4678352				

ภาพผนวกที่ ค9 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 25 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 8 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 6 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง

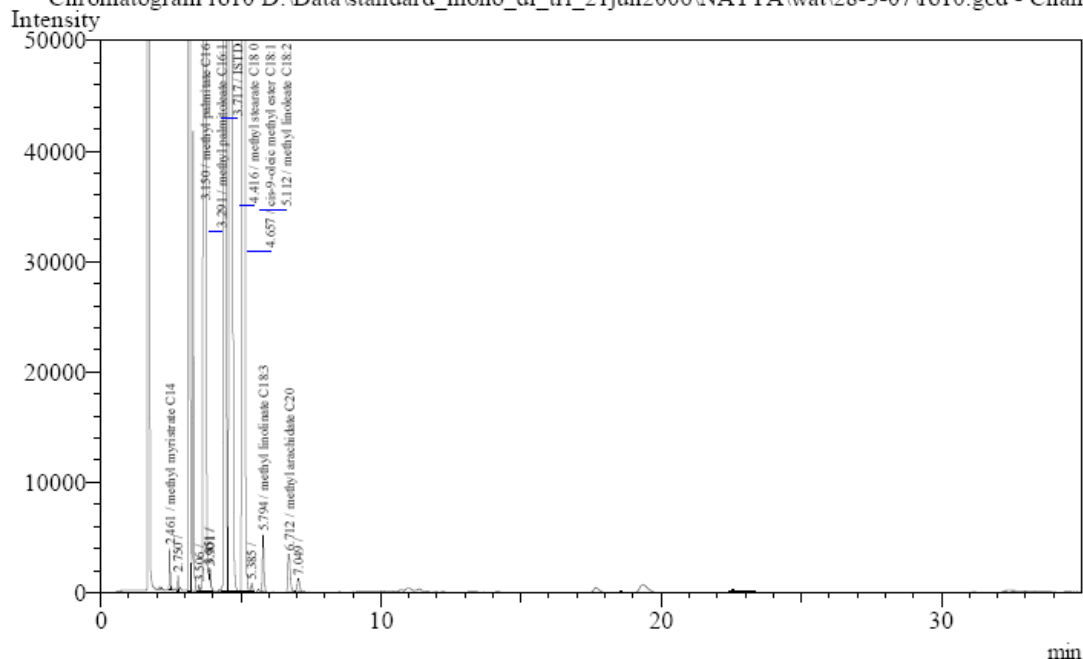


Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.457	2982	1442	0.026	%		methyl myristate C
2	2.747	2065	958	0.018	%		
3	3.143	565197	202875	4.956	%		methyl palmitate C1
4	3.289	32156	10737	0.282	%	V	methyl palmitoleate
5	3.717	7525129	2176123	65.987	%	SV	ISTD
6	3.899	1212	549	0.011	%	T	
7	4.408	241291	52634	2.116	%		methyl stearate C18
8	4.622	1672554	378975	14.667	%	V	cis-9-oleic methyl es
9	5.073	1347471	314739	11.816	%	S	methyl linoleate C18
10	5.390	2170	463	0.019	%	T	
11	5.795	6002	1287	0.053	%		methyl linolenate C1
12	6.725	4627	689	0.041	%		methyl arachidate C
13	7.060	1041	191	0.009	%		
Total		11403897	3141662				

ภาพผนวกที่ 10 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 25 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง

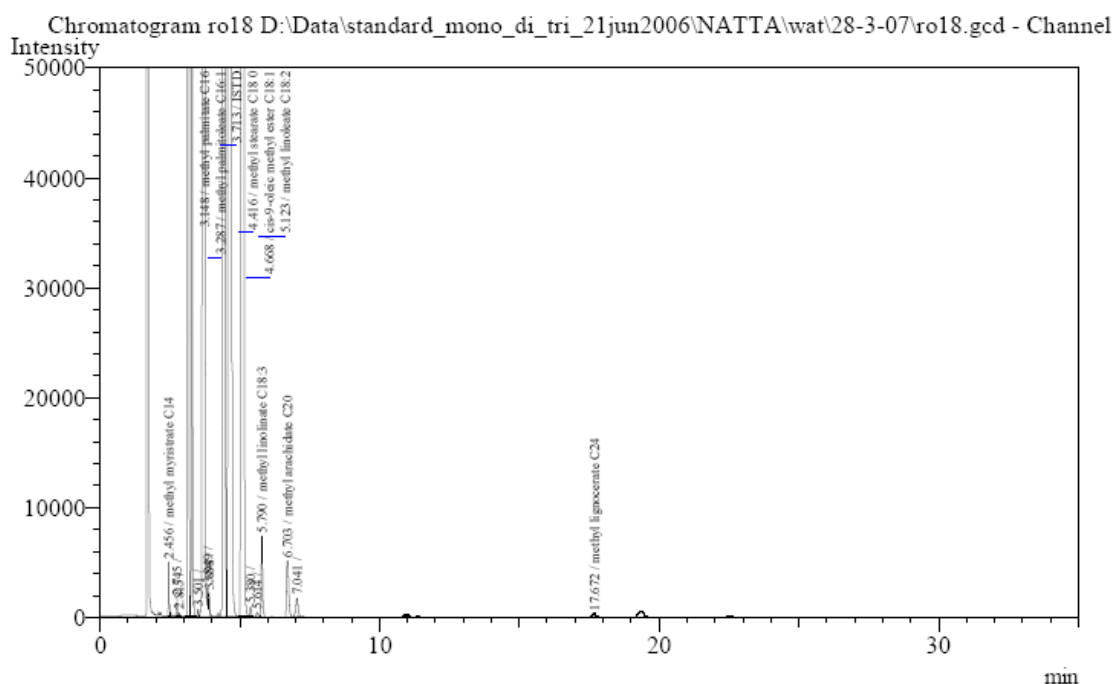
Chromatogram ro10 D:\Data\standard_mono_di_tri_21jun2006\NATTA\wat\28-3-07\ro10.gcd - Channel 1



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.461	7296	3760	0.036	%		methyl myristate C
2	2.750	2944	1366	0.015	%		
3	3.150	1939469	764764	9.695	%		methyl palmitate C1
4	3.291	111966	41625	0.560	%	V	methyl palmitoleate
5	3.506	1420	519	0.007	%		
6	3.717	6791493	2143142	33.949	%	SV	ISTD
7	3.851	1384	714	0.007	%	T	
8	3.901	2864	1135	0.014	%	TV	
9	4.416	850662	214009	4.252	%		methyl stearate C18
10	4.657	5552547	1388002	27.756	%	V	cis-9-oleic methyl es
11	5.112	4693438	1229826	23.461	%		methyl linoleate C18
12	5.385	2991	758	0.015	%	V	
13	5.794	19593	5136	0.098	%		methyl linolate C1
14	6.712	20046	3469	0.100	%		methyl arachidate C
15	7.049	6843	1166	0.034	%		
Total		20004956	5799391				

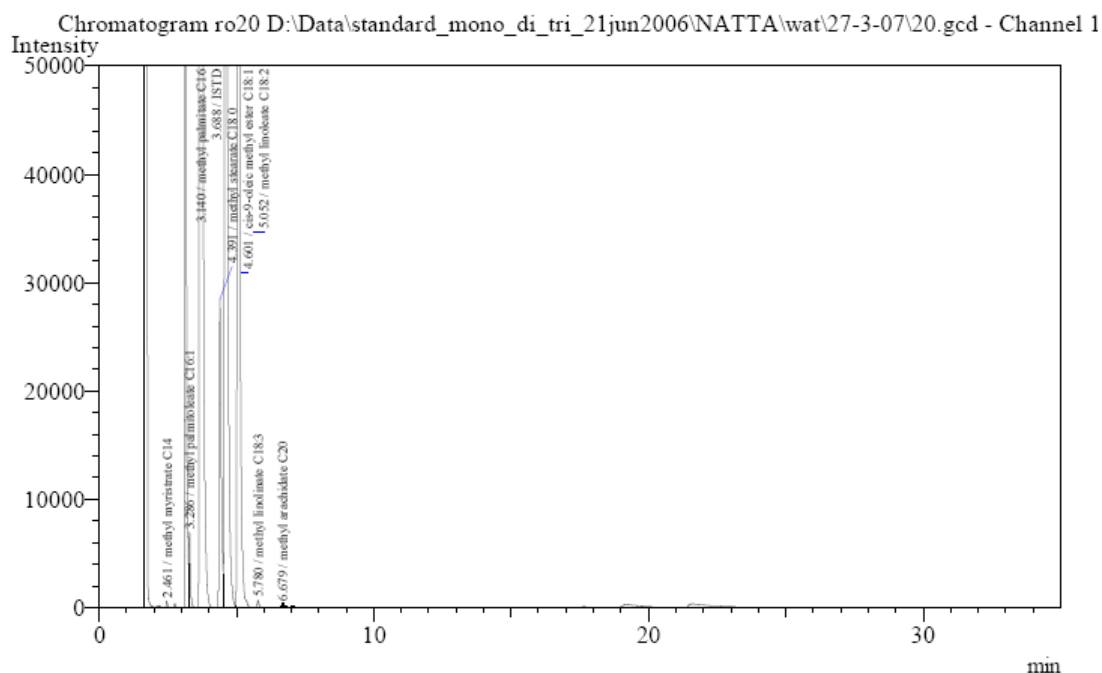
ภาพผนวกที่ ค11 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 25 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.456	8460	4946	0.036	%		methyl myristate C
2	2.745	3149	1639	0.013			
3	2.815	1066	332	0.005		V	
4	3.148	2417243	1095006	10.286	%		methyl palmitate C1
5	3.287	138830	58840	0.591	%	V	methyl palmitoleate
6	3.501	1708	706	0.007			
7	3.713	6687554	2256217	28.456	%	SV	ISTD
8	3.849	3440	1684	0.015		T	
9	3.898	3848	1575	0.016		TV	
10	4.416	1112174	306050	4.732	%		methyl stearate C18
11	4.668	7078281	1759094	30.119	%	V	cis-9-oleic methyl es
12	5.123	5973331	1518375	25.417	%		methyl linoleate C18
13	5.380	3426	918	0.015		V	
14	5.614	1902	417	0.008			
15	5.790	25339	7376	0.108	%	V	methyl linolenate C1
16	6.703	26379	5204	0.112	%		methyl arachidate C
17	7.041	9050	1690	0.039			
18	17.672	5946	554	0.025	%		methyl lignocerate C
Total		23501126	7020623				

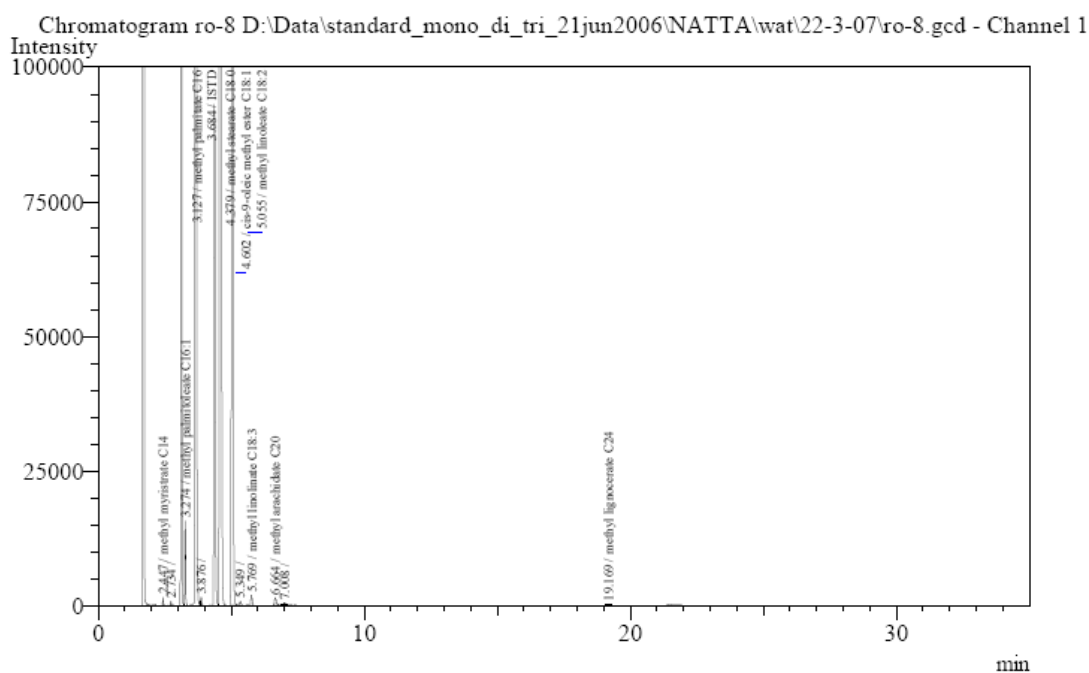
ภาพผนวกที่ 12 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 25 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 8 ของน้ำหนักสับดูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสับดูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.461	1806	644	0.028	%		methyl myristate C
2	3.140	379738	109593	5.885	%		methyl palmitate C1
3	3.286	27682	7007	0.429	%	V	methyl palmitoleate
4	3.688	3919609	925977	60.745	%		ISTD
5	4.391	146590	28551	2.272	%		methyl stearate C18
6	4.601	1085824	207773	16.828	%	V	cis-9-oleic methyl es
7	5.052	885493	175155	13.723	%	V	methyl linoleate C18
8	5.780	3436	719	0.053	%		methyl linolenate C1
9	6.679	2364	374	0.037	%		methyl arachidate C
Total		6452542	1455793				

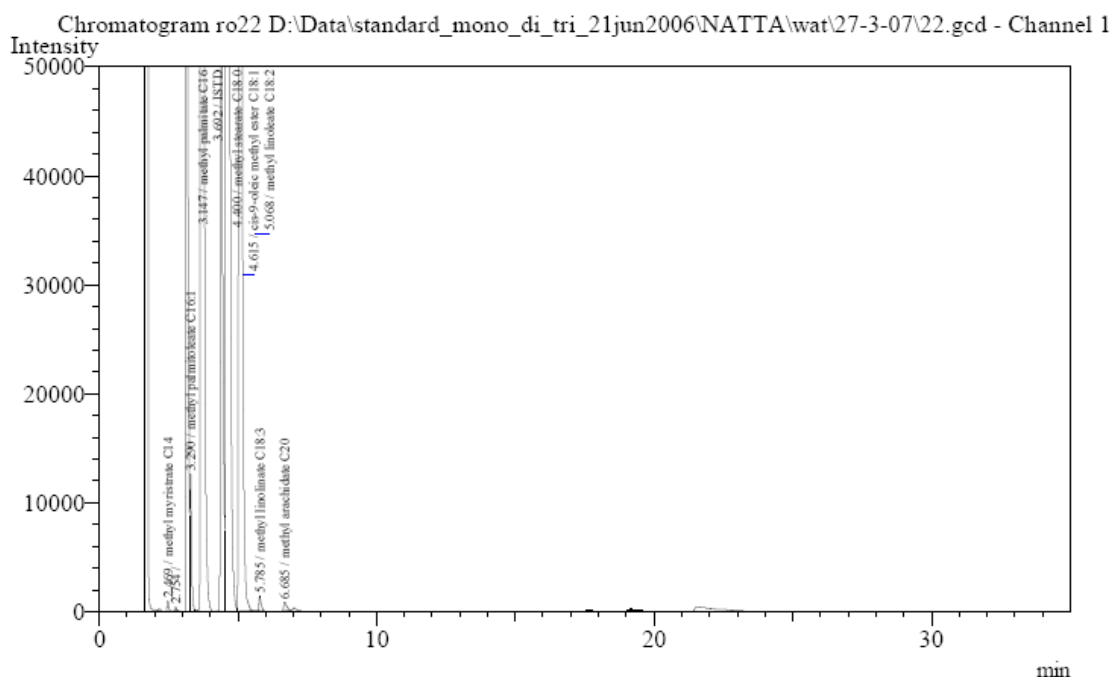
ภาพผนวกที่ 13 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt% KNO₃/Faujasite ในปริมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 6 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.447	2364	1544	0.029	%		methyl myristate C
2	2.734	1343	775	0.016			
3	3.127	627137	315054	7.621	%		methyl palmitate C1
4	3.274	34883	15662	0.424	%	V	methyl palmitoleate
5	3.684	3972667	1571965	48.276	%	S	ISTD
6	3.876	3487	1372	0.042		TV	
7	4.379	273555	93116	3.324	%		methyl stearate C18
8	4.602	1802837	608005	21.908	%	V	cis-9-oleic methyl es
9	5.055	1488689	488997	18.091	%		methyl linoleate C18
10	5.349	2328	679	0.028			
11	5.769	6554	1910	0.080	%		methyl linolate C1
12	6.664	6260	1372	0.076	%		methyl arachidate C
13	7.008	2142	432	0.026			
14	19.169	4841	453	0.059	%		methyl lignocerate C
Total		8229087	3101336				

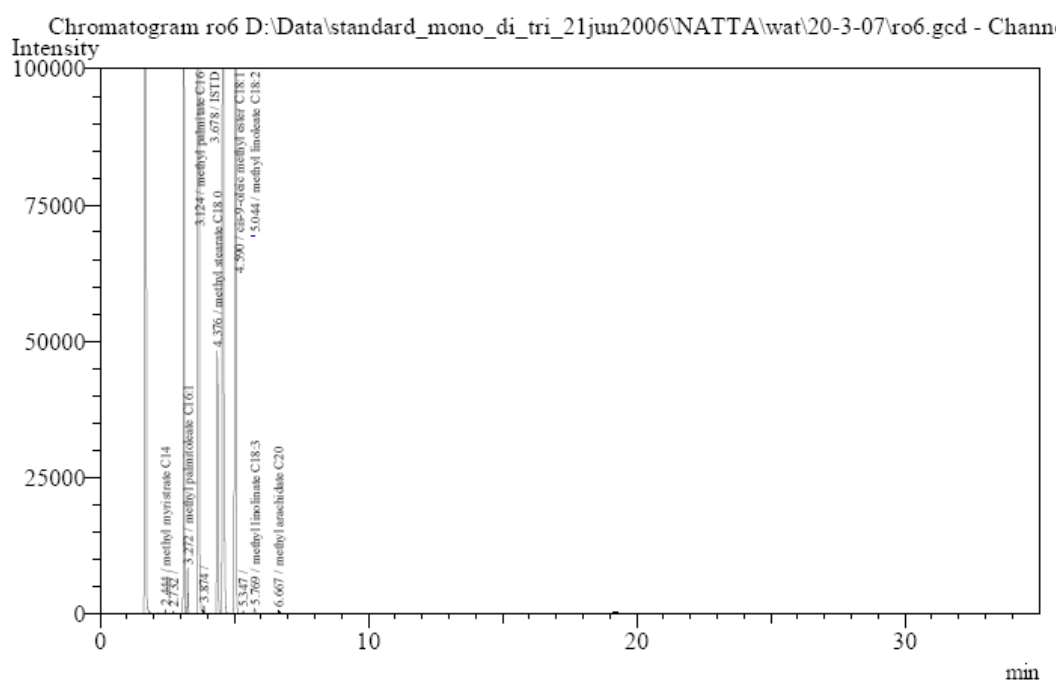
ภาพผนวกที่ 14 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักสับดูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 6 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.469	3478	978	0.036	%		methyl myristate C
2	2.754	1126	362	0.012	%		
3	3.147	823523	203462	8.642	%		methyl palmitate C1
4	3.290	56390	12620	0.592	%	V	methyl palmitoleate
5	3.692	4061138	851955	42.616	%	V	ISTD
6	4.400	325028	57226	3.411	%		methyl stearate C18
7	4.615	2334021	401931	24.492	%	V	cis-9-oleic methyl es
8	5.068	1910678	351349	20.050	%	V	methyl linoleate C18
9	5.785	7741	1407	0.081	%		methyl linolenate C1
10	6.685	6521	828	0.068	%		methyl arachidate C
Total		9529644	1882118				

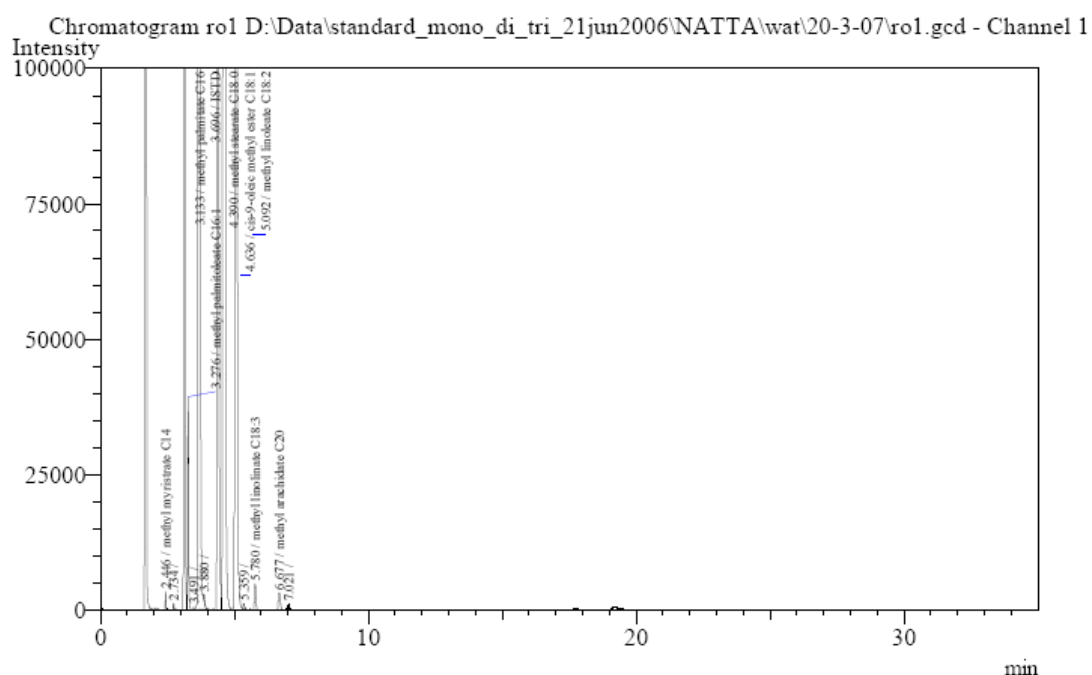
ภาพผนวกที่ 15 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 8 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 6 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.444	1351	892	0.026	%		methyl myristate C
2	2.732	1050	608	0.021			
3	3.124	296971	153855	5.814	%		methyl palmitate C1
4	3.272	18380	8516	0.360	%	V	methyl palmitoleate
5	3.678	3092773	1317192	60.546	%	S	ISTD
6	3.874	2873	1253	0.056		TV	
7	4.376	132155	48417	2.587	%		methyl stearate C18
8	4.590	854231	308442	16.723	%	V	cis-9-octadecenoic methyl es
9	5.044	699550	242828	13.695	%		methyl linoleate C18
10	5.347	2076	630	0.041			
11	5.769	3555	1089	0.070	%		methyl linolenate C1
12	6.667	3188	777	0.062	%		methyl arachidate C
Total		5108153	2084499				

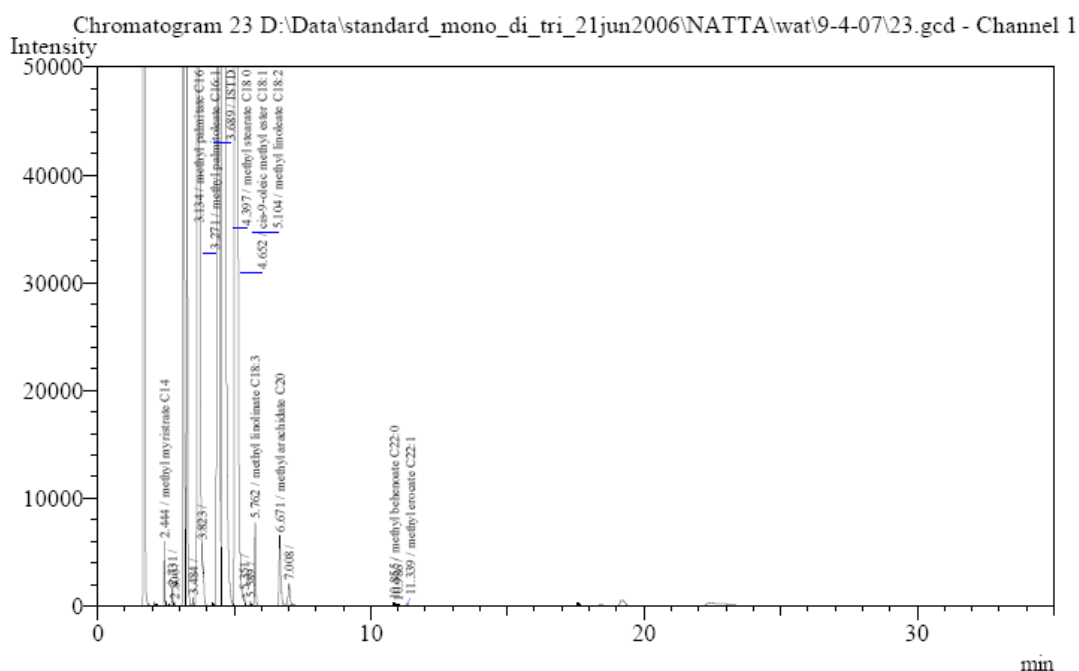
ภาพผนวกที่ 16 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักสับดูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสับดูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.446	5747	3408	0.035	%		methyl myristate C
2	2.734	2627	1336	0.016			
3	3.133	1561290	703328	9.398	%		methyl palmitate C1
4	3.276	98471	39383	0.593	%	V	methyl palmitoleate
5	3.491	1346	516	0.008		V	
6	3.696	5651272	1998277	34.017	%	S	ISTD
7	3.880	2429	1176	0.015		TV	
8	4.390	729701	204962	4.392	%		methyl stearate C18
9	4.636	4614952	1293219	27.779	%	V	cis-9-oleic methyl es
10	5.092	3898151	1087204	23.465	%	SV	methyl linoleate C18
11	5.359	3637	1028	0.022		T	
12	5.780	17838	4851	0.107	%		methyl linoleate C1
13	6.677	18928	3420	0.114	%		methyl arachidate C
14	7.021	6456	1128	0.039		V	
Total		16612845	5343236				

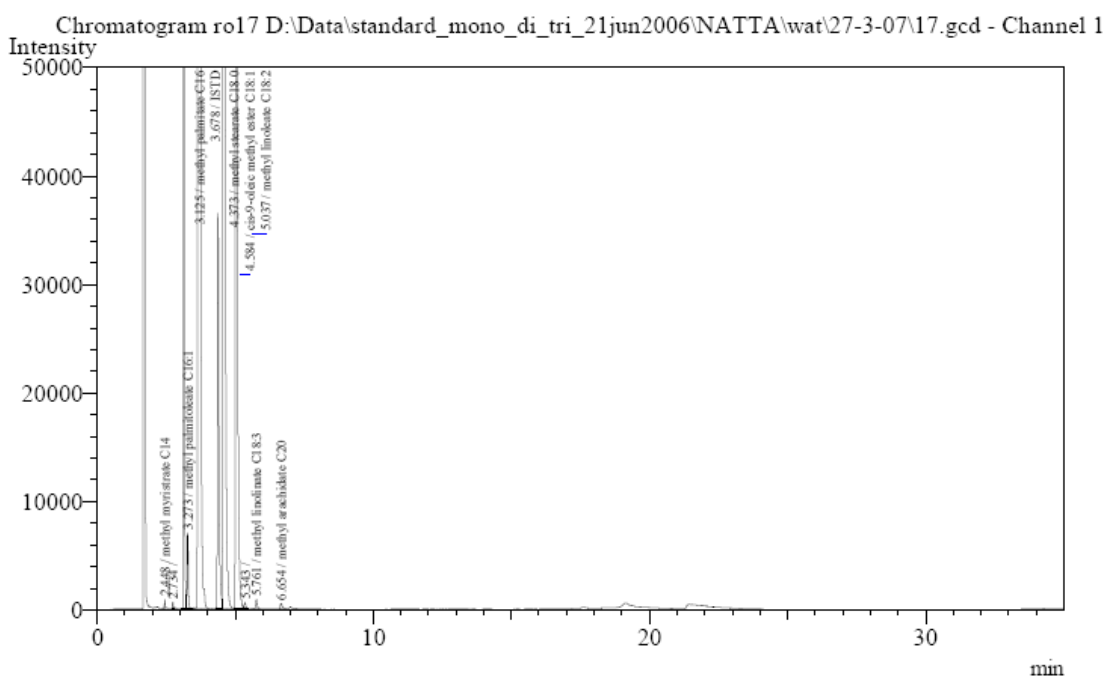
ภาพผนวกที่ 17 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักสับดูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสับดูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.444	9806	6006	0.042	%		methyl myristate C14
2	2.731	3201	1694	0.014		V	
3	2.800	1437	406	0.006		V	
4	3.134	2662487	1250286	11.336	%		methyl palmitate C16
5	3.271	160700	67085	0.684	%	SV	methyl palmitoleate C16
6	3.484	1696	769	0.007		T	
7	3.689	5272949	1894459	22.451	%	SV	ISTD
8	3.823	1139	686	0.005		T	
9	4.397	1226985	364022	5.224	%		methyl stearate C18
10	4.652	7694045	1868364	32.759	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
11	5.104	6377265	1599301	27.152	%	SV	methyl linoleate C18:2
12	5.351	1580	597	0.007		T	
13	5.589	1536	463	0.007			
14	5.762	26829	7821	0.114	%	SV	methyl linolenate C18:3
15	6.671	29491	6671	0.126	%	S	methyl arachidate C20
16	7.008	9701	1979	0.041			
17	10.855	2761	434	0.012	%		methyl behenoate C22:0
18	10.986	2006	313	0.009		V	
19	11.339	1351	246	0.006	%		methyl erocate C22:1
Total		23486965	7071602				

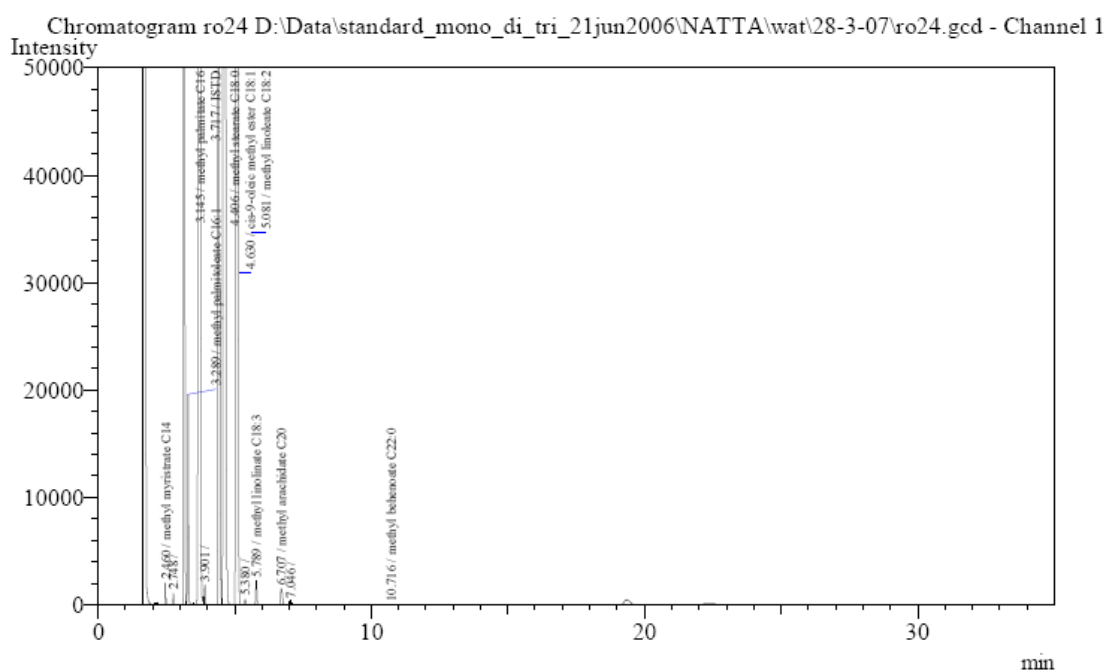
ภาพผนวกที่ ค18 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 8 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.448	1288	775	0.021	%		methyl myristate C
2	2.734	1020	534	0.017			
3	3.125	311845	130872	5.183	%		methyl palmitate C1
4	3.273	18831	7027	0.313	%	V	methyl palmitoleate
5	3.678	3904522	1382024	64.892	%	S	ISTD
6	4.373	127294	36462	2.116	%		methyl stearate C18
7	4.584	901973	258406	14.990	%	V	cis-9-oleic methyl es
8	5.037	743018	211672	12.349	%	S	methyl linoleate C18
9	5.343	1514	451	0.025		T	
10	5.761	3284	859	0.055	%		methyl linolate C1
11	6.654	2402	511	0.040	%		methyl arachidate C
Total		6016991	2029593				

ภาพผนวกที่ ค19 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 35 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 6 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง

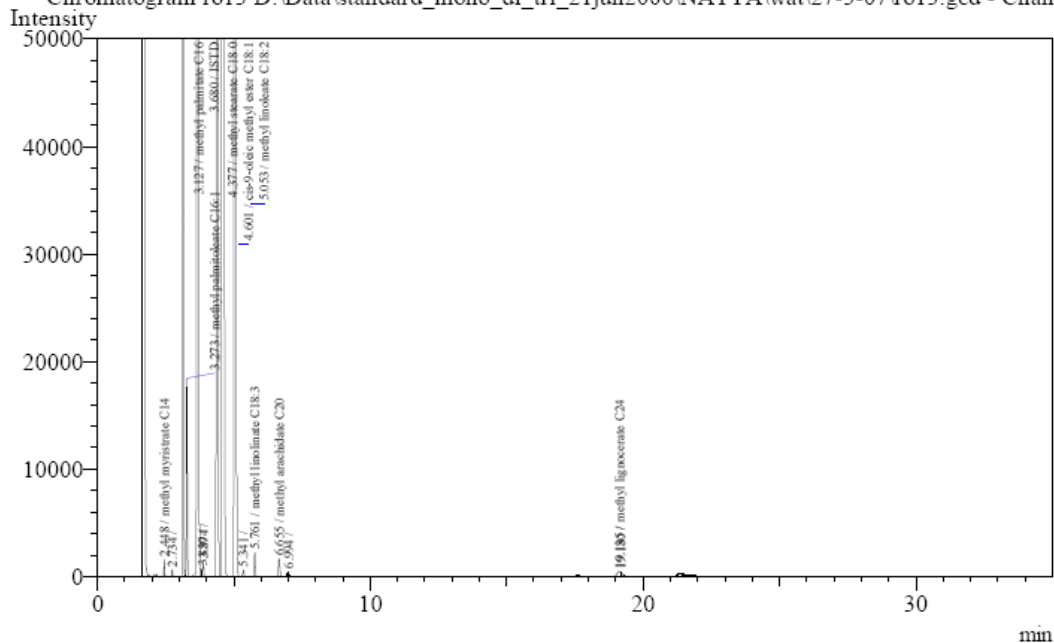


Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.460	3561	2152	0.029	%		methyl myristate C
2	2.748	2101	1157	0.017	%		
3	3.145	843250	392572	6.895	%	V	methyl palmitate C1
4	3.289	46935	19756	0.384	%	V	methyl palmitoleate
5	3.717	6536127	2264037	53.445	%	SV	ISTD
6	3.901	4687	1788	0.038	%	TV	
7	4.406	371211	113584	3.035	%		methyl stearate C18
8	4.630	2426033	752837	19.837	%	V	cis-9-oleic methyl es
9	5.081	1970892	620845	16.116	%		methyl linoleate C18
10	5.380	2591	695	0.021	%		
11	5.789	8743	2463	0.071	%		methyl linolate C1
12	6.707	8768	1719	0.072	%		methyl arachidate C
13	7.046	3002	554	0.025	%		
14	10.716	1761	308	0.014	%		methyl behenoate C
Total		12229662	4174467				

ภาพผนวกที่ ค20 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 35 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 6 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง

Chromatogram ro13 D:\Data\standard_mono_di_tri_21jun2006\NATTA\wat\27-3-07\ro13.gcd - Channel 1

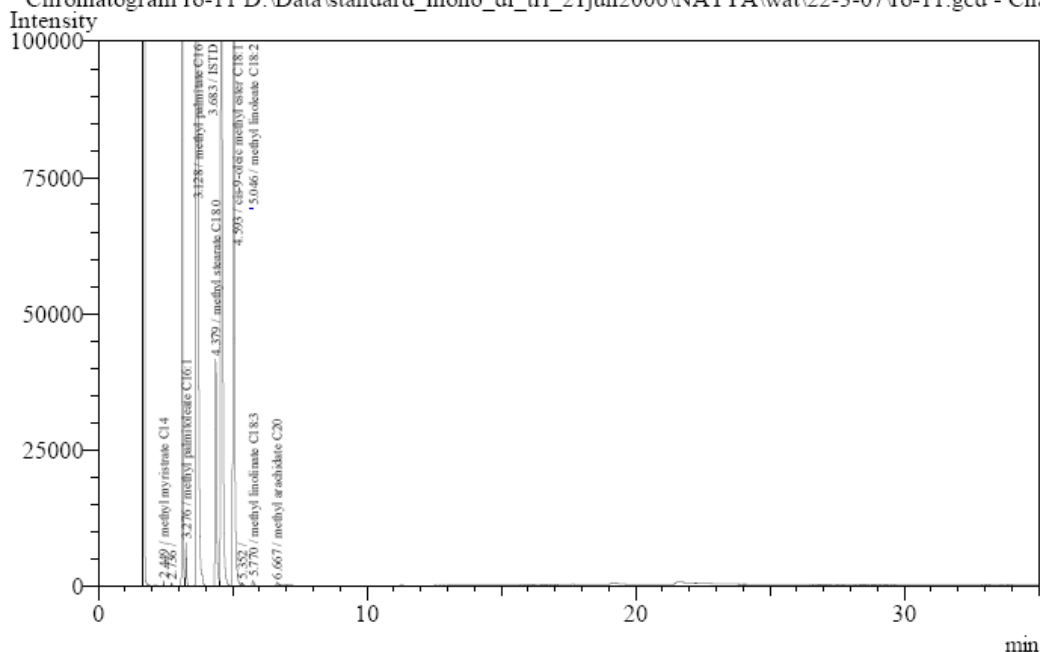


Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.448	2832	1628	0.031	%		methyl myristate C14
2	2.734	1366	716	0.015	%		
3	3.127	786877	370216	8.639	%		methyl palmitate C16
4	3.273	43538	18594	0.478	%	V	methyl palmitoleate
5	3.680	3794226	1499635	41.658	%		ISTD
6	3.830	1697	794	0.019	%	V	
7	3.874	3837	1410	0.042	%	V	
8	4.377	342812	117186	3.764	%		methyl stearate C18
9	4.601	2241105	733535	24.606	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
10	5.053	1862909	603502	20.454	%		methyl linoleate C18:2
11	5.341	2351	685	0.026	%		
12	5.761	8059	2377	0.088	%		methyl linolate C18:3
13	6.655	8028	1752	0.088	%		methyl arachidate C20
14	6.994	2724	554	0.030	%		
15	19.135	3627	466	0.040	%		methyl lignocerate C24
16	19.180	2021	394	0.022	%	V	
Total		9108009	3353444				

ภาพผนวกที่ 21 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 35 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 8 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 6 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง

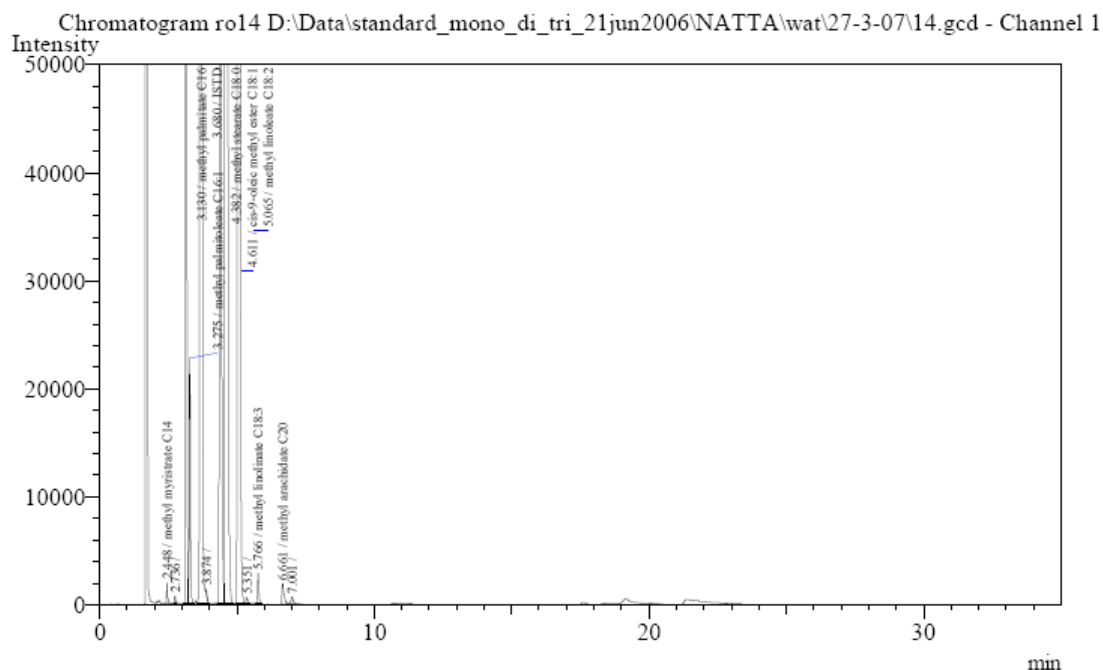
Chromatogram ro-11 D:\Data\standard_mono_di_tri_21jun2006\NATTA\wat\22-3-07\ro-11.gcd - Channel 1



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.449	1446	903	0.024	%		methyl myristate C
2	2.736	1100	591	0.018	%		
3	3.128	340023	151443	5.552	%		methyl palmitate C1
4	3.276	20385	7954	0.333	%	V	methyl palmitoleate
5	3.683	3850685	1410443	62.874	%	S	ISTD
6	4.379	139235	41600	2.273	%		methyl stearate C18
7	4.593	972879	285328	15.885	%	V	cis-9-oleic methyl es
8	5.046	790898	231335	12.914	%	S	methyl linoleate C18
9	5.352	1494	450	0.024	%	T	
10	5.770	3512	923	0.057	%		methyl linolate C1
11	6.667	2753	566	0.045	%		methyl arachidate C
Total		6124410	2131536				

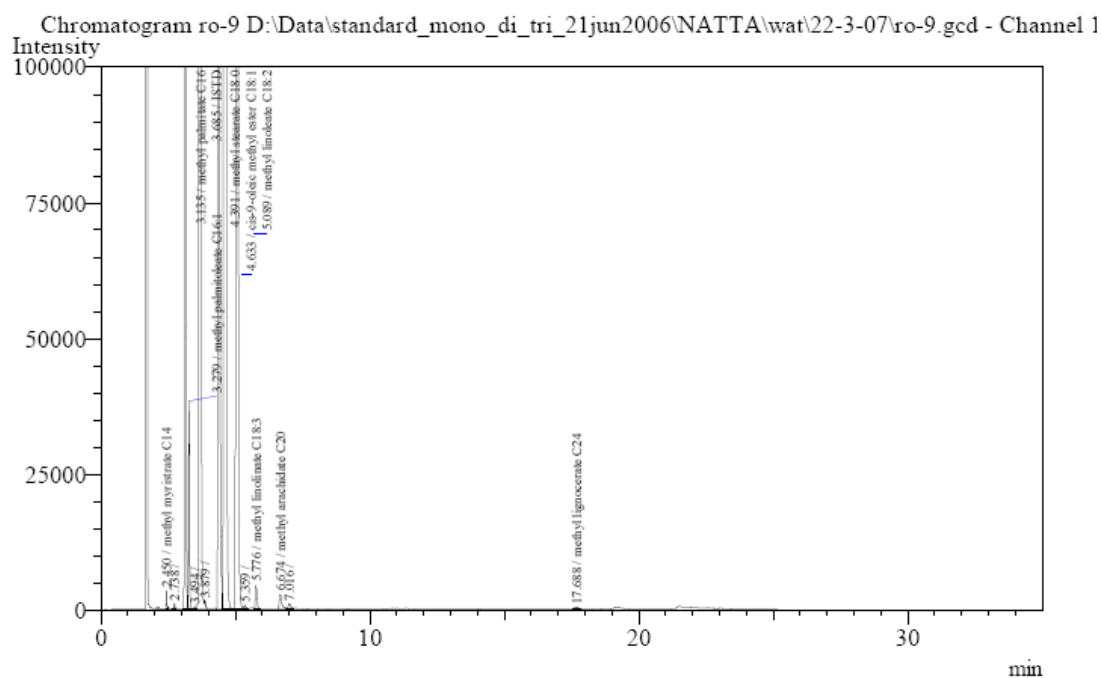
ภาพผนวกที่ ค22 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 35 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.448	4642	1922	0.039	%		methyl myristate C
2	2.736	1754	733	0.015			
3	3.130	1171852	436556	9.902	%		methyl palmitate C1
4	3.275	66528	22734	0.562	%	V	methyl palmitoleate
5	3.680	4014814	1299835	33.924	%	SV	ISTD
6	3.874	1128	508	0.010		T	
7	4.382	487153	125948	4.116	%		methyl stearate C18
8	4.611	3278806	880555	27.705	%	V	cis-9-oleic methyl es
9	5.065	2780688	759015	23.496	%	S	methyl linoleate C18
10	5.351	2209	556	0.019		T	
11	5.766	11369	2834	0.096	%		methyl linolenate C1
12	6.661	10619	1899	0.090	%		methyl arachidate C
13	7.001	3303	615	0.028			
Total		11834865	3533710				

ภาพผนวกที่ ค23 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 35 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง

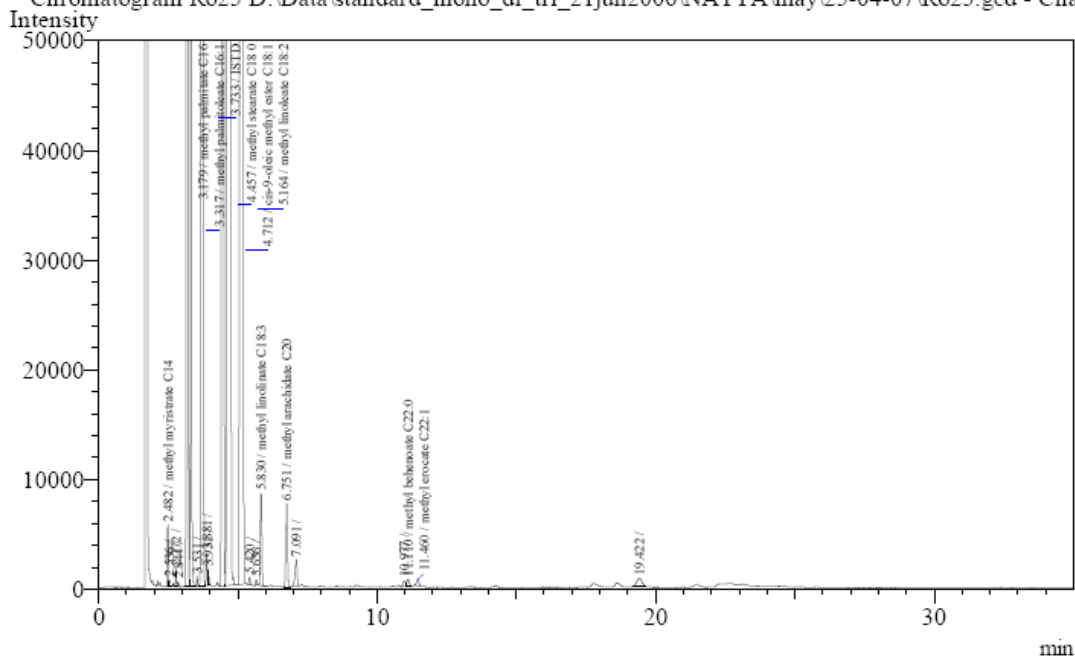


Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc	Units	Mark	Name
1	2.450	5808	3405	0.038	%		methyl myristate C
2	2.738	2022	1010	0.013			
3	3.135	1655878	712088	10.921	%		methyl palmitate C1
4	3.279	96754	38269	0.638	%	V	methyl palmitoleate
5	3.494	1174	484	0.008			
6	3.685	3957333	1392962	26.099	%	SV	ISTD
7	3.879	1415	632	0.009		TV	
8	4.391	702171	183607	4.631	%		methyl stearate C18
9	4.633	4681053	1259815	30.872	%	V	cis-9-oleic methyl es
10	5.089	4016632	1107895	26.490	%	S	methyl linoleate C18
11	5.359	2250	571	0.015		T	
12	5.776	16672	4349	0.110	%		methyl linolate C1
13	6.674	15386	2660	0.101	%		methyl arachidate C
14	7.016	5139	883	0.034			
15	17.688	3142	335	0.021	%		methyl lignocerate C
Total		15162829	4708965				

ภาพผนวกที่ ค24 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 35 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 8 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง

Chromatogram Ro25 D:\Data\standard_mono_di_tri_21jun2006\NATTA\may\25-04-07\Ro25.gcd - Channel 1

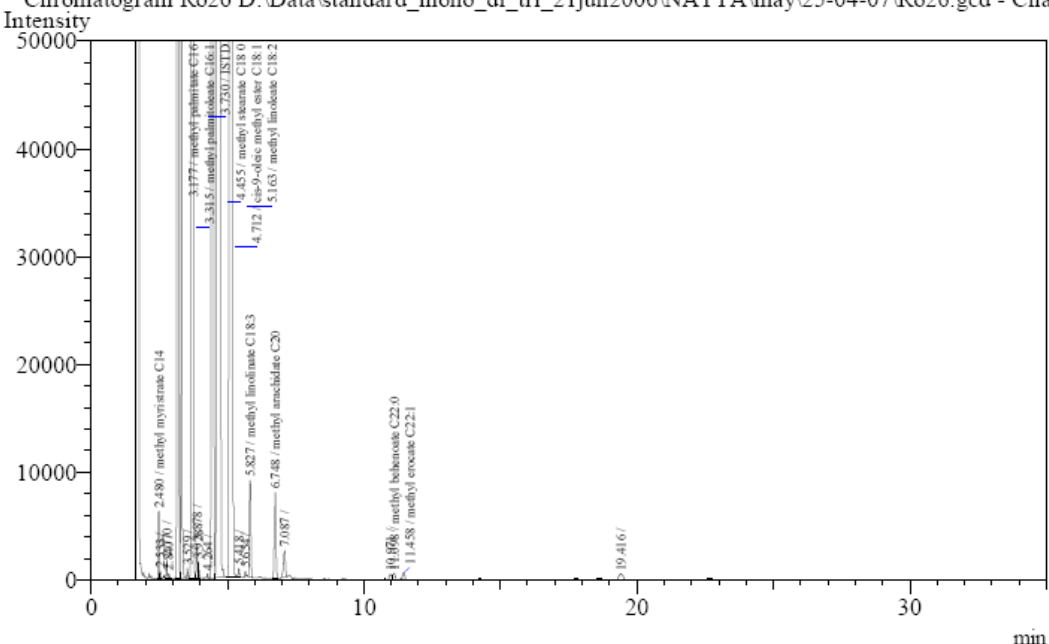


Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.482	10041	5577	0.044	%		methyl myristate C
2	2.536	1111	589	0.005		V	
3	2.772	3553	1577	0.016		V	
4	2.844	1523	438	0.007		V	
5	3.179	2747639	1219334	12.155	%	V	methyl palmitate C1
6	3.317	150166	61771	0.664	%	V	methyl palmitoleate
7	3.531	2121	864	0.009			
8	3.733	4055857	1519682	17.943	%	V	ISTD
9	3.881	7937	2936	0.035		V	
10	3.931	3537	1439	0.016		V	
11	4.457	1232605	344825	5.453	%		methyl stearate C18
12	4.712	8079768	1913398	35.744	%	SV	cis-9-oleic methyl es
13	5.164	6213454	1554347	27.488	%		methyl linoleate C18
14	5.420	2405	739	0.011			
15	5.656	1398	470	0.006			
16	5.830	27763	8370	0.123	%		methyl linolenate C1
17	6.751	31142	7604	0.138	%		methyl arachidate C
18	7.091	11780	2412	0.052			
19	10.977	3268	541	0.014			
20	11.110	4332	658	0.019	%	V	methyl behenoate C
21	11.460	3471	598	0.015	%		methyl erocate C22:
22	19.422	9526	760	0.042			
Total		22604397	6648929				

ภาพผนวกที่ ค25 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง

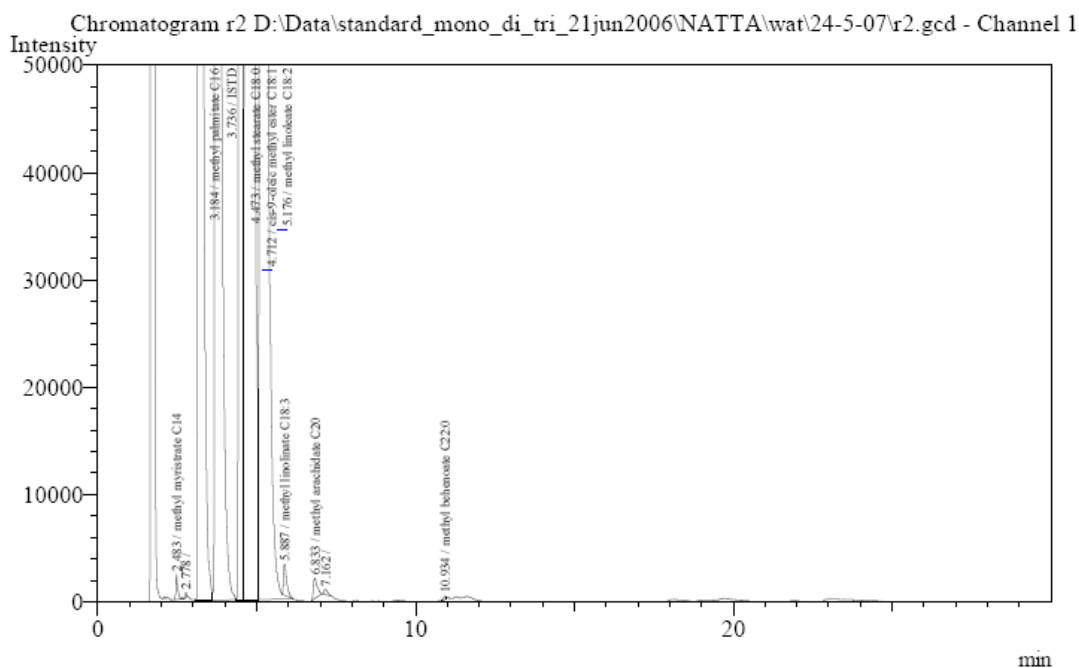
Chromatogram Ro26 D:\Data\standard_mono_di_tri_21jun2006\NATTA\may\25-04-07\Ro26.gcd - Channel 1



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.480	10922	6189	0.046	%		methyl myristate C
2	2.533	1178	631	0.005		V	
3	2.770	3683	1680	0.016		V	
4	2.840	1467	444	0.006		V	
5	3.177	2911645	1318077	12.320	%	V	methyl palmitate C1
6	3.315	158166	66009	0.669	%	V	methyl palmitoleate
7	3.529	2229	916	0.009			
8	3.730	4062713	1524253	17.191	%	V	ISTD
9	3.878	8467	3126	0.036		V	
10	3.928	3657	1470	0.015		V	
11	4.264	1011	376	0.004			
12	4.455	1304959	360385	5.522	%		methyl stearate C18
13	4.712	8525401	1995850	36.073	%	SV	cis-9-oleic methyl es
14	5.163	6538975	1622348	27.668	%	S	methyl linoleate C18
15	5.418	2458	763	0.010		T	
16	5.654	1395	492	0.006			
17	5.827	29111	8992	0.123	%		methyl linolate C1
18	6.748	32919	8011	0.139	%		methyl arachidate C
19	7.087	11999	2522	0.051			
20	10.971	3456	569	0.015			
21	11.098	4717	699	0.020	%	V	methyl behenoate C
22	11.458	3788	649	0.016	%		methyl erocate C22:
23	19.416	9150	736	0.039			
Total		23633466	6925187				

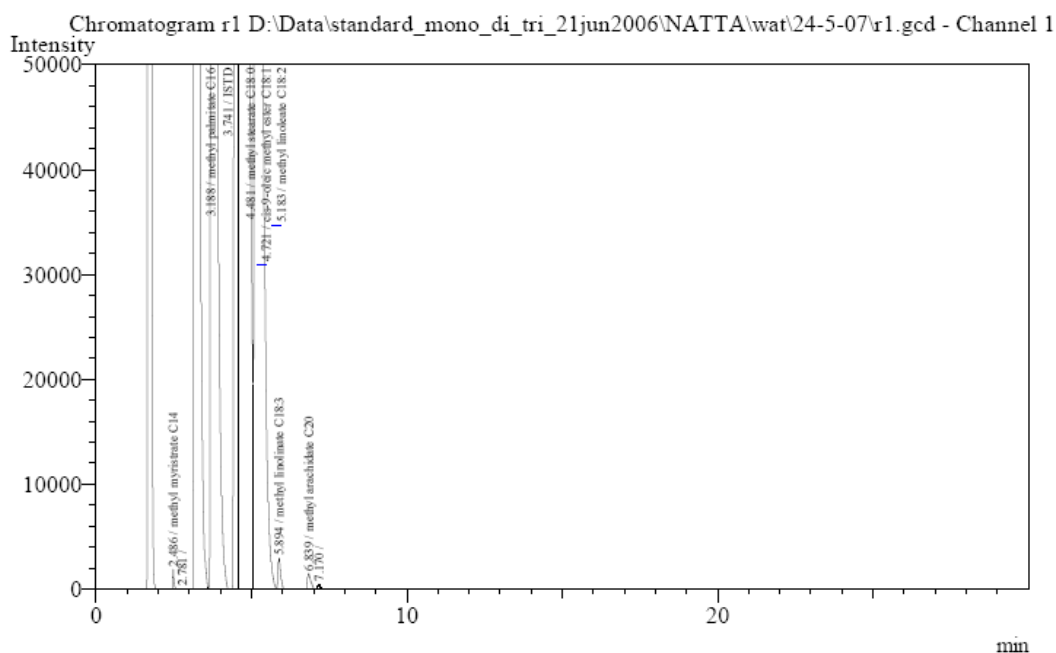
ภาพผนวกที่ 26 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 12 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 21 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.483	9486	2375	0.045	%	S	methyl myristate C
2	2.778	1221	457	0.006			
3	3.184	2660961	487030	12.634	%	V	methyl palmitate C1
4	3.736	3880723	605116	18.425	%	V	ISTD
5	4.473	880864	126321	4.182	%	V	methyl stearate C18
6	4.712	7786555	962095	36.969	%	V	cis-9-oleic methyl es
7	5.176	5801615	794727	27.545	%	SV	methyl linoleate C18
8	5.887	19211	2896	0.091	%	T	methyl linolenate C1
9	6.833	16252	1926	0.077	%		methyl arachidate C
10	7.162	3812	516	0.018			
11	10.934	1443	281	0.007	%		methyl behenoate C
Total		21062143	2983740				

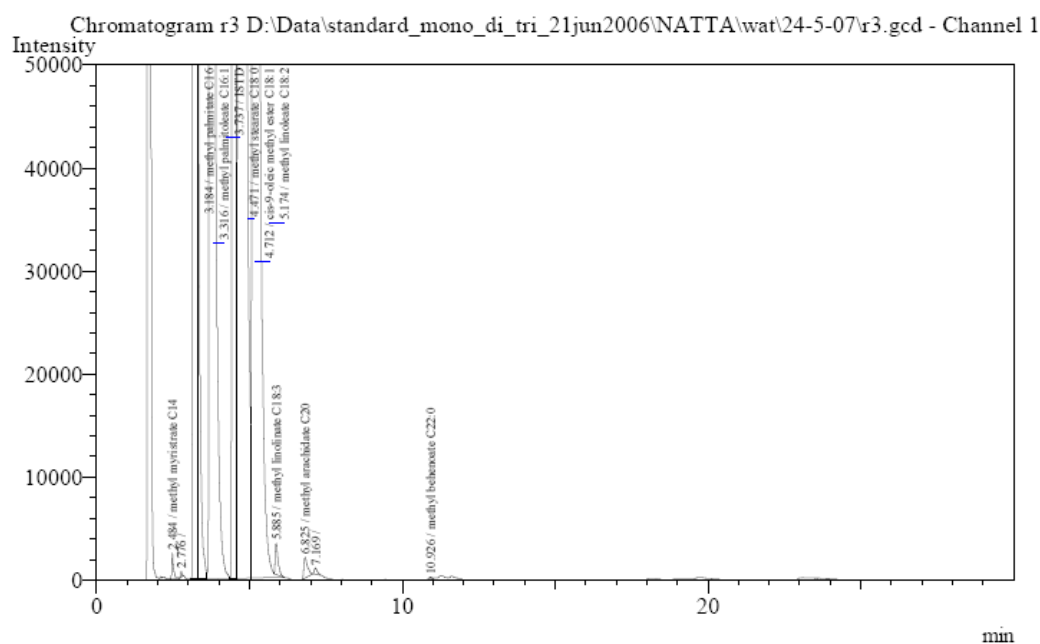
ภาพผนวกที่ ค27 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 8 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 31 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.486	10315	2503	0.045	%	S	methyl myristate C
2	2.781	1375	488	0.006			
3	3.188	2906072	509563	12.756	%		methyl palmitate C1
4	3.741	3867568	578398	16.977	%	V	ISTD
5	4.481	970839	135418	4.262	%	V	methyl stearate C18
6	4.721	8602205	1036057	37.760	%	V	cis-9-oleic methyl es
7	5.183	6379676	829289	28.004	%	SV	methyl linoleate C18
8	5.894	20524	3088	0.090	%	T	methyl linolenate C1
9	6.839	18326	2071	0.080	%		methyl arachidate C
10	7.170	4636	624	0.020			
Total		22781536	3097499				

ภาพผนวกที่ ค28 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 9 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 31 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.484	9586	2512	0.048	%	S	methyl myristate C
2	2.776	1424	530	0.007			
3	3.184	2250969	490294	11.220	%		methyl palmitate C1
4	3.316	280771	59823	1.400	%	V	methyl palmitoleate
5	3.737	3775466	622845	18.820	%	V	ISTD
6	4.471	855673	126344	4.265	%	V	methyl stearate C18
7	4.712	7336852	960268	36.572	%	V	cis-9-oleic methyl es
8	5.174	5510665	813341	27.469	%	SV	methyl linoleate C18
9	5.885	18679	2981	0.093	%	T	methyl linolenate C1
10	6.825	16292	1991	0.081	%		methyl arachidate C
11	7.169	3911	602	0.019			
12	10.926	1101	181	0.005	%		methyl behenoate C
Total		20061389	3081712				

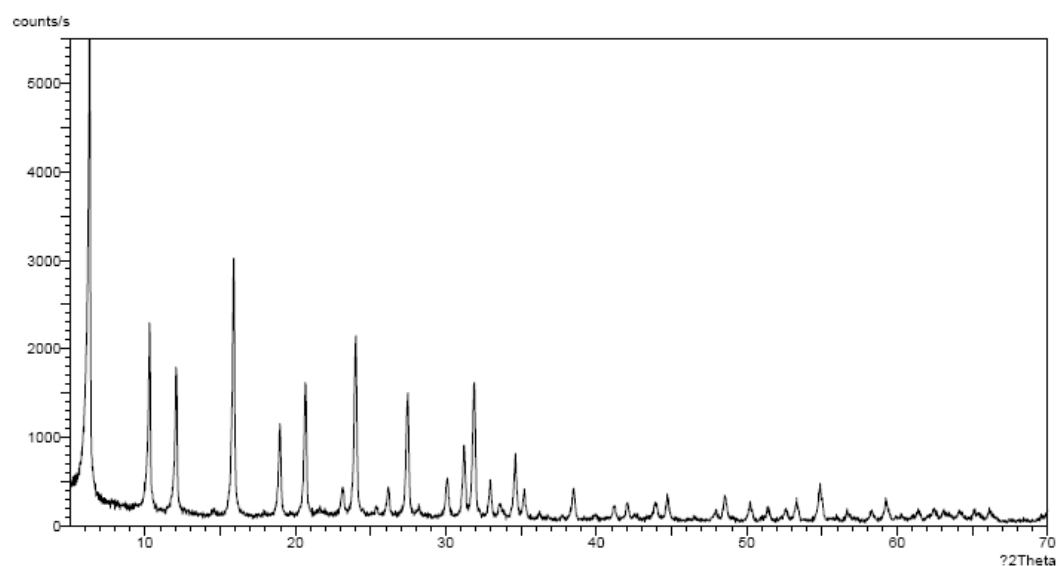
ภาพผนวกที่ ค29 โครมาโทแกรมและพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$ ในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักสบูดำ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบูดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 31 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง

ภาคผนวก ง

ข้อมูลจากการวิเคราะห์รูปแบบ XRD

X'Pert Graphics & Identify
Graph: Faujasite

Payoon
4/6/07 16:29

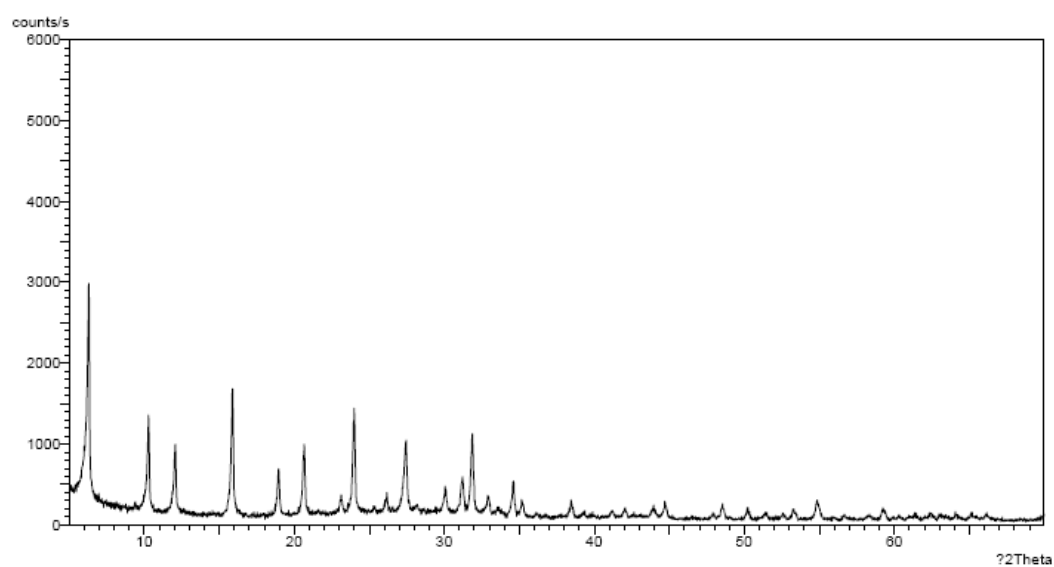


Philips Analytical

ภาพผนวกที่ ๑1 XRD pattern ของ Faujasite

X'Pert Graphics & Identify
Graph: 20%KNO₃

Payoon
4/6/07 16:29

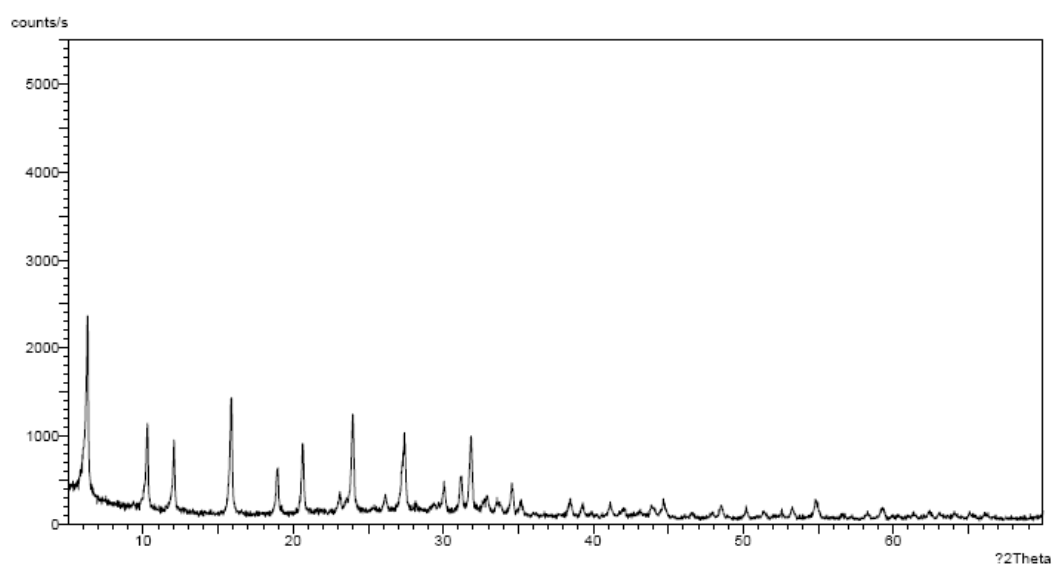


Philips Analytical

ภาพผนวกที่ ๑2 XRD pattern ของ 20 wt % KNO₃/Faujasite

X'Pert Graphics & Identify
Graph: 25%KNO3

Payoon
4/6/07 16:29

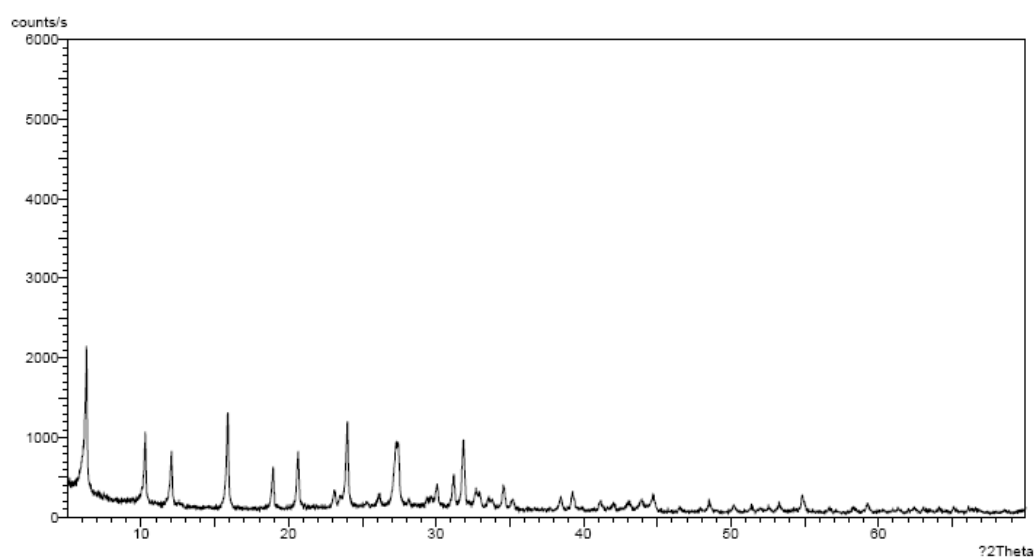


Philips Analytical

ภาพผนวกที่ 33 XRD pattern ของ 25 wt % KNO₃/Faujasite

X'Pert Graphics & Identify
Graph: 30%KNO3

Payoon
4/6/07 16:29

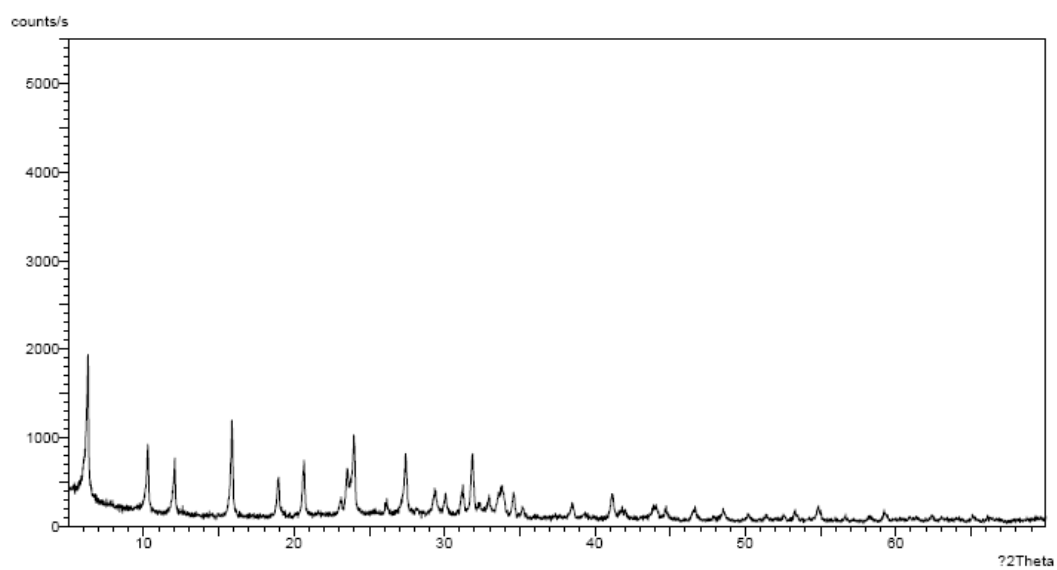


Philips Analytical

ภาพผนวกที่ 34 XRD pattern ของ 30 wt % KNO₃/Faujasite

X'Pert Graphics & Identify
Graph: 35%KNO3

Payoon
4/6/07 16:29

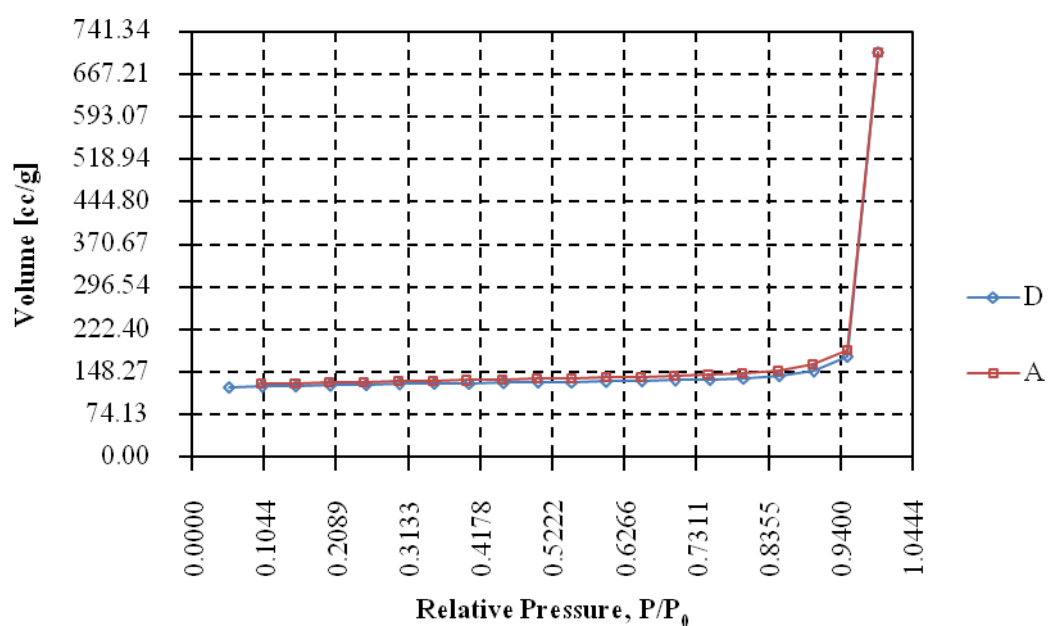


Philips Analytical

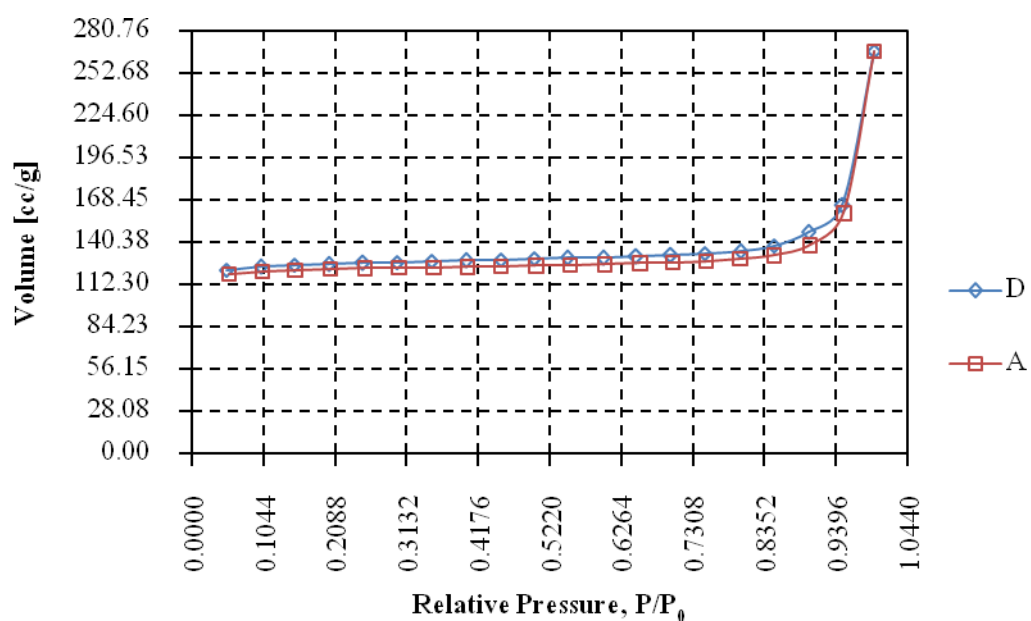
ภาพผนวกที่ 5 XRD pattern ของ 35 wt % KNO_3 /Faujasite

ภาคผนวก จ

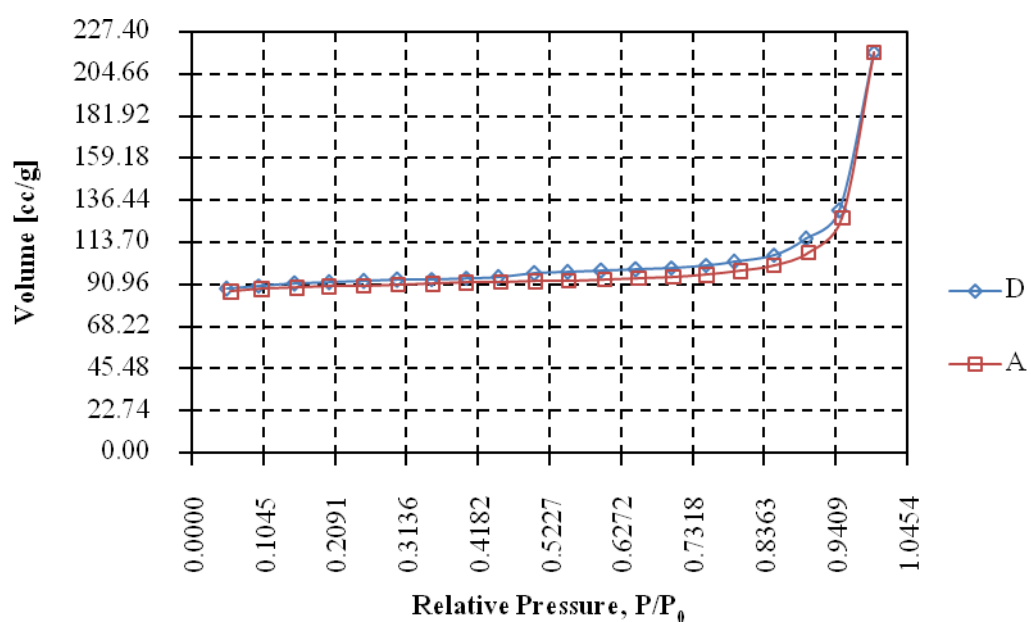
ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่ BET



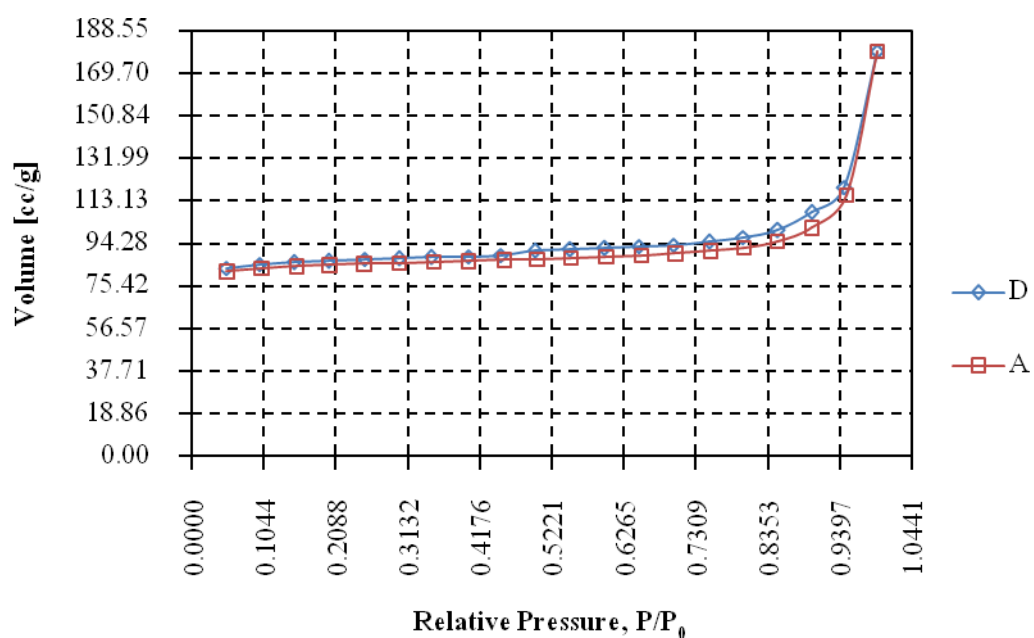
ภาพผนวกที่ จ1 ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของ 20 wt % $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$



ภาพผนวกที่ จ2 ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของ 25 wt % $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$



ภาพผนวกที่ ๓3 ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของ 30 wt % $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$



ภาพผนวกที่ ๓4 ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของ 35 wt % $\text{KNO}_3/\text{Faujasite}$

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายอำนาจ คำหล้า
วัน เดือน ปี ที่เกิด	8 กรกฎาคม 2523
สถานที่เกิด	196 ม.5 ต.นาสี อ.เมือง จ.อุดรธานี
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี: วท.บ. ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	Piping Engineer
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	Thai Nippon Steel Engineering & Construction Corp.,Ltd
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการเคยูไปโอซีเซล