ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี	วิศวกรรมเคมี
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส

A Kinetics Study: Transesterification of *Jatropha curcas* Oil Using Base Catalyst

นามผู้วิจัย นายวินัย โพธิ์สุวรรณวัฒนา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรัญ ฉัตรมานพ, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(รองศาสตราจารย์เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(รองศาสตราจารย์ไพศาล คงคาฉุยฉาย, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส

A Kinetics Study: Transesterification of *Jatropha curcas* Oil Using Base Catalyst

โดย

นายวินัย โพธิ์สุวรรณวัฒนา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
พ.ศ. 2551

วินัย โพธิ์สุวรรณวัฒนา 2551: การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรัญ ฉัตรมานพ, D.Eng. 140 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่ทำการศึกษาคืออุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส และ อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 1:9 และ 1:12 เพื่อดูผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา การทำปฏิกิริยาในระบบแบบกะ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ด้วยความเร็วในการกวน 600 รอบ/นาที การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี กำหนดให้กลไกทางจลนพลศาสตร์ในการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยา 3 ขั้นตอนไม่เกิดการผันกลับ

พบว่าเมื่ออุณหภูมิและอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเพิ่มสูงขึ้นการเกิดปฏิกิริยาก็เพิ่มสูงขึ้น โดยสภาวะที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่ดีที่สุดคือเหลือไตรกลีเซอไรด์และเกิดเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 1.77 และ 96.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้ พบว่าค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา k_1, k_2 และ k_3 ของการสลายของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 อุณหภูมิที่สูงขึ้นค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาก็เพิ่มสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ค่า k_1 k_2 และ k_3 มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.18383 0.59575 และ 0.73143 นาที$^{-1}$ ตามลำดับ แนวโน้มของ ค่า k_1 k_2 และ k_3 พบว่า $k_3 > k_2 > k_1$ ซึ่งขั้นตอนการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นไดกลีเซอไรด์เป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุดและเป็นขั้นกำหนดปฏิกิริยา ส่วนค่าพลังงานกระตุ้นของขั้นตอนไตรกลีเซอไรด์เปลี่ยนเป็นไดกลีเซอไรด์ ขั้นตอนไดกลีเซอไรด์เปลี่ยนเป็นโมโนกลีเซอไรด์และขั้นตอนโมโนกลีเซอไรด์เปลี่ยนเป็นกลีเซอรอลมีค่าเท่ากับ 60.32 66.26 และ41.23 กิโลจูล/โมล ตามลำดับ

_____ _____ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Winai Posuwanwattana 2008: A Kinetics Study: Transesterification of *Jatropha curcas* Oil Using Base Catalyst. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Jarun Chutmanop, D.Eng. 140 pages.

This research aims to study kinetics study of transesterification process of *Jatropha curcas* oil using potassium hydroxide(1 wt % of oil) as a catalyst. Effect of temperature and molar ratio of oil to methanol on both the reaction rate and the reaction rate constants were investigated. Experiments were performed in a batch system stirred at 600 rpm over 90 minutes at 40, 50 and 60 ^{o}C and the molar ratio of oil to methanol at 1:7, 1:9 and 1:12. Three main unconverted reactant; monoglyceride, diglyceride and triglyceride; were detected by Gas Chromatography. Proposing mechanism was three-elementaly-step irreversible reactions.

According to the results, the reaction increases with increasing temperature and molar ratio of oil to methanol. The high conversion was observed at 60 ^{o}C and at the molar ratio of oil to methanol of 1:12, in which 1.77 wt% of unconverted triglyceride and 96.01 wt% methyl ester were obtained. A kinetic model follows a pseudofirst-order mechanism for irreversible reaction. When the temperature is rising, at the molar ratio of oil to methanol 1:12 the rate constants for hydrolysis of triglyceride (k_1) diglyceride (k_2) and monoglyceride (k_3) is increased. The highest value of k_1 k_2 and k_3 obtained at 60 ^{o}C were 0.18383 0.59575 and 0.73143 min^{-1} respectively. The results showed the trend of $k_3 > k_2 > k_1$. Moreover, it was found that hydrolysis of triglyceride is the slowest step and can be considered as a rate determining step. In addition, activation energy of the hydrolysis of triglyceride diglyceride and monoglyceride were 60.32 66.26 and 41.23. kJ/mole respectively.

_____ _____ ___ / ___ / ____

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและความกรุณาจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรัญ ฉัตรมานพ ประธานกรรมการที่ปรึกษา และรองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ข้าพเจ้าขอคำปรึกษาตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ที่ให้ความดูแลเอาใจใส่ และให้คำปรึกษาแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์อย่างดียิ่ง และขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ ลิ้มตระกูล ประธานการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธินันท์ ท่อแก้ว ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง โครงการเคยู-ไบโอดีเซล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ ครอบครัว พี่ๆ เพื่อนๆ น้อง ๆ วิศวกรรมเคมีและบุคคลรอบข้างทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และความรู้สึกที่ดีตลอดมา

ประโยชน์อันใดอันจะเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่และคณาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาอบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำต่างๆ จนถึงปัจจุบัน

วินัย โพธิ์สุวรรณวัฒนา

กันยายน 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ (1)

สารบัญตาราง (3)

สารบัญภาพ (8)

คำนำ 1

วัตถุประสงค์ 3

การตรวจเอกสาร 4

อุปกรณ์และวิธีการ 31

ผลและวิจารณ์ 41

สรุปและข้อเสนอแนะ 58

สรุป 58

ข้อเสนอแนะ 59

เอกสารและสิ่งอ้างอิง 60

ภาคผนวก 65

ภาคผนวก ก การคำนวณหาอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 66

ภาคผนวก ข การคำนวณหาค่าความเป็นกรด (Acid Value) 67

ภาคผนวก ค การสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อสอบเทียบ (Calibration curve standard) ของโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ และกลีเซอรอล (วิธีมาตรฐาน EN 14105) 68

ภาคผนวก ง การคำนวณหาปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ ในน้ำมันชั้นบน 74

ภาคผนวก จ การคำนวณหาน้ำหนักสารในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล 87

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ฉ การคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น 98
ภาคผนวก ช ลักษณะโครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบนจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี 99
ภาคผนวก ซ Code ของ MATLAB Version 7.5.0.342 R2007b สำหรับการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้และปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น 125
ภาคผนวก ฌ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ที่ได้จากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ โดยใช้โปรแกรม MATLAB Version 7.5.0.342 R2007b 139
ประวัติการศึกษา และการทำงาน 140

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ข้อมูลทั่วไปและแหล่งที่พบของกรดไขมัน	6
2	ปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ	8
3	กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันสบู่ดำ	10
4	คุณสมบัติทางฟิสิกส์เคมีของน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันดีเซล	10
5	คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบโอดีเซลจากน้ำมันชนิดต่างๆ	12
6	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสของน้ำมัน	14
7	ผลิตภัณฑ์และสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่เกิดจากวิธีเมทานอลเหนือวิกฤตกับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทั่วไป	14
8	การออกแบบการทดลองศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ	35
9	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (k_1 k_2 และ k_3) ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส	56
10	ค่าพลังงานกระตุ้นขั้นตอนของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์	57

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ค1	สารมาตรฐาน	68
ค2	ปริมาณการเตรียมสารละลายมาตรฐาน	69
ค3	พื้นที่พีคของกลีเซอรอลและพื้นที่พีคของ Internal standard	69
ค4	พื้นที่พีคของโมโนโอเลอินและพื้นที่พีคของ Internal standard	70
ค5	พื้นที่พีคของไดโอเลอินและพื้นที่พีคของ Internal standard	71
ค6	พื้นที่พีคของไตรโอเลอินและพื้นที่พีคของ Internal standard	72
ง1	ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1	78
ง2	ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2	79
ง3	ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3	80
ง4	ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:9 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1	81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ง5	ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:9 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2	82
ง6	ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:9 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3	83
ง7	ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1	84
ง8	ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2	85
ง9	ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
จ1	ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1	89
จ2	ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2	90
จ3	ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3	91
จ4	ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:9 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1	92
จ5	ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:9 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2	93

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
จ6	ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล เป็น 1:9 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3	94
จ7	ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล เป็น 1:12 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1	95
จ8	ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล เป็น 1:12 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2	96
จ9	ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล เป็น 1:12 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3	97
ฌ1	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ (k_1 k_2 และ k_3) ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส	139

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์	4
2	โครงสร้างโมเลกุลของไดกลีเซอไรด์	5
3	โครงสร้างโมเลกุลของโมโนกลีเซอไรด์	5
4	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นระหว่างน้ำมันกับแอลกอฮอล์	15
5	ปฏิกิริยาเคมีในการเตรียมสารอัลคอกซี่	16
6	ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชั่นระหว่างกรดไขมันอิสระกับแอลกอฮอล์	16
7	ปฏิกิริยาการเกิดสบู่ (Saponnification)	19
8	ปฏิกิริยาการเกิดสบู่จากเมทิลเอสเทอร์	19
9	กลไกปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น	20
10	สมการเชิงอนุพันธ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น	21
11	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นแบบขั้นตอนเดียวไม่เกิดการผันกลับ	25
12	สมการเชิงอนุพันธ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น 3 ขั้นตอนไม่เกิดการผันกลับ	27
13	ชุดอุปกรณ์ three neck flask ขนาด 500 มิลลิลิตร พร้อมเตาให้ความร้อน	37
14	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น 3 ขั้นตอนไม่เกิดการผันกลับ	38
15	สมการเชิงอนุพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งไม่ผันกลับแบบไม่แท้	39
16	สมการเชิงอนุพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับสองไม่ผันกลับแบบไม่แท้	39
17	น้ำมันตัวอย่างที่ทำการปั่นเหวี่ยงให้แยกชั้นที่ช่วงเวลา 0.5 1 2 4 7 12 20 30 60 และ 90 นาที	41
18	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ กับเวลา ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	43
19	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ กับเวลา ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ กับเวลา ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา90 นาที ที่อุณหภูมิ 60องศาเซลเซียส	44
21	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ กับเวลา ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7	46
22	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ กับเวลา ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9	46
23	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ กับเวลา ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12	47
24	เปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้ แสดงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ที่เวลาต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	50
25	เปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้ แสดงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ที่เวลาต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	เปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้ แสดงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	52
27	เปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ แสดงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	53
28	เปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ แสดงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	54
29	เปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ แสดงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	55
30	Arrhenius plot ระหว่างค่า ln k กับ 1/[T] (เคลวิน)$^{-1}$	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

ค1	กราฟมาตรฐานของกลีเซอรอล	70
ค2	กราฟมาตรฐานของโมโนกลีเซอไรด์	71
ค3	กราฟมาตรฐานของไดกลีเซอไรด์	72
ค4	กราฟมาตรฐานของไตรกลีเซอไรด์	73
ง1	ตัวอย่างโครมาโทแกรม แสดงค่า Area และค่า Retention time (RT) ของโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ ในน้ำมันชั้นบน ที่เวลา 7 นาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7	74
ช1	โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 7 นาที (ก) และ 12 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	99
ช2	โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 20 นาที (ก) และ 30 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	100
ช3	โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 60 นาที (ก) และ 90 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	101
ช4	โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 7 นาที (ก) และ 12 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	102
ช5	โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 20 นาที (ก) และ 30 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	103

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

ช6 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 60 นาที (ก) และ 90 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 104

ช7 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 12 นาที (ก) และ 20 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 105

ช8 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 30 นาที (ก) และ 60 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 106

ช9 โครมาโทแกรมของน้ำมันบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 90 นาที ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 (ก) และที่เวลา 7 นาที ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 (ข) ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 107

ช10 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 12 นาที (ก) และ 20 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 108

ช11 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 30 นาที (ก) และ 60 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 109

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

ช12 โครมาโทแกรมของน้ำมันบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 90 นาที ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 (ก) และที่เวลา 7 นาที ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 (ข) ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 110

ช13 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 12 นาที (ก) และ 20 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 111

ช14 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 30 นาที (ก) และ 60 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 112

ช15 โครมาโทแกรมของน้ำมันบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 90 นาที ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 (ก) และที่เวลา 12 นาที ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 (ข) ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 113

ช16 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 20 นาที (ก) และ 30 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 114

ช17 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 60 นาที (ก) และ 90 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 115

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

ช18 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 7 นาที (ก) และ 12 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 116

ช19 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 20 นาที (ก) และ 30 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 117

ช20 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 60 นาที (ก) และ 90 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 118

ช21 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 7 นาที (ก) และ 12 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 119

ช22 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 20 นาที (ก) และ 30 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 120

ช23 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 60 นาที (ก) และ 90 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 121

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

ช24 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 12 นาที (ก) และ 20 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 122

ช25 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 30 นาที (ก) และ 60 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 123

ช26 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 90 นาที ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 124

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลจาก น้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส

A Kinetics Study: Transesterification of *Jatropha curcas* Oil Using Base Catalyst

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทย และทั่วโลกประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจของโลก ที่มีการใช้ปัจจัยด้านพลังงาน ที่สำคัญหนึ่งในนั้นคือ น้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม ที่ใช้กันในปริมาณที่สูงมากทั่วโลก ทำให้ในอนาคตเชื้อเพลิงต้องหมดไปแน่นอน จึงจำเป็นที่จะต้องหาแหล่งพลังงานทดแทน แหล่งอื่นมาใช้แทนเพื่อลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมและลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งไบโอดีเซลเป็นพลังงานทางเลือกใหม่ที่น่าสนใจ ด้วยคุณสมบัติที่คล้ายกับน้ำมันดีเซลและสามารถใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลได้

มีน้ำมันพืชหลายชนิดที่นำมาผลิตไบโอดีเซลได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะพร้าว น้ำมันงา น้ำมันละหุ่ง และพืชอีกชนิดคือ น้ำมันสบู่ดำ เป็นน้ำมันพืชชนิดหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาผลิตไบโอดีเซล เพราะน้ำมันมีคุณภาพใกล้เคียงน้ำมันดีเซล (จักรพันธ์, 2548) และสบู่ดำให้เปอร์เซ็นต์น้ำมันที่สกัดได้ต่อหน่วยน้ำหนักการผลิตสูงกว่าปาล์มน้ำมัน (อวยพร, 2548)

ไบโอดีเซลเป็นสารที่ได้จากสารตั้งต้นจำพวกน้ำมันจากพืช และ น้ำมันจากสัตว์ การผลิตไบโอดีเซลมีอยู่หลายวิธีได้แก่ การใช้โดยตรงและการผสม ไมโครอิมัลชั่น ไพโรไลซิส วิธีเมทานอลเหนือวิกฤติ และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น (Fangrui and Milford., 1999)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ผลิตไบโอดีเซล โดยเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันกับแอลกอฮอล์ ผลผลิตที่เกิดขึ้นคือเอสเทอร์(ester) หรือไบโอดีเซลและกลีเซอรอล โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เช่นเบส หรือ กรด เพื่อช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น (Fangrui and Milford., 1999)

จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมัน มีกลไกในการเกิดปฏิกิริยา 3 ขั้นตอนที่เกิดขึ้นต่อเนื่องและผันกลับได้ ในปี 2004 Doell และคณะ รายงานว่าปฏิกิริยาผันกลับเกิดขึ้นต่ำมาก เมื่อเทียบกับปฏิกิริยาไปข้างหน้า และไม่คิดปฏิกิริยาผันกลับในการทดลอง โดยสารตั้งต้นในปฏิกิริยาคือไตรกลีเซอไรด์และสารมัธยันต์ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยาคือ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาคือ อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล อุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงให้ความสนใจการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสคือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อศึกษาหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอนของปฏิกิริยา ประโยชน์การศึกษาครั้งนี้คือ การนำค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาที่ได้ไปใช้ทำนายเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาจนสมบูรณ์และใช้ในการหาขนาดของถังปฏิกรณ์ที่จะนำไปใช้สู่ระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ต่อไป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.ศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ

2.พัฒนาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ

ขอบเขตของการวิจัย

ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในระบบแบบกะมีการกวนร่วมด้วยความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที (ทัศนีย์, 2007) ปัจจัยที่มีผลต่อการทำการศึกษาคืออุณหภูมิที่ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 1:9 และ 1:12 นำตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบน้ำมันด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี เพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาและหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ

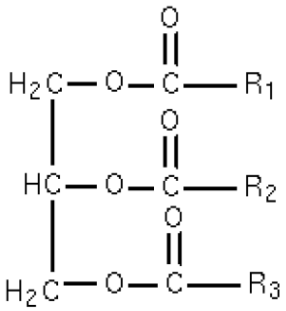
การตรวจเอกสาร

1. น้ำมันและองค์ประกอบของน้ำมัน

ไขมันและน้ำมันเป็นสารที่ไม่ละลายในน้ำ (Fangrui and Milford, 1999) ไขมันและน้ำมันที่พบในสัตว์และพืชประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์(Triglycerides) 90 – 98 เปอร์เซ็นต์ กรดไขมันอิสระ (Free fatty acids) อยู่ 1–5 เปอร์เซ็นต์ มีไดกลีเซอไรด์(Diglycerides) และโมโนกลีเซอไรด์ (Monoglycerides) อยู่เพียงเล็กน้อย (Srivastava and Prasad, 2000)

1.1 ไตรกลีเซอไรด์

ไตรกลีเซอไรด์ส่วนใหญ่จะพบในรูปเอซิลกลีเซอรอล(Acylglycerol) ซึ่งเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน 3 โมเลกุล และ กลีเซอรอล 1 โมเลกุล โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ แสดงได้ดังภาพที่ 1 องค์ประกอบหลักในน้ำมันคือไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งจะประกอบด้วยกรดไขมัน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กรดไขมันอิ่มตัว(Saturated Fatty Acid) และกรดไขมันไม่อิ่มตัว(Unsaturated Fatty Acid) ในน้ำมันพืชกรดไขมันที่พบส่วนใหญ่ จะเป็นกรดไขมันพวกไม่อิ่มตัว ทำให้ที่อุณหภูมิห้องจะมีสถานะเป็นของเหลว ซึ่งต่างจากไขมันจากสัตว์ ที่จะประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวสูงและจะมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง (Fangrui and Milford, 1999)

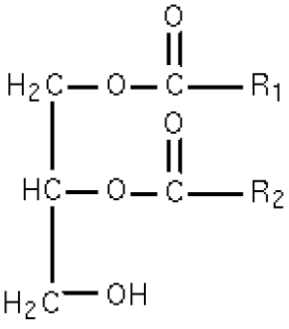


ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์
ที่มา: Laurila and Bohlen (2007)

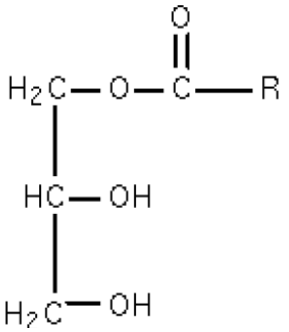
จากภาพที่ 1 หมู่ R_1 R_2 และ R_3 คือ กรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยน้ำมันแต่ละชนิดจะมีปริมาณสัดส่วนของกรดทั้งสองชนิดจะแตกต่างกัน (Agarwal, 2007)

1.2 ไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์

ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ เป็นเอสเทอร์ของกลีเซอรอลกับกรดไขมันเพียงสองและหนึ่งโมเลกุล ตามลำดับ และมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเหลืออยู่ ถ้าเป็นไดกลีเซอไรด์จะมีหมู่ไฮดรอกซิลเหลืออยู่ 1 หมู่ โครงสร้างโมเลกุลของไดกลีเซอไรด์ แสดงได้ดังภาพที่ 2 ส่วนถ้าเป็น โมโนกลีเซอไรด์ จะมีหมู่ไฮดรอกซิลเหลืออยู่ 2 หมู่ โครงสร้างโมเลกุลของโมโนกลีเซอไรด์แสดงได้ดังภาพที่ 3 (Khan, 2002) กลีเซอไรด์ทั้งสองชนิดนี้ ไม่ค่อยพบมากในธรรมชาติ แต่จะพบในไขมันที่เกิดการไฮโดรไลซิสไม่สมบูรณ์



ภาพที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของไดกลีเซอไรด์
ที่มา: Laurila and Bohlen (2007)



ภาพที่ 3 โครงสร้างโมเลกุลของโมโนกลีเซอไรด์
ที่มา: Laurila and Bohlen (2007)

1.3 กรดไขมัน

กรดไขมันเป็นกรดอินทรีย์ชนิดหนึ่ง โดยทั่วไปกรดไขมันจะมีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลเป็นเลขคู่เสมอ ซึ่งมีความยาวตั้งแต่ 12-24 โมเลกุล แต่ที่พบเป็นจำนวนมาก จะมีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอม (C:16) และ 18 อะตอม (C:18) กรดไขมันปลายข้างหนึ่งเป็นหมู่คาร์บอกซิล (–COOH) และปลายอีกข้างหนึ่งเป็นสายโซ่ยาวของนอนโพลาร์ไฮโดรคาร์บอน ทำให้กรดไขมันไม่ละลายน้ำ (Agarwal, 2007) ข้อมูลทั่วไปและแหล่งที่พบของกรดไขมัน แสดงได้ดังตารางที่ 1 และชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ข้อมูลทั่วไปและแหล่งที่พบของกรดไขมัน

ชื่อทั่วไป (Common Name)	ชื่อทางวิทยาศาสตร์ (Scientific Name)	จำนวนคาร์บอน (Carbon Atoms)	จำนวนพันธะคู่ (Double Bonds)	แหล่งที่พบ (Sources)
Butyric acid	butanoic acid	4	0	butterfat
Caproic Acid	hexanoic acid	6	0	butterfat
Caprylic Acid	octanoic acid	8	0	coconut oil
Capric Acid	decanoic acid	10	0	coconut oil
Lauric Acid	dodecanoic acid	12	0	coconut oil
Myristic Acid	tetradecanoic acid	14	0	palm kernel oil
Palmitic Acid	hexadecanoic acid	16	0	palm oil
Palmitoleic Acid	9-hexadecenoic acid	16	1	animal fats
Stearic Acid	octadecanoic acid	18	0	animal fats
Oleic Acid	9-octadecenoic acid	18	1	olive oil
Ricinoleic acid	12-hydroxy-9-octadecenoic acid	18	1	castor oil
Vaccenic Acid	11-octadecenoic acid	18	1	butterfat
Linoleic Acid	9,12-octadecadienoic acid	18	2	grape seed oil

ตารางที่ 1 ข้อมูลทั่วไปและแหล่งที่พบของกรดไขมัน **(ต่อ)**

ชื่อทั่วไป (Common Name)	ชื่อทางวิทยาศาสตร์ (Scientific Name)	จำนวนคาร์บอน (Carbon Atoms)	จำนวนพันธะคู่ (Double Bonds)	แหล่งที่พบ (Sources)
Alpha-Linolenic Acid (ALA)	9,12,15-octadecatrienoic acid	18	3	flaxseed (linseed) oil
Gamma-Linolenic Acid (GLA)	6,9,12-octadecatrienoic acid	18	3	borage oil
Arachidic Acid	eicosanoic acid	20	0	peanut oil, fish oil
Gadoleic Acid	9-eicosenoic acid	20	1	fish oil
EPA	5,8,11,14,17-eicosapentaenoic acid	20	5	fish oil
Behenic acid	docosanoic acid	22	0	rapeseed oil
Erucic acid	13-docosenoic acid	22	1	rapeseed oil
DHA	4,7,10,13,16,19-docosahexaenoic acid	22	6	fish oil
Arachidonic Acid (AA)	5,8,11,14-eicosatetraenoic acid	20	4	liver fats
Lignoceric acid	tetracosanoic acid	24	0	small amounts in most fats

ที่มา: บริษัท พาราไซแอนติฟิค จำกัด (2551**)**

ตารางที่ 2 ปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ

Oil or Fat	Unsat. /Sat. ratio	Saturated					Unsaturated		
		Capric Acid C10:0	Lauric Acid C12:0	Myristic Acid C14:0	Palmitic Acid C16:0	Stearic Acid C18:0	Oleic Acid C18:1	Linoleic Acid C18:2	Alpha Linolenic Acid C18:3
Almond Oil	9.7	-	-	-	7	2	69	17	-
Canola Oil	15.7	-	-	-	4	2	62	22	10
Cocoa Butter	0.6	-	-	-	25	38	32	3	-
Coconut Oil	0.1	6	47	18	9	3	6	2	-
Corn Oil	6.7	-	-	-	11	2	28	58	1
Cottonseed Oil	2.8	-	-	1	22	3	19	54	1
Flaxseed Oil	9.0	-	-	-	3	7	21	16	53
Grape seed Oil	7.3	-	-	-	8	4	15	73	-
Olive Oil	4.6	-	-	-	13	3	71	10	1
Palm Oil	1.0	-	-	1	45	4	40	10	-
Palm Olein	1.3	-	-	1	37	4	46	11	-
Palm Kernel Oil	0.2	4	48	16	8	3	15	2	-
Peanut Oil	4.0	-	-	-	11	2	48	32	-
Safflower Oil	10.1	-	-	-	7	2	13	78	-
Sesame Oil	6.6	-	-	-	9	4	41	45	-
Soybean Oil	5.7	-	-	-	11	4	24	54	7
Sunflower Oil	7.3	-	-	-	7	5	19	68	1
Walnut Oil	5.3	-	-	-	11	5	28	51	5

ที่มา: บริษัท พาราไซแอนติฟิค จำกัด (2551)

2. สบู่ดำ

2.1 ข้อมูลทั่วไปของสบู่ดำ

สบู่ดำ เป็นพืชน้ำมันชนิดหนึ่ง มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Jatropha Curcas* Linn. อยู่ในวงศ์ไม้ยางพารา ซึ่งเป็นพืชพื้นเมืองของทวีปอเมริกาใต้ ชาวโปรตุเกสนำเข้ามาปลูกในประเทศไทยในช่วงปลายสมัยกรุงศรีอยุธยา เพื่อนำมาบีบน้ำมันสำหรับทำสบู่ ปัจจุบันสบู่ดำมีปลูกอยู่ทั่วทุกภาคของประเทศไทย มีชื่อเรียกแตกต่างกันไป เช่น ภาคเหนือเรียกว่ามะหุ่งฮั้ว ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเรียกว่ามะเยาหรือสีหลอด ภาคใต้เรียกว่ามาเคาะ ซึ่งน้ำมันที่ได้จากเมล็ดสบู่ดำสามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล โดยไม่ต้องใช้น้ำมันชนิดอื่นผสมอีก (นิรนาม, 2548) นอกจากนี้ยังใช้เป็นสมุนไพรรักษาโรค หรือ ใช้ปลูกเป็นแนวรั้ว เพื่อป้องกันสัตว์เลี้ยงเข้าทำลายผลผลิต เนื่องจากมีสารพิษ Hydrocyanic ที่สัตว์ไม่ชอบ สบู่ดำจึงเป็นพืชที่น่าให้ความสนใจเป็นอย่างยิ่งในสภาวะที่ราคาน้ำมันดีเซลมีราคาสูงอย่างในปัจจุบัน

2.2 ลักษณะทางกายภาพของสบู่ดำ

เป็นพืชยืนต้นมีอายุข้ามปี ทนสภาพอากาศที่แล้งและขึ้นได้ในสภาพดินเลว โดยทุกส่วนของต้นมีน้ำยางสีขาวใสที่มีคุณสมบัติคล้ายสบู่ น้ำมันสบู่ดำมีลักษณะคล้ายน้ำมันดีเซลแต่มีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซลมาก และผลแก่มีสีน้ำตาลหรือสีน้ำตาลดำ ภายในมี 3 เมล็ดเปลือกเมล็ดสีดำเนื้อในสีขาวมีน้ำมัน 46 – 58 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักเมล็ด

2.3 องค์ประกอบน้ำมันสบู่ดำ

น้ำมันสบู่ดำประกอบไปด้วยกรดไขมันอิ่มตัวประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ และกรดไขมันไม่อิ่มตัวประมาณ 78 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันสบู่ดำมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวในปริมาณมาก แสดงได้ดังตารางที่ 3 จึงทำให้น้ำมันสบู่ดำไม่เป็นไขเมื่ออากาศเย็น จึงสามารถนำไปใช้ได้ในสภาพอากาศที่เย็น (อวยพร, 2548) คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันดีเซล แสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันสบู่ดำ

ชนิดกรดไขมัน	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)[1]	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)[2]
กรดปาล์มมิติก (C16:0)	14.2	12.8
กรดปาล์มมิโตเลอิก(C16:1)	1.4	-
กรดสเตียริก (C18:0)	6.9	7.3
กรดโอเลอิก (C18:1)	43.1	44.8
กรดไลโนเลอิก (C18:2)	34.4	34.0
รวมกรดไขมันอิ่มตัว	21.1	20.1
รวมกรดไขมันไม่อิ่มตัว	78.9	78.8

ที่มา: [1] Sarin *et al.*(2006) and [2] Kandpal and Madan (1995)

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันดีเซล

คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ	น้ำมันสบู่ดำ	น้ำมันดีเซล
ค่าความหนืด (เซ็นติสโตรก) ที่ 30 องศาเซลเซียส	52.6	3.6
ค่าความถ่วงจำเพาะที่ (15 องศาเซลเซียส/4 องศาเซลเซียส)	0.917/0.923	0.841/0.85
ค่าซีเทน	51	47.8 - 59
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	110/340	80
ร้อยละของคาร์บอน	0.64	< 0.05 - < 0.15
จุดกลั่น(องศาเซลเซียส)	284 - 295	< 350 - < 370
ร้อยละของซัลเฟอร์	013 - 0.16	< 1 – 1.2
ค่าความเป็นกรด	1- 38.2	-
ค่าสปอนนิฟิเคชั่น	188 - 198	-
ค่าไอโอดีน	90.8 - 112.5	-

ที่มา: www.svlele.om/jatropha_plant.htm (2007)

3. ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่ ที่ผลิตจากกน้ำมันจากสิ่งมีชีวิตได้แก่ น้ำมันพืชและไขสัตว์ ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ไม่มีพิษกับสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้โดยกลไกของชีวภาพ (Krawczyk, 1996) ไบโอดีเซลเป็นสารในกลุ่มเอสเทอร์ ซึ่งจะอยู่ในรูปเอลคิลเอสเทอร์(Alkyl fatty acid esters) โดยมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม (Korbitz, 2001) คุณสมบัติการเผาไหม้เหมือนกับน้ำมันดีเซลมาก ซึ่งสามารถใช้แทนกันได้ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบโอดีเซลของน้ำมันชนิดต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 5

กระบวนผลิตไบโอดีเซลที่นิยมในปัจจุบัน คือ การนำน้ำมันพืช หรือ ไขมันสัตว์ รวมทั้งน้ำมันใช้แล้วจากการปรุงอาหาร มาเข้ากระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (Transesterification process) โดยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือ เอทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิสูง เพื่อเปลี่ยนให้เป็น เมทิลเอสเทอร์ เอทิลเอสเทอร์ หรือ แอลคิลเอสเทอร์อื่น ๆ และได้กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้

3.1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

3.1.1 การใช้โดยตรงและการผสม (Direct use and blending)

การใช้โดยตรงเป็นการนำน้ำมันพืชที่ไม่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาเช่นน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันดอกทานตะวัน เป็นต้น มาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมสารอื่นใด ข้อดีของการนำน้ำมันพืชใช้โดยตรงคือ ให้ค่าความร้อนเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ของดีเซล เป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่พร้อมใช้และเป็นพลังงานทางเลือกใหม่ ข้อเสียคือ ความหนืดสูง ความสามารถในการกลายเป็นไอต่ำ (Pryde, 1983) ส่วนการใช้แบบผสมเป็นการนำน้ำมันพืชหรือน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้วมาผสมกับดีเซลในอัตราส่วนที่ต่างกัน เช่น การผสมน้ำมันใช้แล้ว 95 เปอร์เซ็นต์ กับ ดีเซล 5 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำมาใช้กับเครื่องยนต์ หรือ น้ำมันถั่วเหลืองต่อดีเซลเป็น 1:1 และ 1:2

ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบโอดีเซลจากน้ำมันชนิดต่างๆ

Vegetable oil methyl ester	Flash point (^{0}C)	Cloud point (^{0}C)	Density (kg/l)	Sulphur (%wt)	Kinematic viscoscity (mm^2/s)	Cetane number	Lower Heating value (MJ/l)
Palm[1]	164	13	0.88	-	5.7 (37.8 ^{0}C)	62	33.5
Palm[2]	135	16	-	0.003	4.5 *	54.6	-
Jatropha[2]	163	4	-	0.004	4.4 *	57.1	-
Sunflower[1]	183	1	0.86	-	4.6 (37.8 ^{0}C)	49	33.5
Sunflower[2]	180	4	-	0.003	4.1 *	55.6	-
Soybean[1]	178	1	0.885	-	4.5 (37.8 ^{0}C)	45	33.5
Soybean[2]	160	4	-	0.002	4 *	58.1	-
Peanut[1]	176	5	0.883	-	4.9 (37.8 ^{0}C)	54	33.6
Pongamia[2]	141	4	-	0.003	4.16 *	55.1	-
Tallow[1]	96	12	-	-	-	-	-
Babassu[1]	127	4	0.8879	-	3.6 (37.8 ^{0}C)	63	31.8
Diesel fuel[3]	-	-	0.83-0.84 (15 ^{0}C)	-	12-3.5(40 ^{0}C)	51	35.5

หมายเหตุ: * (cSt at 40^{0}C)

ที่มา: [1] Srivastava and Prasad (2000)

[2] Sarin *et al*. (2006)

[3] Varese and Varese (1996)

3.1.2 ไมโครอิมัลชั่น (Microemulsions)

ปัญหาของการใช้น้ำมันพืชโดยตรงคือความหนืดที่สูง ไมโครอีมัลชั่นเป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยลดความหนืดของน้ำมันลง คือการกระจายตัวของอนุภาคคอลลอยด์ของน้ำมันในสภาวะสมดุลร่วมกับตัวทำละลายเช่น เมทานอล เอทานอล และ 1- บิวทานอล ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1-150 นาโนเมตร (Schwab et al, 1987)

3.1.3 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Thermal cracking or pyrolysis)

เป็นขบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยใช้ความร้อนสูงถึง 450-850 องศาเซลเซียส โดยไม่มีอากาศหรือออกซิเจนระหว่างการเผาไหม้ (Sontage, 1979) โดยในระบบตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นส่วนสำคัญช่วยในการแตกของพันธะในโครงสร้างสารเคมีให้กลายเป็นสารโมเลกุลเล็กๆ (Weisz et al., 1979) กระบวนการนี้มีความซับซ้อนและหลากหลายของปฏิกิริยาเกิดขึ้นทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลายชนิด วัตถุดิบที่นำมาใช้ได้คือ น้ำมันพืช ไขสัตว์ กรดไขมัน ซากสิ่งมีชีวิต เป็นต้น ตัวอย่างเช่นวัตถุดิบเป็นไตรกลีเซอไรด์ จะได้ผลิตภัณฑ์คือ สารอินทรีย์กลุ่ม Alkanes, alkenes, alkadienes, aromatics และ carboxylic acid (Srivastara and Prasad, 2000) ผลิตภัณฑ์หลักจากกระบวนการไพโรไลซิสของ Safflower oil และ soybean oil ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ เป็น alkanes และ alkenes องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสของน้ำมัน แสดงได้ดังตารางที่ 6 (Fangrui and Milford, 1999)

3.1.4 การทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสภาวะเหนือจุดวิกฤต (Supercritical Methanol)

เป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งน้ำมันทำปฏิกิริยากับเมทานอลที่สภาวะเหนือวิกฤต วิธีนี้จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย ใช้อุณหภูมิและความดันสูง ในปี 2000 Kusdiana and Saka ได้ทำการผลิตไบโอดีเซล จาก Rapseed oil ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 30 เมกะปาสคาล อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:42 ใช้เวลา 4 นาที ให้ค่าแปลงผัน (Conversion) มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ขึ้นไปจะทำให้ค่าแปลงผันลดลง เพราะน้ำมันเกิดการเสียสภาพโดยความร้อน เมื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์และสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่เกิดจากวิธีเมทานอลเหนือวิกฤตกับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทั่วไป แสดงได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 6 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสของน้ำมัน

ผลิตภัณฑ์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	
	High Oleic Safflower oil	Soybean oil
Alkanes	40.9	29.9
alkenes	22	24.9
alkadienes	13	10.9
aromatics	2.2	1.9
Unresolved unsaturates	10.1	5.1
carboxylic acid	16.1	9.6
Unidentified	12.7	12.6

ที่มา: Fangrui and Milford (1999)

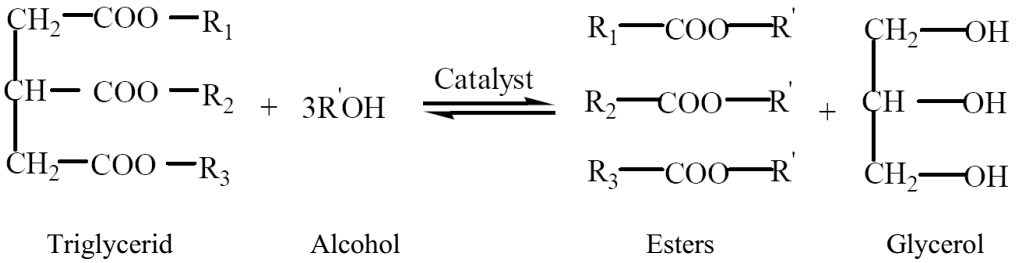
ตารางที่ 7 ผลิตภัณฑ์และสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่เกิดจาก วิธีเมทานอลเหนือวิกฤต กับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทั่วไป

	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	วิธีเมทานอลเหนือวิกฤต
เวลาในการทำปฏิกิริยา	1-6 ชั่วโมง	0.067 ชั่วโมง
สภาวะในการทำปฏิกิริยา	0.1 เมกะปาสคาล 30-60 องศาเซลเซียส	35 เมกะปาสคาล 350 องศาเซลเซียส
ตัวเร่งปฏิกิริยา	กรดหรือเบส	ไม่มี
การมีกรดไขมันอิสระในน้ำมัน	เกิดสบู่	เกิดเมทิลเอสเทอร์
เปอร์เซ็นต์ผลผลิต	97 เปอร์เซ็นต์ (โดยทั่วไป)	98.5 เปอร์เซ็นต์
สิ่งที่ต้องกำจัดออก	เมทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยาและสบู่	เมทานอล
ขบวนการ	มีหลายขั้นตอน	ข้อควรระวังน้อย

ที่มา: ดัดแปลงจาก Kusdiana and Saka (2000)

3.1.5 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น (Transesterification or Alcoholysis)

ทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นเป็นการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไขมันหรือน้ำมันกับแอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และกลีเซอรอล (Srivastava and Prasad, 2000) แสดงได้ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นระหว่างน้ำมันกับแอลกอฮอล์
ที่มา: Khan (2002)

กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น แอลกอฮอล์ที่สามารถนำมาใช้ได้เช่น เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอลและ เอมิลแอลกอฮอล์ (Amyl alcohol) เนื่องจากคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่ดีคือ ความเป็นขั้ว (Polar) และสายโซ่ของแอลกอฮอล์ที่สั้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีและเข้าทำปฏิกิริยาได้เร็ว

การนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นจะช่วยทำให้การเกิดปฏิกิริยาเคมีและผลิตภัณฑ์เกิดได้ดีขึ้น (Fangrui and Milford, 1999) โดยชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันดังนี้

ก. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (Alkali catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยน้ำมันที่ใช้จะเป็นชนิดใดก็ได้เช่นน้ำมันดิบ (Crude oil) หรือ น้ำมันที่ใช้แล้ว เป็นต้น ก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ควรเปลี่ยนจากรูปเบส (NaOH, KOH) ไปเป็นในรูปของสารประกอบ อัลคอกซี่ (Alkoxy) ก่อน โดยการทำปฏิกิริยากับเมทานอลหรือเอทานอล การเตรียมสารประกอบอัลคอกซี่ปฏิกิริยาเคมี แสดงได้ดังภาพที่ 5

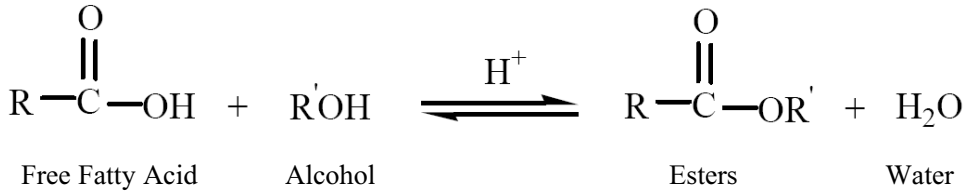
$$R-CH_2OH + NaOH \rightarrow H_2O + R-CH_2ONa$$

ภาพที่ 5 ปฏิกิริยาเคมีในการเตรียมสารอัลคอกซี่
ที่มา: Marchetti *et al*. (2005)

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วกว่า เมื่อเทียบกับการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังให้ผลิตภัณฑ์คือเมทิลเอสเทอร์ ในปริมาณที่สูงด้วย (Fangrui and Milford, 1999) ส่วนข้อควรระวังสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสคือ ถ้าพบว่ามีน้ำและกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) ในน้ำมัน ในระหว่างการทำปฏิกิริยาจะทำให้มีสบู่เกิดขึ้นแทนที่จะได้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นผลิตภัณฑ์ และการแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลจะทำให้ยากขึ้น วิธีที่เหมาะสมสำหรับน้ำมันที่มีน้ำและกรดไขมันอิสระคือ เลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดแทนชนิดเบส (Keim, 1945)

ข. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด (Acid catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด (Acid catalyst) จะเร่งการเกิดทั้งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นและปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชั่น (Esterification) กรดที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดฟอสฟอริก กรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น (Khan, 2002) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะทำให้ได้ผลผลิตคือน้ำมันไบโอดีเซลในปริมาณมาก แต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ามากอาจจะใช้เวลามากกว่า 1 วัน ปฏิกิริยาจึงจะเกิดอย่างสมบูรณ์ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดสามารถใช้ได้ดีกับน้ำมันที่มีส่วนประกอบของกรดไขมันอิสระและน้ำในปริมาณสูงได้ เช่น ในน้ำมันที่ใช้แล้ว เป็นต้น (Fukuda *et al*., 2001) ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชั่นของกรดไขมันอิสระที่มีปริมาณสูงในน้ำมันเริ่มต้นกับแอลกอฮอล์ โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงได้ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชั่นระหว่างกรดไขมันอิสระกับแอลกอฮอล์
ที่มา: Khan (2002)

ค. ตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ (Enzyme catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพที่นิยมใช้คือ เอนไซม์ไลเปส (Lipase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ไฮโดรไลติก ใช้สะดวกไม่อันตราย ค่อนข้างคงตัว เสียสภาพยาก นำกลับมาใช้ใหม่ได้และไม่ต้องการโค-เอนไซม์ (Co-enzyme) อื่นร่วมในการทำปฏิกิริยา (Khan, 2002) ซึ่งเอนไซม์ไลเปสจะเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรไลซิสของกลีเซอรอล แอลกอฮอไลซิส (Alcoholysis)และแอซิโดไลซิส (Acidolysis)ใช้เอนไซม์ไลเปสเร่งปฏิกิริยาจะไม่มีของเสียออกมาจากกระบวนการ ไม่ต้องล้างไบโอดีเซล เพื่อเอาตัวเร่งปฏิกิริยาออก ข้อเสียคือให้ผลผลิตน้อยเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส

ง. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous or Solid catalyst)

เป็นการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นโดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน(Heterogeneous) กับสารตั้งต้นทั้งสองตัว ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ที่นิยมใช้ได้แก่ ($Zn_5(OH)_8(NO_3)_2.2H_2O$), ZrO_2 , ZnO, KNO_3/ZrO_2 , KNO_3/KL, Zeolite และMgO เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ไม่ทำให้เกิดสบู่ และง่ายต่อการแยกเอาตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากไบโอดีเซลและใช้ได้กับน้ำมันที่มีน้ำปนเปื้อนในการทำปฏิกิริยาได้ (Cordeiro *et al*., 2008; Jitputti *et al*., 2005)

3.1.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น

ก. ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

อุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น (Fangrui and Milford, 1999) กล่าวว่ายิ่งอุณหภูมิสูงมากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาก็จะเร็วตามไปด้วย ซึ่งจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคือ อุณหภูมิสูงระยะเวลาที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดเสร็จสมบูรณ์ก็จะสั้น เมื่อเทียบกับอุณหภูมิต่ำระยะเวลาที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดเสร็จสมบูรณ์ก็จะนาน (Narvaez *et al*., 2007) ศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันปาล์ม ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:6 ที่ 60 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่งโมง ปฏิกิริยาก็เสร็จสมบูรณ์ ในขณะที่ 50 องศาเซลเซียส ต้องใช้เวลามากกว่า 2 ชั่งโมง ปฏิกิริยาจึงเสร็จสมบูรณ์ แต่ข้อจำกัดของอุณหภูมิคือ จะต้องไม่เกินจุดเดือดของชนิดแอลกอฮอล์ที่ใช้เช่น ใช้เมทานอล ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิควรไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส

ข. ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นมีอยู่หลายแบบคือ แบบเบส กรด และไลเปส น้ำมันเริ่มต้นที่มี น้ำและกรดไขมันอิสระปนอยู่น้อยมาก เหมาะกับใช้เบสเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีการศึกษาหลายงานวิจัยของ (Vicente *et al*., 2006); (Encinar *et al*., 2007) พบว่าปริมาณในช่วงที่เหมาะสมเท่ากับ 0.5-1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ยิ่งปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามาก การเกิดปฏิกิริยาก็เร็วเช่นเดียวกันและให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 90-97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่อย่างไรก็ตามหากเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไปมากกว่านี้ก็ไม่ทำให้ได้ผลผลิตไปมากกว่านี้มากนัก มีแต่จะสิ้นเปลืองและยากต่อการกำจัดความเป็นเบสของไบโอดีเซล น้ำมันที่มีส่วนประกอบของกรดไขมันอิสระและน้ำในปริมาณสูงเช่น น้ำมันที่ใช้แล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดเหมาะสม และใช้ได้ดี (Fangrui and Milford, 1999)

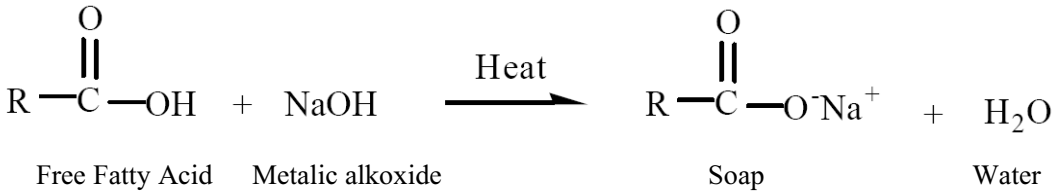
ค. ผลของอัตราการกวนผสม (Mixing rate)

น้ำมันและแอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้นที่ไม่ละลายกัน และเกิดการแยกชั้นกัน ในการทำปฏิกิริยาการกวนผสมจึงมีส่วนสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อทำให้สารตั้งต้นสองตัวกระจายและสัมผัสกันในระดับโมเลกุลได้ดีขึ้น (Noureddini and Zhu, 1997) ศึกษากระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันถั่วเหลือง ศึกษาถึงปัจจัยของอัตราการกวนผสมที่อัตราการกวนผสมสูง พบว่าที่อัตราการกวนผสม 300 และ 600 รอบ/นาที ให้ค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดใกล้เคียงกัน ส่วนที่ 150 รอบ/นาที ให้ค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์ต่ำกว่า ที่ 300 และ 600 รอบ/นาที ณ เวลาเดียวกัน

ง. ความชื้นและกรดไขมันอิสระ

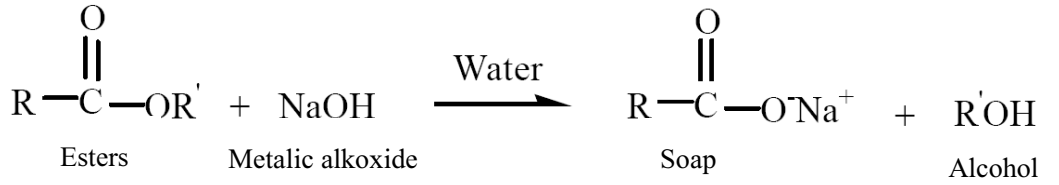
ความชื้นและกรดไขมันอิสระจะมีผลเสีย เมื่อใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมเมทอกไซด์ เป็นต้น เนื่องจากถ้าน้ำมันเริ่มต้นหรืออุปกรณ์มีน้ำปนเปื้อนมา จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดสบู่ขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยาได้ โดยจะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา ทำให้สภาพความหนืดของน้ำมันเพิ่มขึ้น และไปรบกวนการแยกชั้นของกลีเซอรอลกับไบโอดีเซล ไบโอดีเซลที่ได้จะมีคุณภาพต่ำและมีความหนืดสูง (Kyu *et al*., 2007)

ในส่วนของกรดไขมันอิสระถ้ามีปริมาณมากในน้ำมันเริ่มต้นเช่นน้ำมันใช้แล้ว หรือ น้ำมันเก่า เมื่อมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและความร้อนในการทำปฏิกิริยา จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสบู่ (Saponnification) แสดงได้ดังภาพที่ 7 น้ำมันเริ่มต้นที่เหมาะสม เมื่อมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาควรมีค่าความเป็นกรด (Acid value) น้อยกว่า 4 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมน้ำมัน (Kyu *et al*., 2007) ความชื้น และกรดไขมันอิสระจะไม่มีผลเสียต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด ไลเปส และแบบวิวิธพันธ์ เป็นต้น



ภาพที่ 7 ปฏิกิริยาการเกิดสบู่ (Saponnification)
ที่มา: Khan (2002)

สบู่ยังเกิดขึ้นอย่างเลี่ยงไม่ได้ในขั้นตอนของการล้างเบสออกจากไบโอดีเซลด้วยน้ำ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเกิดสบู่จากเมทิลเอสเทอร์ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ปฏิกิริยาการเกิดสบู่จากเมทิลเอสเทอร์
ที่มา: Khan (2002)

จ. ผลของอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อแอลกอฮอล์

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ (Vicente *et al*., 2006) แสดงได้ดังภาพที่ 4 ดังนั้นถ้าปริมาณแอลกอฮอล์มีมากพอ ก็จะช่วยขับเคลื่อนให้ปฏิกิริยาไปทางด้านขวามากขึ้น ทำให้ได้ปริมาณไบโอดีเซลมากด้วย และยังยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ด้วย จากภาพที่ 4 หากใช้อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:3 เมื่อปฏิกิริยาเกิดไประยะหนึ่ง

จะทำให้ไบโอดีเซลและกลีเซอรอลเกิดเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณแอลกอฮอล์ลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ส่วนที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:6 เป็นค่าที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลที่ทำให้ได้ไบโอดีเซล 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Fukuda *et al*., 2001)

4. จลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น (Kinetics of transesterification)

4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น (Mechanism of transesterification)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันกับแอลกอฮอล์ (เมทานอล) โดยทั่วไปแล้วกลไกทางจลนพลศาสตร์เป็นปฏิกิริยา 3 ขั้นตอนที่ต่อเนื่องและผันกลับได้ (Three consecutive reversible reaction) (Noureddini and Zhu., 1997 ; Vicente *et al*., 2006) ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 9 ไตรกลีเซอไรด์ (TG) ทำปฏิกิริยากับเมทานอลเปลี่ยนไปเป็นไดกลีเซอไรด์ (DG) จากนั้นไดกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเมทานอลเปลี่ยนไปเป็นโมโนกลีเซอไรด์ (MG) และโมโนกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเมทานอลเปลี่ยนไปเป็นกลีเซอรอล (GL) ทุกขั้นตอนเกิดเมทิลเอสเทอร์ 1 โมล โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนมากจะเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง (Second-order) เขียนสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equation) เพื่อประกอบการอธิบายจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น แสดงได้ดังภาพที่ 10

$$TG + CH_3OH \underset{k_2}{\overset{k_1}{\rightleftharpoons}} R_1COOCH_3 + DG$$

$$DG + CH_3OH \underset{k_4}{\overset{k_3}{\rightleftharpoons}} R_2COOCH_3 + MG$$

$$MG + CH_3OH \underset{k_6}{\overset{k_5}{\rightleftharpoons}} R_3COOCH_3 + GL$$

ภาพที่ 9 กลไกปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น
ที่มา: He *et al*. (2007)

$$\frac{d[\mathrm{TG}]}{dt} = -k_1[\mathrm{TG}][\mathrm{A}] + k_2[\mathrm{DG}][\mathrm{E}]$$

$$\frac{d[\mathrm{DG}]}{dt} = k_1[\mathrm{TG}][\mathrm{A}] - k_2[\mathrm{DG}][\mathrm{E}] - k_3[\mathrm{DG}][\mathrm{A}] + k_4[\mathrm{MG}][\mathrm{E}]$$

$$\frac{d[\mathrm{MG}]}{dt} = k_3[\mathrm{DG}][\mathrm{A}] - k_4[\mathrm{MG}][\mathrm{E}] - k_5[\mathrm{MG}][\mathrm{A}] + k_6[\mathrm{GL}][\mathrm{E}]$$

$$\frac{d[\mathrm{GL}]}{dt} = k_5[\mathrm{MG}][\mathrm{A}] - k_6[\mathrm{GL}][\mathrm{E}]$$

$$\frac{d[\mathrm{E}]}{dt} = k_1[\mathrm{TG}][\mathrm{A}] - k_2[\mathrm{DG}][\mathrm{E}] + k_3[\mathrm{DG}][\mathrm{A}] - k_4[\mathrm{MG}][\mathrm{E}] + k_5[\mathrm{MG}][\mathrm{A}] - k_6[\mathrm{GL}][\mathrm{E}]$$

$$\frac{d[\mathrm{A}]}{dt} = \frac{-d[E]}{dt}$$

A คือ แอลกอฮอล์

E คือ เมทิลเอสเทอร์

t คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา

ภาพที่ 10 สมการเชิงอนุพันธ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น

ที่มา: Leevijit *et al*. (2004)

จากภาพที่ 9 และ 10 ค่า k_1 k_3 และ k_5 คือค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับสองไปข้างหน้า(Forward second-order reaction) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ตามลำดับ และ k_2 k_4 และ k_6 คือค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับ (Reverse second-order reaction) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์ ตามลำดับ

ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ที่สำคัญคือค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (k) และค่าพลังงานกระตุ้น (Ea) ปัจจัยที่มีผลต่อค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นมีดังนี้

ก. ผลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลกระทบโดยตรงกับ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา และการเกิดปฏิกิริยา โดยจากสมการอาร์เรย์เนียส (Arrhenius equations) แสดงได้ดังสมการที่ 1 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน (Darnoko and Cheryan, 2000) และที่อุณหภูมิสูงจะช่วยส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นด้วย จากการศึกษาหลายๆงานวิจัย พบว่าที่อุณหภูมิสูงปริมาณไตรกลีเซอไรด์ลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ก็เพิ่มปริมาณสูงเช่นเดียวกัน เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้ไตรกลีเซอไรด์และเมทานอลละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี เพราะความหนืดของน้ำมันลดลงเมื่อมีความร้อน ส่วนไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นสารมัธยันต์ (Intermediate) ก็เป็นสารตั้งต้นเหมือนกับไตรกลีเซอไรด์ ที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการชนกันของโมเลกุลน้ำมันกับเมทานอลสูง และระดับพลังงานของสารตั้งต้น สูงเหมาะกับการเกิดปฏิกิริยา (Noureddini and Zhu, 1997; Darnoko and Cheryan, 2000)

$$k = k_0 e^{-E_a/RT} \qquad (1)$$

ข. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ (ตัวเร่งแบบเบส เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) มีผลต่อค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาและการเกิดปฏิกิริยา ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ในปี 2006 Vicente *et al* ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยามากขึ้น และในปี 2007 Narvaez *et al* ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันปาล์ม ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพิ่มขึ้นที่ 0.2 0.6 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น และการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ 50 องศาเซลเซียส ใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.2 0.6 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 34 68 และ 72 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นอกจากนี้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ยังมีผลในการลดค่าพลังงานกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาได้ด้วย

ค. อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล

เมื่อปริมาณเมทานอลเพิ่มขึ้นจะช่วยส่งเสริมให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้าได้ดีขึ้น ซึ่งไปช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ในปี 2004 Cheng *et al* ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันปาล์ม ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส 2 ชนิดคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมเมทอกไซด์ ที่สภาวะโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.125 โมล NaOH/กิโลกรัมน้ำมัน ที่ 60 องศาเซลเซียส พบว่าค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์ ที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:6 1:8 และ 1:10 เท่ากับ 0.0941 0.1466 และ 0.163 ลิตร.โมล/นาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เพิ่มขึ้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fangrui and Milford., (1999) ไบโอดีเซลเป็นสายโซ่คาร์บอนยาว ของเมทิลเอสเทอร์ซึ่งได้จากแหล่งน้ำมันทางเลือกใหม่ที่มาจากพืช ไขสัตว์และน้ำมันที่ใช้แล้ว โดยเกิดจากขบวนการเหล่านี้ เช่นไมโครอิมัลชั่น ไพโรไลซิสและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น โดยขบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นเป็นวิธีที่ง่ายและนิยมมากที่สุด ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นคืออัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา ค่าความเป็นกรดอิสระของน้ำมัน และปริมาณน้ำปนเปื้อนในน้ำมัน

Freedman *et al*., (1986) ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นระหว่างน้ำมันจากพืชและสัตว์ทำปฏิกิริยากับเมทานอล เกิดเป็น 3 โมลของเมทิลเอสเทอร์และ 1 โมลของกลีเซอรอล โดยเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น 3 ขั้นตอนและต่อเนื่องกัน มีสารมัธยันต์เกิดขึ้นในระหว่างปฏิกิริยาคือ ไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์

Chitra *et al*., (2005) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลคือ ปริมาณเมทานอลที่ใช้ 10 15 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาของการทำปฏิกิริยา 30 60 90 และ 120 นาที และอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยา 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส หาสภาวะที่ดีที่สุดในการผลิตไบโอดีเซล นอกจากนั้นยังนำไบโอดีเซลที่ได้ไปตรวจสอบคุณสมบัติทั้งทางเคมี (ปริมาณกรดไขมันอิสระและค่าความเป็นกรด) และทางด้านเชื้อเพลิง จากการทดลองพบว่า

สภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ไบโอดีเซล 98 เปอร์เซ็นต์ คือ 20 เปอร์เซ็นต์ของเมทานอล โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ของโดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 90 นาที และจากการทดสอบคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงพบว่า Kinematic viscosity (ที่ 40 องศาเซลเซียส) มีค่า 4.78 เซนติสโตรก และค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) มีค่า 0.8636 ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมี พบว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ 0.249 เปอร์เซ็นต์ และค่าความเป็นกรด (Acid value) 0.496 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน ซึ่งค่าดังกล่าวข้างต้นอยู่ในขอบเขตของมาตรฐาน BIS (Burean of Indian Standards)

Meher *et al*., (2005) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจาก Karanja oil โดยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น และใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล อุณหภูมิ และอัตราเร็วของการกวนผสม ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล การวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ใช้วิธี High performance liquid chromatography (HPLC) จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจาก Karanja oil คือ ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น1:6 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และอัตราเร็วของการกวนผสม 360 รอบต่อนาที

Leevijit *et al*., (2004) ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ขบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันปาล์ม โดยใช้น้ำมันปาล์มที่กลั่นแยกบริสุทธิ์แล้ว ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีการกวนร่วมในระหว่างการทำปฏิกิริยา สภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล คือ 1:6 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยกำหนดให้ปฏิกิริยาเป็น 3 ขั้นตอนที่ต่อเนื่องผันกลับได้อันดับสอง แสดงได้ดังภาพที่ 9 เขียนสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อธิบายการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยา แสดงได้ได้ดังภาพที่ 10 จากผลการศึกษาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา k_1 และ k_2 เท่ากับ 1.057×10^{-2} และ 0.00 ลิตร/โมล.นาที ตามลำดับ ค่า k_3 และ k_4 เท่ากับ 1.184×10^{-1} และ 8.187×10^{-2} ลิตร/โมล.นาที ตามลำดับ และค่า k_5 และ k_6 เท่ากับ 1.310×10^{-1} และ 2.011×10^{-3} ลิตร/โมล.นาที ตามลำดับ จากค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้ทราบว่าปฏิกิริยาไปข้างหน้ามีความสำคัญและมีค่ามากกว่าปฏิกิริยาย้อนกลับในทุกขั้นตอน ผลจากการทดลอง และแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์สอดคล้องกัน

Cheng *et al*., (2004) ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของขบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันปาล์ม ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส 2 ชนิดคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมเมทอกไซด์ โดยในการทดลองปัจจัยที่ศึกษาคือ อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิ ใช้การกวนร่วมในการทำปฏิกิริยา โดยกำหนดให้ปฏิกิริยาเป็นแบบขั้นตอนเดียวไม่ผันกลับ (Irreversible reaction) แสดงได้ดังภาพที่ 11

$$TG + 3CH_3OH \xrightarrow{k} 3RCOOCH_3 + GL$$

ภาพที่ 11 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นแบบขั้นตอนเดียวไม่ผันกลับ
ที่มา: Cheng *et al*. (2004)

จากผลการศึกษาใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดคือ โซเดียมเมทอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.125 0.1875 และ 0.25 โมล/กิโลกรัมน้ำมัน พบว่าแนวโน้มของการเร่งปฏิกิริยาคล้ายๆกัน โดยปริมาณตัวเร่งทั้ง 2 ชนิดที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.125 โมล/กิโลกรัมน้ำมัน ผลของอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ 1:6 1:8 และ 1:10 พบว่าที่ 1:10 ให้ค่าแปลงผันของเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุด 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนที่ใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลไม่มีผลต่อค่าแปลงผัน ค่าแปลงผันสูงสุดทุกอัตราส่วนคือ 99 เปอร์เซ็นต์ และผลของอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองสำหรับตัวเร่งทั้ง 2 ชนิด ที่ 60 องศาเซลเซียส เหมาะสมที่สุด โดยพบว่าที่ 60 กับ 70 องศาเซลเซียส มีค่าแปลงผันใกล้เคียงกัน โดยเลือกใช้ 60 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมเพราะใกล้จุดเดือดของเมทานอล คือ 64.6 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวของน้ำมันปาล์มดิบที่ 55 องศาเซลเซียส จากการศึกษาได้เปรียบเทียบการใช้โซเดียมเมทอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เลือกใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ปริมาณ 0.125 โมล/กิโลกรัมน้ำมัน เพราะว่าเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการสูญเสียผลิตภัณฑ์น้อยกว่าในขั้นตอนของการคัดแยกผลิตภัณฑ์ สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของน้ำมันปาล์มคือ ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.125 โมล/กิโลกรัมน้ำมัน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันต่อเมทานอล 1:10 และอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่ากับ 0.163 ลิตร.โมล/นาที

Narvaez *et al*., (2007) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของขบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันปาล์ม ใช้อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ความเร็วรอบการกวน 600 รอบ/นาที ปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิที่ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส และปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.2

0.6 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าการสลายไปของไตรกลีเซอไรด์ และการเกิดของเมทิลเอสเทอร์ สูงในช่วง 8 นาทีแรก และจะช้าลงจนกระทั่งผ่านไป 20 นาที ก็เริ่มคงที่จนไม่มีการเปลี่ยนแปลง ปริมาณของไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์เพิ่มสูงสุดที่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ช่วง 3 นาทีแรก ผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นและเมทิลเอสเทอร์ ที่ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลา 4 นาที อุณหภูมิที่ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส มีปริมาณโมโนกลีเซอไรด์เท่ากับ 9.3 5.2 และ 3.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และณ สภาวะเดียวกันมีเมทิลเอสเทอร์เกิดขึ้นเท่ากับ 34 46 และ 53 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แต่ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิไม่มีผลต่อปฏิกิริยามากนัก โดยอุณหภูมิที่ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส มีเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 60 72 และ 73 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ 50 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.6 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของโมโนกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ใกล้เคียงกัน แต่จะมีผลอย่างมากถ้าเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.2 ไปเป็น 0.6 และ 1.0 ซึ่งจะมีเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 34 ไปเป็น 68 และ 72 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สรุปได้ว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา มีผลกระทบกับปฏิกิริยาการสลายไปของสารตั้งต้น และการเกิดขึ้นของเมทิลเอสเทอร์มากกว่าผลกระทบของอุณหภูมิ กลไกทางจลนพลศาสตร์กำหนดให้เป็นปฏิกิริยา 3 ขั้นตอนต่อเนื่องผันกลับได้ แสดงได้ดังภาพที่ 9 พบว่าผลการเปลี่ยนแปลงของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์สอดคล้องกับผลจากแบบจำลอง ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.2 ที่ 50 องศาเซลเซียส ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 และ k_6 เท่ากับ 0.049 0.112 0.226 0.133 0.122 และ 0.016 ลิตร/กรัมโมล.นาที ตามลำดับ ที่ 55 และ 60 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มของค่า k_1- k_6 ใกล้เคียงกัน แต่ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสูงคือ 0.6 และ 1.0 พบว่าค่า k_2 k_4 และ k_6 ซึ่งเป็น ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาย้อนกลับมีค่าเท่ากับ 0.00 สรุปได้ว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ 0.6-1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปฏิกิริยาย้อนกลับไม่มีความสำคัญกับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น

Doell *et al*., (2008) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของขบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันถั่วเหลือง ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเท่ากับ 1:27 ปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ 23 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส โดยกำหนดให้เป็นปฏิกิริยา 3 ขั้นตอนไม่เกิดการผันกลับอันดับสอง ค่า k_1 k_2 และ k_3 คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองไปข้างหน้า ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ตามลำดับ และเขียนสมการเชิงอนุพันธ์เพื่ออธิบายจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น แสดงได้ดังภาพที่ 12 ซึ่งพิจาราณาว่าปฏิกิริยาย้อนกลับไม่มีผลต่อปฏิกิริยา และค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาย้อนกลับมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า ผลการศึกษาที่ 23 องศาเซลเซียส

ปฏิกิริยาจะเริ่มคงที่หลัง 480 นาทีผ่านไป ในขณะที่ 50 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาจะเริ่มคงที่หลัง 120 นาทีผ่านไป แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น

$$\frac{d[TG]}{dt} = -k_1[TG][MeOH]$$

$$\frac{d[DG]}{dt} = k_1[TG][MeOH] - k_2[DG][MeOH]$$

$$\frac{d[MG]}{dt} = k_2[DG][MeOH] - k_3[MG][MeOH]$$

ภาพที่ 12 สมการเชิงอนุพันธ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น 3 ขั้นตอนไม่เกิดการผันกลับ
ที่มา: Diasakou *et al*. (1998)

ที่จุดปฏิกิริยาเสร็จสมบูรณ์ โมโนกลีเซอไรด์เหลือเท่ากับ 1.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนไตรกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ เหลือปริมาณต่ำมาก จากผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่า k_1 k_2 และ k_3 ที่ 23 องศาเซลเซียส เท่ากับ 6.3 15.3 และ 13 ลิตร/โมล.นาที ตามลำดับ ส่วนที่ 50 องศาเซลเซียส เท่ากับ 54.2 136 และ 139 ลิตร/โมล.นาที ตามลำดับ และที่ 60 องศาเซลเซียส เท่ากับ 65 770 และ 190 ลิตร/โมล.นาที ตามลำดับ สรุปว่าค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และค่าพลังงานกระตุ้นทั้ง 3 ขั้นตอน เท่ากันเท่ากับ 63 กิโลจูล/โมล

Diasakou *et al*., (1998) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของขบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันถั่วเหลือง โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่จะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงแทนคือ 220 และ 235 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:6 1:12 1:21 และ1:27 กำหนดให้ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยา 3 ขั้นตอนไม่ผันกลับอันดับหนึ่ง การศึกษาใช้ปริมาณเมทานอลมากเกินพอและเขียนสมการเชิงอนุพันธ์เพื่ออธิบายจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น แสดงได้ดังภาพที่ 12 ผลการทดลองพบว่าไตรกลีเซอไรด์ลดลงตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่งโมง ที่ 235 องศาเซลเซียส มีการลดลงของไตรกลีเซอไรด์เร็วกว่าที่ 220 องศาเซลเซียส ที่เวลาเดียวกันที่ 235 องศาเซลเซียส เหลือไดกลีเซอไรด์เหลือน้อยกว่า 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนโมโนกลีเซอไรด์เพิ่มปริมาณสูงขึ้นในช่วงวลาแรก และที่ 235 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่งโมง การลดลงของโมโนกลีเซอไรด์ช้ามาก เมื่อเทียบกับไตรกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ โดยโมโนกลีเซอไรด์เหลือประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การเกิดเมทิลเอสเทอร์ที่ 235 องศาเซลเซียส เวลา10 ชั่งโมง มีเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนที่ 220 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่งโมง มีปริมาณ 67 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา k_1 k_2 และ k_3 พบว่าที่อุณหภูมิ 220 และ 235 องศาเซลเซียส ค่า k_1 และ k_2 มีค่า

ใกล้เคียงกัน ส่วนค่า k_3 มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับค่า k_1 และ k_2 โดยที่ 220 องศาเซลเซียส ค่า k_1 k_2 และ k_3 เท่ากับ 8.17×10^{-6} 6.67×10^{-6} และ 3.0×10^{-6} กิโลกรัมของผสม/โมลเมทานอล.วินาที ตามลำดับ ที่ 235 องศาเซลเซียส ค่า k_1 k_2 และ k_3 เท่ากับ 1.90×10^{-6} 1.67×10^{-6} และ 2.4×10^{-6} กิโลกรัมของผสม/โมลเมทานอล.วินาที ตามลำดับ สรุปได้ว่าค่า k_3 ไม่เพิ่มตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์

Darnoko and Cheryan., (2000) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันปาล์ม ใช้อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:6 ปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิที่ 50 55 60 และ 65 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.5 1 และ 1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ผลการทดลองพบว่าที่ 50 องศาเซลเซียส โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในช่วงแรกของปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาสูงมากคือ ไตรกลีเซอไรด์ลดปริมาณลงอย่างรวดเร็วจนที่ 60 นาที เหลือเท่ากับ 0.54 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเกิดเมทิลเอสเทอร์สูงเช่นกัน ในส่วนของโมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นที่นาทีแรก และจะลดลงจนคงที่เมื่อเข้าสู่ 60 นาที ช่วงนาทีที่ 4 ที่ 50 และ 65 องศาเซลเซียส เกิดเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 73 และ 82 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์แบบปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ในเวลา 30 นาทีแรก ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา k_1 k_2 และ k_3 เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วที่อุณหภูมิที่สูง ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา k_1 k_2 และ k_3 ที่ 50 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.081 0.036 และ 0.112 (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.นาที)$^{-1}$ ตามลำดับ แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาคือ $k_3 > k_2 > k_1$ และหลังเวลา 30 นาที ขึ้นไปเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง ค่าพลังงานกระตุ้นของ โมโนกลีเซอไรด์น้อยที่สุดเท่ากับ 6.4 กิโลจูล/โมล และค่าพลังงานกระตุ้นของ ไตรกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ เท่ากับ 14.7 และ 14.2 กิโลจูล/โมล ตามลำดับ ส่วนผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นทำให้การเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น โดยจะเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.5 ไปเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 และ 1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การสลายไปของสารตั้งต้นไม่มีความแตกต่างกัน

Stamenkovic *et al*., (2008) ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันดอกทานตะวัน ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:6 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราการกวนผสมเท่ากับ 200 รอบ/นาที ณ อุณหภูมิ 10 20 และ 30 องศาเซลเซียส การทดลองเพื่อต้องการศึกษาถึงผลกระทบและขีดจำกัดของอุณหภูมิที่จะมีผลต่อการถ่ายเทมวล และการเกิดปฏิกิริยา (หาอุณหภูมิต่ำสุดที่เหมาะสม) สมมุติให้ปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนเดียวไม่ผันกลับอันดับสองแบบไม่แท้ (Irreversible pseudo-second order

reaction) และเป็นปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนเดียวไปข้างหน้าและผันกลับอันดับสอง พบว่าที่ 10 และ 20 องศาเซลเซียส การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นช้ามาก เนื่องจากอุณหภูมิต่ำมีผลให้การกระจายตัวของน้ำมันกับเมทานอลเกิดขึ้นได้ยาก จากความหนืดที่สูงของน้ำมันนั่นเอง ส่วนที่ 30 องศาเซลเซียส การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นดีกว่า ที่ 10 และ 20 องศาเซลเซียส ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนเดียวไม่ผันกลับที่10 20 และ 30 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.188 0.359 และ0.854 (ลิตร/โมล.นาที) ตามลำดับ และค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนเดียวไปข้างหน้าเท่ากับ 0.036 0.065 และ 0.092 (ลิตร/โมล.นาที) ตามลำดับ และค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนเดียวผันกลับได้เท่ากับ 0.016 0.028 และ 0.043 (ลิตร/โมล.นาที) ตามลำดับ ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาขั้นตอนเดียวไม่ผันกลับ ของปฏิกิริยาขั้นตอนเดียวไปข้างหน้าและผันกลับเท่ากับ 53.5 33.2 และ 34.2 กิโลจูล/โมล ตามลำดับ การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นที่อุณหภูมิสูงการต้านการถ่ายเทมวลระหว่างน้ำมันกับเมทานอลไม่มีผลต่อปฏิกิริยา พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์

Joelianingsih *et al*., (2007) ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันปาล์ม ใน Buble column reactor โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ใช้อุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยาคือ 523 543 และ 563 เคลวิน โดยกำหนดให้เป็นปฏิกิริยาขั้นตอนเดียวไม่ผันกลับอันดับหนึ่ง แสดงได้ดังภาพที่ 11 พบว่าไตรกลีเซอไรด์ลดปริมาณลง เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ที่เวลา 300 นาที ที่อุณหภูมิ 563 เคลวิน มีปริมาณไตรกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล เท่ากับ 1.67 91.9 และ 8.91 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในขณะที่โมโนกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ มีการเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของปฏิกิริยา และจะค่อยๆลดปริมาณลงจนกระทั่งคงที่ อิทธิพลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 523 543 และ 563 เคลวิน ค่า k เท่ากับ 0.0034 0.0051 และ 0.0056 (นาที)$^{-1}$ ตามลำดับ ค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 31 กิโลจูล/โมล

Vicente *et al*., (2006) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมัน *Brassica carinata* ใช้อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:6 อัตราการกวนเท่ากับ 600 รอบ/นาที ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที ปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 25 35 45 55 และ 65 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.5 1 และ1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กำหนดให้เป็นปฏิกิริยา 3 ขั้นตอนที่ต่อเนื่องผันกลับอันดับสอง แสดงได้ดังภาพที่ 9 พบว่าการสลายไปของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ และการเกิดขึ้นของเมทิลเอสเทอร์ เปลี่ยนแปลงสูงใน 20 นาทีแรก หลังจากนั้นก็เริ่มคงที่ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาที่ได้จากภาพที่ 9 เป็น Effective rate constant (k') และค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาจริง k หาได้จากความสัมพันธ์ของ k' กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตามสมการ $k' = kC$ โดยการสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง k' และ C

(ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา) และค่าความชันที่ได้คือค่า k ในแต่ละขั้นตอนของปฏิกิริยา ค่า k'_1 ในขั้น $TG \rightarrow DG$ มีค่าต่ำมากที่อุณหภูมิต่ำ คือ 25 35 องศาเซลเซียส แต่จะเพิ่มเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่า k'_5 ในขั้น $MG \rightarrow GL$ คงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ทุกๆ อุณหภูมิ ส่วนค่า k'_6 มีค่าน้อยมาก ประมาณ 0.00 เนื่องจากไม่มีการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ เพราะเนื่องจากเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลไม่เกิดการละลายกันได้ ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น พบว่าค่า k เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมการ $k' = kC$ ทุกๆสภาวะ โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นมีผลอย่างมากต่อ ค่า k'_3 และ k'_4 ในขั้นตอนของไดกลีเซอไรด์ไปเป็นโมโนกลีเซอไรด์ อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วยและค่าพลังงานกระตุ้นหาจากสมการอาร์เรย์เนียส ผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์

Noureddini and Zhu., (1997) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันถั่วเหลือง ใช้อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:6 ตัวเร่งปฏิกิริยาคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาคือ 30 40 45 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการกวนเท่ากับ 150 300 และ 600 รอบ/นาที ในการทำปฏิกิริยา โดยกำหนดให้เป็นปฏิกิริยา 3 ขั้นตอนที่ต่อเนื่องผันกลับอันดับสอง แสดงได้ดังภาพที่ 9 ผลการทดลองพบว่าที่อัตราการกวน 300 และ 600 รอบ/นาที ขนาด Drop size มีขนาดเล็กมีการกระจายตัวของน้ำมันกับเมทานอลเป็นเนื้อเดียวกันดีและเกิดปฏิกิริยาได้ดีจากที่มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้น แต่ที่ 150 รอบ/นาที ยังไม่มีการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีนักขนาด Drop size มีขนาดใหญ่ และมีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ต่ำที่เวลาเดียวกัน เทียบกับอัตราการกวน 300 และ 600 รอบ/นาที ส่วนผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้เร็ว โดยที่ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส การเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกันและเกิดเมทิลเอสเทอร์สูงใกล้เคียงกัน ในขณะที่ 30 และ 40 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิสูงช่วยลดความหนืดของน้ำมันเกิดการละลายกันเป็นเนื้อเดียวกันกับเมทานอล ได้ดี ช่วยส่งเสริมการถ่ายเทมวลระหว่างน้ำมันกับเมทานอลและทำให้โมเลกุลของสารตั้งต้นอยู่ในสถานะพลังงานสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี สรุปได้ว่าที่อุณหภูมิช่วง 50-70 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 300- 600 รอบ/นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น แต่อุณหภูมิที่ใช้ต้องไม่เกินจุดเดือดของเมทานอล ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาที่50 องศาเซลเซียส ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 และ k_6 เท่ากับ 0.05 0.110 0.215 1.228 0.242 และ 0.007 ลิตร/กรัมโมล.นาที ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยามีแนวโน้มเพิ่มตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

น้ำมันสบู่ดำ ที่มีค่าความเป็นกรด 2.38 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมน้ำมัน

2. สารเคมีสำหรับทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น

2.1 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) : (A.R. Grade)(Ajax Chemical Co., Ltd.)

2.2 เมทานอล (ความเข้มข้น 99.99% โดยน้ำหนัก) (A.R. Grade)(Meark, Germany)

2.3 กรดไฮโดรคลอริก (ความเข้มข้น 36.5-38 % โดยน้ำหนัก) (J.T. Baker, USA)

2.4 น้ำกลั่น

3. สารเคมีสำหรับการหาค่าความเป็นกรด (Acid value) ของน้ำมันเริ่มต้น

3.1 2 – โพรพานอล (ความเข้มข้น 99.99% โดยน้ำหนัก) (J.T. Baker, USA)

3.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) : (A.R. Grade)(Meark, Germany)

3.3 น้ำกลั่น

3.4 สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน

4. สารเคมีสำหรับการทำกราฟมาตรฐานเพื่อสอบเทียบ (Calibration standard) และการวิเคราะห์หาปริมาณไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์

4.1 โมโนโอเลอิน (Monoolein) 5000 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ของไพริดีน (Supelco, Spain)

4.2 ไดโอเลอิน (Diolein) 5000 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ของไพริดีน (Supelco, Spain)

4.3 ไตรโอเลอิน (Triolein): (Fluka, Switzerland)

4.4 ไตรคาพริน (Tricaprin C10:0, Internal standard): (Fluka, Switzerland)

4.5 กลีเซอรอล (Glycerol) (UNIVAR, USA)

4.6 N-Methyl-N-(trimethylsily) trifluoroacetamide (MSTFA): (GC grade) (Fluka, Switzerland)

4.7 เฮปเทน (Heptane): (Fluka, Switzerland)

4.8 ไพริดีน (Pyridine): (Fluka, Switzerland)

5. อุปกรณ์สำหรับทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น

5.1 ชุดอุปกรณ์เตาให้ความร้อนประกอบด้วย แกนกวนด้วยแท่งแม่เหล็กและแท่งควบคุมอุณหภูมิ: model SLR, S/N:SGH:00998114, Sciectific Promotion Co., Ltd.

5.2 ชุดอุปกรณ์ Three-necked batch reactor ประกอบด้วย รีฟลักซ์คอนเดนเซอร์

5.3 ชุดเครื่องแก้ว

5.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก : METTLER PM6100 (Division of Ciba-Geigy (MPL) Ltd.)

5.5 นาฬิกาจับเวลา

5.6 เครื่องน้ำหล่อเย็น (Cooling bath): model CB1D, Bosstech Thailand Co., Ltd.

5.7 เครื่องผสม (vortex mixer): model KMC-1300V, VISION, Korea

5.8 เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge): model PLC-012, GEMMY, Taiwan

5.9 เครื่องชั่งไฟฟ้า 4 ตำแหน่ง: model BL210S, Sartorius, Goettingen, Germany

5.10 Autopipett ขนาด 5 มิลลิลิตร

6. อุปกรณ์สำหรับการทำกราฟมาตรฐานเพื่อสอบเทียบ (Calibration standard) และการวิเคราะห์หาปริมาณไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์

6.1 Autopipett ขนาด 100 ไมโครลิตร

6.2 Autopipett ขนาด 1000 ไมโครลิตร

6.3 เครื่องผสม (vortex mixer): model KMC-1300V, VISION, Korea

6.4 ขวด vial ขนาด 1 และ 10 มิลลิลิตร

6.5 Microsyringe ขนาด 10 100 250 และ500 ไมโครลิตร

6.6 เครื่องชั่งไฟฟ้า 4 ตำแหน่ง: model BL210S, Sartorius, Goettingen, Germany

6.7 เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) : model GC-2010, Shimadzu, Japan

-ก๊าซตัวพา (Carrier Gas): ฮีเลียม (He)

-คอลัมน์: Capillary column DB-5HT, ความยาว 10-15 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.32 มิลลิเมตรและความหนา 0.1 ไมโครเมตร

-Stationary phase: 5% phenylpolydimethylsiloxane

-ดีเทคเตอร์ : เฟลมไอออนไนเซชันดีเทคเตอร์ (FID) 390 องศาเซลเซียส

-อินเจคเตอร์: โปรแกรมอุณหภูมิของคอลัมน์ (Column Temperature Program) เริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 1 นาที ต่อด้วย เพิ่มอุณหภูมิอัตรา 15 องศาเซลเซียส/นาที ถึง 180 องศาเซลเซียส ต่อด้วยเพิ่มอุณหภูมิอัตรา 7 องศาเซลเซียส/นาที ถึง 230 องศาเซลเซียส ต่อด้วยเพิ่มอุณหภูมิอัตรา 30 องศาเซลเซียส/นาที ถึง 370 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 10 นาที ใช้ เวลาในการวิเคราะห์ 31.48 นาทีต่อตัวอย่าง

วิธีการ

1. การออกแบบการทดลองศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ

การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยในการทำปฏิกิริยาคือ อุณหภูมิ และอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ โดยอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา คือ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 1:9 และ 1:12 ตามลำดับ การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ออกแบบการทดลองได้ 9 การทดลอง แสดงได้ดังตารางที่ 8 ทุกสภาวะทำการทดลอง 3 ซ้ำ

ตารางที่ 8 การออกแบบการทดลองศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนโมลน้ำมันต่อเมทานอล	ปริมาณน้ำมันสบู่ดำ (กรัม)	ปริมาณเมทานอล (กรัม) *
1	40	1:7	100	24.89
2	40	1:9	100	32
3	40	1:12	100	42.67
4	50	1:7	100	24.89
5	50	1:9	100	32
6	50	1:12	100	42.67
7	60	1:7	100	24.89
8	60	1:9	100	32
9	60	1:12	100	42.67

* วิธีการคำนวณภาคผนวก ก.

2. การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล ต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ

การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำในระบบแบบกะ แสดงได้ดังภาพที่ 13 ซึ่งประกอบด้วยเตาให้ความร้อน ชุดอุปกรณ์ Three neck flask ขนาด 500 มิลลิลิตร ที่ประกอบด้วยคือ Reflux condenser ของน้ำหล่อเย็น Thermometer probe และช่องสำหรับเก็บตัวอย่าง

2.1 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ

นำน้ำมันสบู่ดำ 100 กรัม ใส่ลงใน Three neck flask ขนาด 500 มิลลิลิตร โดยอุ่นน้ำมันให้ร้อนตามอุณหภูมิที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งกวนด้วยความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 (ทัศนีย์, 2550) ในระหว่างรอทำปฏิกิริยาเตรียมสารผสมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 1 กรัม กับเมทานอลปริมาณ 24.89 กรัม จนละลายเป็นเนื้อเดียวกันของสารละลายเมทอกไซด์

เริ่มต้นทำปฏิกิริยาเติมสารละลายเมทอกไซด์ใส่ลงใน Flask ที่ได้อุณหภูมิตามที่กำหนด และเริ่มจับเวลาการทำปฏิกิริยา ในระหว่างการทำปฏิกิริยาให้ดูดตัวอย่างสารผสมของน้ำมัน 2.5 มิลลิลิตร ที่เวลา 0.5 1 2 4 7 12 20 30 60 และ 90 นาที แล้วทำการหยุดปฏิกิริยาแต่ละช่วงเวลาโดยทันทีด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.05 มิลลิลิตร (1:4 ปริมาตร/ปริมาตร) (Stamenkovic *et al.*, 2008) นำตัวอย่างสารผสมแต่ละช่วงเวลาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4500 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที นำน้ำมันชั้นบนไปวิเคราะห์หา ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ โดยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟีตามวิธีมาตรฐาน EN 14105

2.2 ศึกษาผลกระทบอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล

นำน้ำมันสบู่ดำ 100 กรัม ใส่ลงใน Three neck flask ขนาด 500 มิลลิลิตร อุ่นน้ำมันให้ร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งกวนด้วยความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที สภาวะการทำปฏิกิริยาอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 1:9 และ 1:12 ในระหว่างรอทำปฏิกิริยาเตรียมสารผสมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 1 กรัม กับเมทานอลที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 1:9 และ 1:12 ซึ่งใช้เมทานอลปริมาณเท่ากับ 24.89 32 และ 42.67 กรัม ตามลำดับ ผสมจนละลายเป็นเนื้อเดียวกันของสารละลายเมทอกไซด์

เริ่มต้นทำปฏิกิริยาเติมสารละลายเมทอกไซด์ที่เตรียมได้ใส่ลงใน Flask เริ่มจับเวลาการทำปฏิกิริยาในระหว่างการทำปฏิกิริยาให้ดูดตัวอย่างสารผสมของน้ำมัน 2.5 มิลลิลิตร ที่เวลา 0.5 1 2 4 7 12 20 30 60 และ 90 นาที แล้วทำการหยุดปฏิกิริยาแต่ละช่วงเวลาโดยทันทีด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.05 มิลลิลิตร (1:4 ปริมาตร/ปริมาตร) (Stamenkovic *et al.*, 2008) นำตัวอย่างสารผสมแต่ละช่วงเวลาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4500 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที นำน้ำมันชั้นบนไปวิเคราะห์หาไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ โดยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟีตามวิธีมาตรฐาน EN 14105

ภาพที่ 13 ชุดอุปกรณ์ Three neck flask ขนาด 500 มิลลิลิตร พร้อมเตาให้ความร้อน

2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์ โดยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี (วิธีมาตรฐาน EN 14105)

นำน้ำมันชั้นบน 25-30 มิลลิกรัม ลงในขวดทดลอง เติมสารละลาย Internal Standard ปริมาตร 50 ไมโครลิตร และสาร MSTFA ปริมาตร 50 ไมโครลิตร ปิดฝาและเขย่าสารละลายอย่างรุนแรงให้เข้ากัน วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 15 นาที จากนั้นเติมสารละลายเฮปเทน ปริมาตร 4 มิลลิลิตร และนำสารตัวอย่าง ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ผลวิเคราะห์และการคำนวณแสดงที่ภาคผนวก ง)

3. การหาอันดับการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ

สำหรับการศึกษากำหนดให้กลไกทางจลนพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยา 3 ขั้นตอนไม่เกิดการผันกลับ แสดงได้ดังภาพที่ 14 การทดลองสมมุติให้ปริมาตรของผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดการทำปฏิกิริยา 90 นาที และปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยามากเกินพอ โดยปฏิกิริยาไปข้างหน้ามีอิทธิพลและสำคัญต่อปฏิกิริยา ส่วนปฏิกิริยาผันกลับจะไม่พิจาราณาเหมือนกันกับงานวิจัยของ Doell *et al* ในปี 2008 และของ Darnoko and Cheryan ในปี 2000 ซึ่งได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น กำหนดให้เป็นปฏิกิริยา 3 ขั้นตอนไม่เกิดการผันกลับ พิจาราณาว่าปฏิกิริยาผันกลับเกิดขึ้นต่ำมากและไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา

$$TG + MeOH \xrightarrow{k_1} DG + R_1COOCH_3$$

$$DG + MeOH \xrightarrow{k_2} MG + R_2COOCH_3$$

$$MG + MeOH \xrightarrow{k_3} GL + R_3COOCH_3$$

ภาพที่ 14 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น 3 ขั้นตอนไม่เกิดการผันกลับ
ที่มา: Doell *et al*. (2008)

จากปฏิกิริยา 3 ขั้นตอนในภาพที่ 14 สามารถกำหนดแบบจำลองอันดับในการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังนี้

3.1 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งไม่ผันกลับแบบไม่แท้ (Irreversible first-order reaction)

สมมุติให้การสลายไปของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์ที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งไม่ผันกลับแบบไม่แท้ โดยเขียนสมการเชิงอนุพันธ์เพื่ออธิบายการสลายของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งไม่ผันกลับแบบไม่แท้ แสดงได้ดังภาพที่ 15

$$-d[TG]/dt = k_1 TG$$
$$-d[DG]/dt = k_2 DG - k_1 TG$$
$$-d[MG]/dt = k_3 MG - k_2 DG$$

ภาพที่ 15 สมการเชิงอนุพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งไม่ผันกลับแบบไม่แท้

จากภาพที่ 15 ค่า k_1 k_2 และ k_3 คือค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้ของ ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ตามลำดับ t คือเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

3.2 ปฏิกิริยาอันดับสองไม่ผันกลับแบบไม่แท้ (Irreversible pseudosecond-order reaction)

สมมุติให้การสลายไปของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์ที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา เป็นปฏิกิริยาอันดับสองไม่ผันกลับแบบไม่แท้ โดยเขียนสมการเชิงอนุพันธ์เพื่ออธิบายการสลายของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยาอันดับสองไม่ผันกลับแบบไม่แท้ แสดงได้ดังภาพที่ 16

$$-d[TG]/dt = k_1 [TG]^2$$
$$-d[DG]/dt = k_2 [DG]^2 - k_1 [TG]^2$$
$$-d[MG]/dt = k_3 [MG]^2 - k_2 [DG]^2$$

ภาพที่ 16 สมการเชิงอนุพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับสองไม่ผันกลับแบบไม่แท้

จากภาพที่ 16 ค่า k_1 k_2 และ k_3 คือค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ของ ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ตามลำดับ t คือเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

ก่อนการหาอันดับการเกิดปฏิกิริยาต้องคำนวณหาปริมาณสารในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ (ผลวิเคราะห์และการคำนวณแสดงที่ภาคผนวก จ) เพื่อนำผลของปริมาณไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์ มาใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา

3.3 การหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาและการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

จากแบบจำลองอันดับการเกิดปฏิกิริยาในข้อ 4.1 และ 4.2 การหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาและการเปรียบเทียบผลจากการทดลองและแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม MATLAB Version 7.5.0.342 R2007b ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งไม่ผันกลับแบบไม่แท้และสมการเชิงอนุพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับสองไม่ผันกลับแบบไม่แท้เพื่อให้ได้ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา k_1 k_2 และ k_3 จากแบบจำลองที่ได้กำหนดขึ้นมา จากนั้นนำค่า k_1 k_2 และ k_3 ไปคำนวณหาค่า Sum of squares error ตามสมการที่ 2 ซึ่งเป็นการแสดงถึงความสอดคล้องกันของผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของทั้ง 2 แบบจำลอง โดยผลจากค่า Sum of squares error จากแบบจำลองอันไหนมีค่าน้อยกว่าหรือเข้าใกล้ศูนย์ ก็แสดงได้ว่าแบบจำลองนั้นถูกต้อง

$$SS = \sum \left(C_{\exp} - C_{sim} \right)^2 \qquad (2)$$

จากสมการที่ 2 SS คือ ค่า Sum of squares error

C_{exp} คือ ค่าจากผลการทดลอง

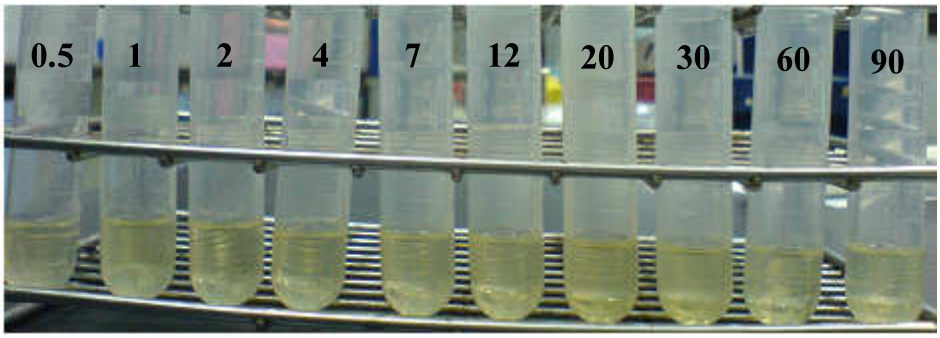
C_{sim} คือ ค่าจากแบบจำลอง

4. การหาค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy)

การคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น(Ea) โดยการสร้างกราฟสมการเส้นตรงของสมการอาร์เรย์เนียสสมการที่ 1 ระหว่าง $\ln k_1$ $\ln k_2$ และ $\ln k_3$ กับ 1/[T] (เคลวิน)$^{-1}$ ของขั้นการสลายไปของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ตามลำดับ ค่าความชันที่ได้จากกราฟนำไปคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (ผลการคำนวณแสดงที่ภาคผนวก ฉ)

ผลและวิจารณ์

จากผลการทดลองที่ผ่านการวิเคราะห์ผลหาค่าปริมาณไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ จากวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี ตามวิธีมาตรฐาน EN 14105 พบว่าในการเก็บข้อมูลและผลการทดลองที่ได้ที่ทุกสภาวะของอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เริ่มต้นผลการทดลองที่เวลา 12-90 นาที และที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส เริ่มต้นผลการทดลองที่เวลา 7-90 นาที เพราะในช่วงเวลาก่อนหน้านี้ ไม่สามารถที่จะวิเคราะห์ผลได้ เนื่องมาจากว่าช่วงเวลาแรกปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ มีปริมาณที่สูงมาก ซึ่งไม่ได้อยู่ในช่วงของวิธีมาตรฐาน EN 14105 ที่รองรับผล จึงทำให้ขาดข้อมูลในช่วงเวลาแรกของปฏิกิริยาไป แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ ในช่วงเวลาที่หาค่าได้ก็สามารถที่จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาและกลไกทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำได้ ผลการทดลองน้ำมันตัวอย่างที่ช่วงเวลาต่างๆ ที่ทำการปั่นเหวี่ยงให้แยกชั้น โดยมีน้ำมันชั้นบนและชั้นล่างของกลีเซอรอล แสดงได้ดังภาพที่ 17



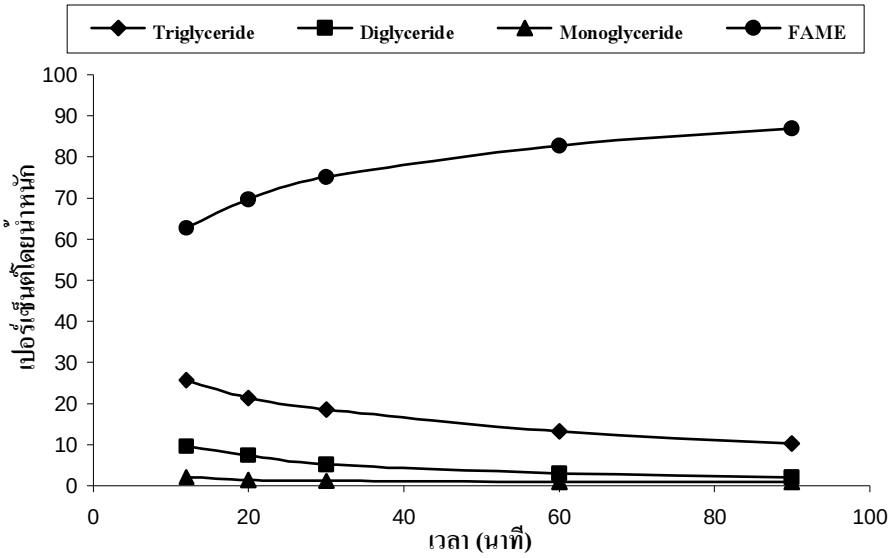
ภาพที่ 17 น้ำมันตัวอย่างที่ทำการปั่นเหวี่ยงให้แยกชั้นที่ช่วงเวลา 0.5 1 2 4 7 12 20 30 60 และ 90 นาที

1. ผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น

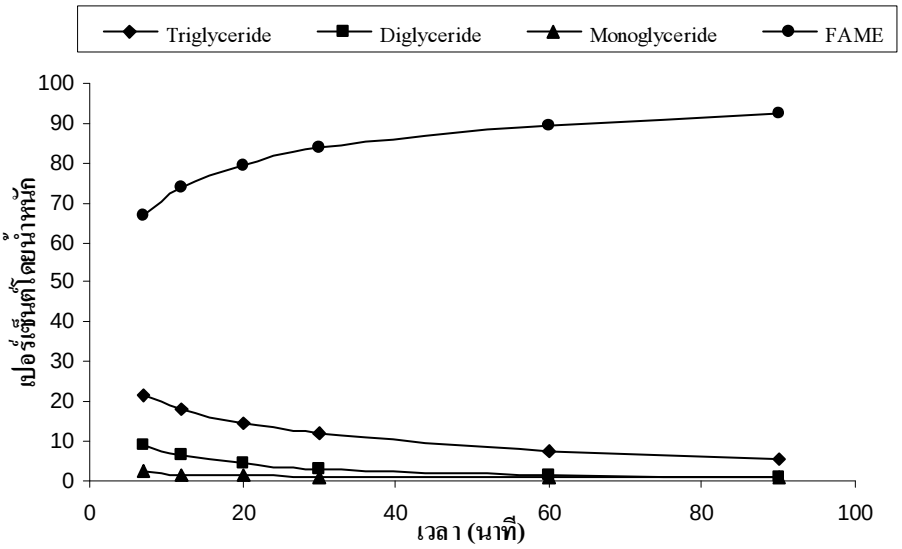
1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์

ภาพที่ 18 19 และ 20 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล

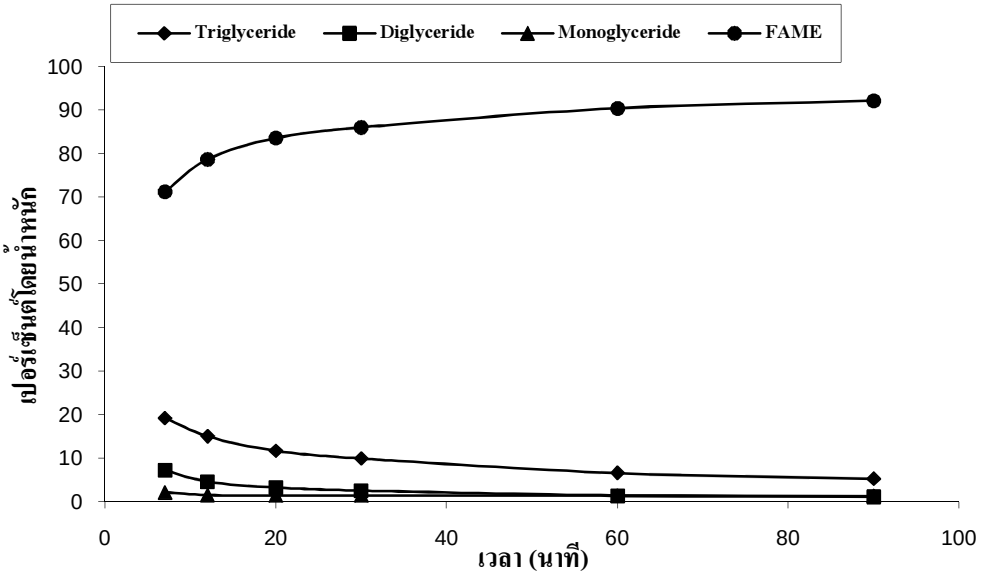
เป็น 1:7 ใช้ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการทดลองที่เวลา 12 นาที ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีปริมาณไตรกลีเซอไรด์เหลือเท่ากับ 25.6 18.31 และ 15.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งในช่วงเวลาที่ 12 นาทีแรกมีการเกิดปฏิกิริยาและการสลายไปของไตรกลีเซอไรด์เกิดเร็วมาก เนื่องจากน้ำมันพืชโดยทั่วไปมีไตรกลีเซอไรด์เป็นส่วนประกอบประมาณ 90-98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Srivastara and Prasad., 2000) การสลายไปของไตรกลีเซอไรด์เกิดขึ้นสูงโดยลดลงอย่างรวดเร็วจาก 90-98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลดเหลือเท่ากับ 25.6 18.31 และ 15.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยเมื่ออุณหภูมิทำปฏิกิริยาสูงขึ้นการเกิดปฏิกิริยาและการสลายไปของไตรกลีเซอไรด์เกิดสูงขึ้น และไตรกลีเซอไรด์มีแนวโน้มการสลายไปตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีการสลายไปของไตรกลีเซอไรด์สูงที่สุดจนที่เวลาสุดท้ายที่ 90 นาที มีไตรกลีเซอไรด์ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส เหลือเท่ากับ 10.21 5.34 และ 5.34 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ผลการทดลองการสลายไปของไตรกลีเซอไรด์สอดคล้องกับหลายงานวิจัย ในปี 2006 Vicente *et al* ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมัน *Brassica carinata* ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:6 ที่อุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส พบว่ามีการสลายไปของไตรกลีเซอไรด์เกิดขึ้นสูงใน 20 นาทีแรก โดยที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส มีการสลายไปของไตรกลีเซอไรด์เกิดขึ้นสูงที่สุด ในปี 2008 Narvaez *et al* ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันปาล์ม โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:6 ที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส พบว่าการสลายไปของไตรกลีเซอไรด์และการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นสูงใน 8 นาทีแรก และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส การสลายไปของไตรกลีเซอไรด์เกิดขึ้นสูงที่สุด



ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์กับเวลาที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 40 ^{0}ซ



ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์กับเวลาที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 50 ^{0}ซ



ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์กับเวลา ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 60 ^{0}ซ

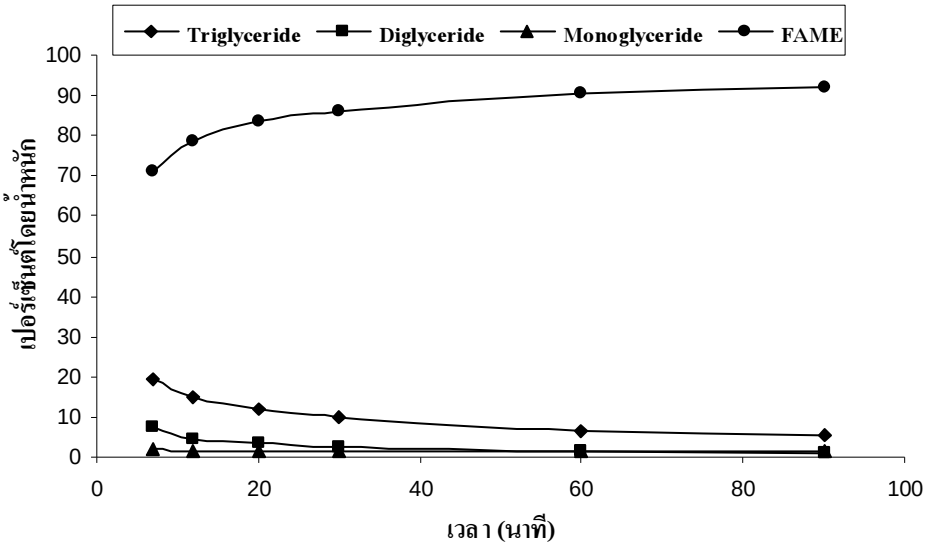
ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นสารมัธยันต์ (Intermidiate) ที่เกิดระหว่างการสลายของไตรกลีเซอไรด์ จากภาพที่ 18 19 และ 20 ที่เวลา 12 นาที ณ อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีไดกลีเซอไรด์เหลือเท่ากับ 9.58 6.41 และ 4.46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เหลือไดกลีเซอไรด์ต่ำที่สุด พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การสลายไปของไดกลีเซอไรด์เกิดสูงขึ้นและมีแนวโน้มสลายไปตามเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยที่เวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส เหลือไดกลีเซอไรด์เท่ากับ 2.05 1.12 และ 1.21 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีปริมาณไดกลีเซอไรด์ใกล้เคียงกันที่เวลา 90 นาที ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณของโมโนกลีเซอไรด์เกิดขึ้นสูงช่วง 12 นาทีแรก โดยที่เวลา 12 นาที ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีโมโนกลีเซอไรด์เหลือเท่ากับ 2.1 1.66 และ 1.57 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เหลือโมโนกลีเซอไรด์ต่ำที่สุด แต่พบว่าหลังจากเวลา 12 นาที ทั้งที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส การสลายไปของโมโนกลีเซอไรด์เกิดขึ้นต่ำมากจนถึง 90 นาที จากผลการทดลองสอดคล้องกับหลายงานวิจัย ในปี 2000 Darnoko and Cheryan ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันปาล์ม ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:6 ที่อุณหภูมิ 50-65 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเริ่มต้นมีไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์อยู่น้อยมากแต่เมื่อเกิดปฏิกิริยาและเกิด

การสลายของไตรกลีเซอไรด์ทำให้มีปริมาณของไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์เพิ่มมากขึ้นในช่วง 3 นาทีแรก โดยไดกลีเซอไรด์มีการสลายไปตามเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่โมโนกลีเซอไรด์หลังเวลา 20 นาที มีการสลายเกิดขึ้นช้ามากจนถึงเวลาสุดท้ายของการทำปฏิกิริยา

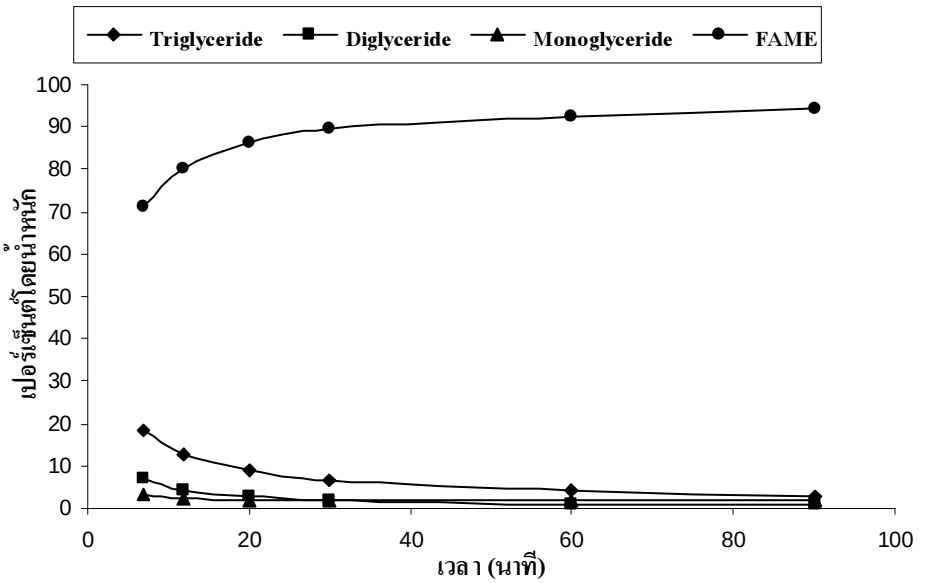
ผลการศึกษาปริมาณเมทิลเอสเทอร์(FAME) จากภาพที่ 18 19 และ 20 พบว่าที่เวลา 12 นาที ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีปริมาณของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 62.71 73.62 และ 78.66 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์เกิดขึ้นสูงสุดและเมทิลเอสเทอร์เพิ่มปริมาณตามเวลาที่เพิ่มขึ้น จนที่เวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 87.86 92.4 และ 92.07 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ใกล้เคียงกันที่เวลา 90 นาที จากผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น (Noureddini *et al*., 1997) อุณหภูมิสูงช่วยลดความหนืดของน้ำมัน ช่วยเสริมการละลายเป็นเนื้อเดียวกันของน้ำมันกับเมทานอล ช่วยเสริมการถ่ายเทมวลระหว่างน้ำมันกับเมทานอล และทำให้โมเลกุลของสารตั้งต้นอยู่ในสถานะพลังงานสูง ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้สูงขึ้น

1.2 ผลกระทบของอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลต่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์

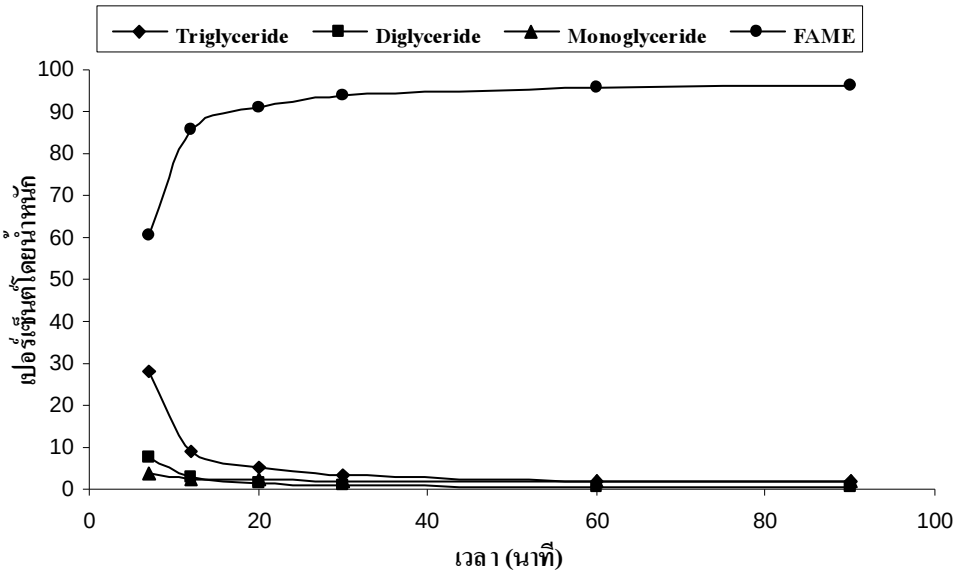
ภาพที่ 21 22 และ 23 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 1:9 และ 1:12 ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เวลา 12 นาที ที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 1:9 และ 1:12 มีไตรกลีเซอไรด์เหลือเท่ากับ 15.12 12.85 และ 8.83 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าที่ 1:12 เหลือไตรกลีเซอไรด์ต่ำที่สุด แนวโน้มที่เกิดขึ้นเมื่อปริมาณเมทานอลเพิ่มสูงขึ้นทำให้การเกิดปฏิกิริยาและการสลายไปของไตรกลีเซอไรด์เกิดสูงขึ้น โดย ณ เวลาเดียวกันที่ 1:12 มีการสลายไปของไตรกลีเซอไรด์สูงสุด จนถึงเวลา 90 นาที ที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 1:9 และ 1:12 มีไตรกลีเซอไรด์เหลือเท่ากับ 5.34 3.07 และ 1.78 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ



ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์กับเวลา ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาอุณหภูมิ 60 ^{0}ซ ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7



ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์กับเวลา ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาอุณหภูมิ 60 ^{0}ซ ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9



ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ กับเวลา ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาอุณหภูมิ 60 ^{0}ซ ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ จากภาพที่ 21 22 และ 23 ที่เวลา 12 นาที ที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 1:9 และ 1:12 มีไดกลีเซอไรด์เหลือเท่ากับ 4.64 4.44 และ 3.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าที่ 1:12 มีการสลายไปของไดกลีเซอไรด์เกิดขึ้นสูงสุด โดยทั้งที่ 1:7 1:9 และ 1:12 มีการสลายไปของไดกลีเซอไรด์ตามเวลาที่เพิ่มขึ้น จนถึงเวลา 90 นาที ที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 1:9 และ 1:12 มีไดกลีเซอไรด์เหลือเท่ากับ 1.21 0.84 และ 0.33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนโมโนกลีเซอไรด์มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสูงช่วง 12 นาทีแรก และที่เวลา 12 นาที ที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 1:9 และ 1:12 มีโมโนกลีเซอไรด์เหลือเท่ากับ 1.58 2.51 และ 2.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากผลการทดลองหลังเวลา 12 นาที ทั้งที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 1:9 และ 1:12 มีการสลายไปของโมโนกลีเซอไรด์เกิดขึ้นช้ามากจนถึงเวลา 90 นาที

ส่วนผลการทดลองของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ จากภาพที่ 21 22 และ 23 ที่เวลา 12 นาที ที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 1:9 และ 1:12 มีเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 78.66 80.23 และ 85.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล

1:12 มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุด และที่เวลา 90 นาที ที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล เป็น 1:7 1:9 และ 1:12 มีเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 92.06 94.21 และ 96.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ผลการทดลองของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดสูงขึ้นสัมพันธ์กับการเกิดปฏิกิริยาและการสลายไปของไตรกลีเซอไรด์เกิดขึ้นสูงที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล เป็น 1:12

จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาและการเกิดผลิตภัณฑ์คือเมทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย ในปี 2004 Cheng *et al* ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:6 1:8 และ 1:10 พบว่าที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:10 เมื่อปฏิกิริยาเสร็จสมบูรณ์ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุดและไตรกลีเซอไรด์เหลือต่ำสุด

2. ผลการหาอันดับการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ

จากสมมุติฐานของการทดลองที่สมมุติให้ปริมาณเมทานอลที่ใช้ทำปฏิกิริยามากเกินพอ โดยที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ 1:12 เป็นสภาวะที่กำหนดให้เมทานอลมากเกินพอเพื่อใช้ในการหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาในการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากค่าปริมาณของเมทานอลที่ 1:12 มีค่ามากกว่าในงานวิจัยที่ได้มีการรายงานไว้ของ Darnoko and Cheryan ในปี 2000 ซึ่งศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันปาล์ม ที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:6 และพบว่าที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ 1:6 ปริมาณเมทานอลมากเกินพอ และเรายังกำหนดให้ ณ เวลาเริ่มต้นที่ 0 นาที สมมุติให้ในน้ำมันสบู่ดำมีปริมาณไตรกลีเซอไรด์เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และไดกลีเซอไรด์กับโมโนกลีเซอไรด์ไม่มีในน้ำมันสบู่ดำ

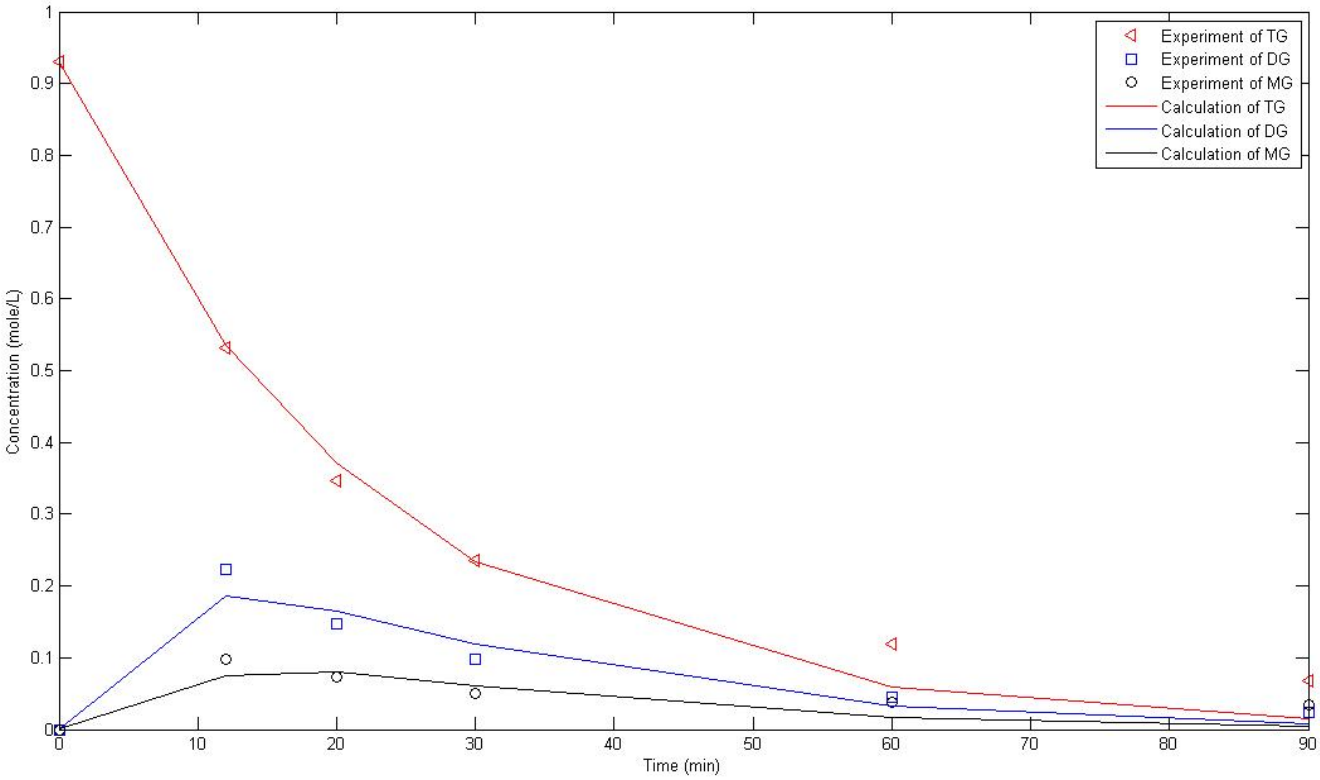
2.1 ผลของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้

ภาพที่ 24 25 และ 26 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้ แสดงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ที่เวลาต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 40 50 และ60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยค่า Sum of squares error ของผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลอง ที่สภาวะ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.0109 ที่สภาวะ 50 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.009488 และที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.01059

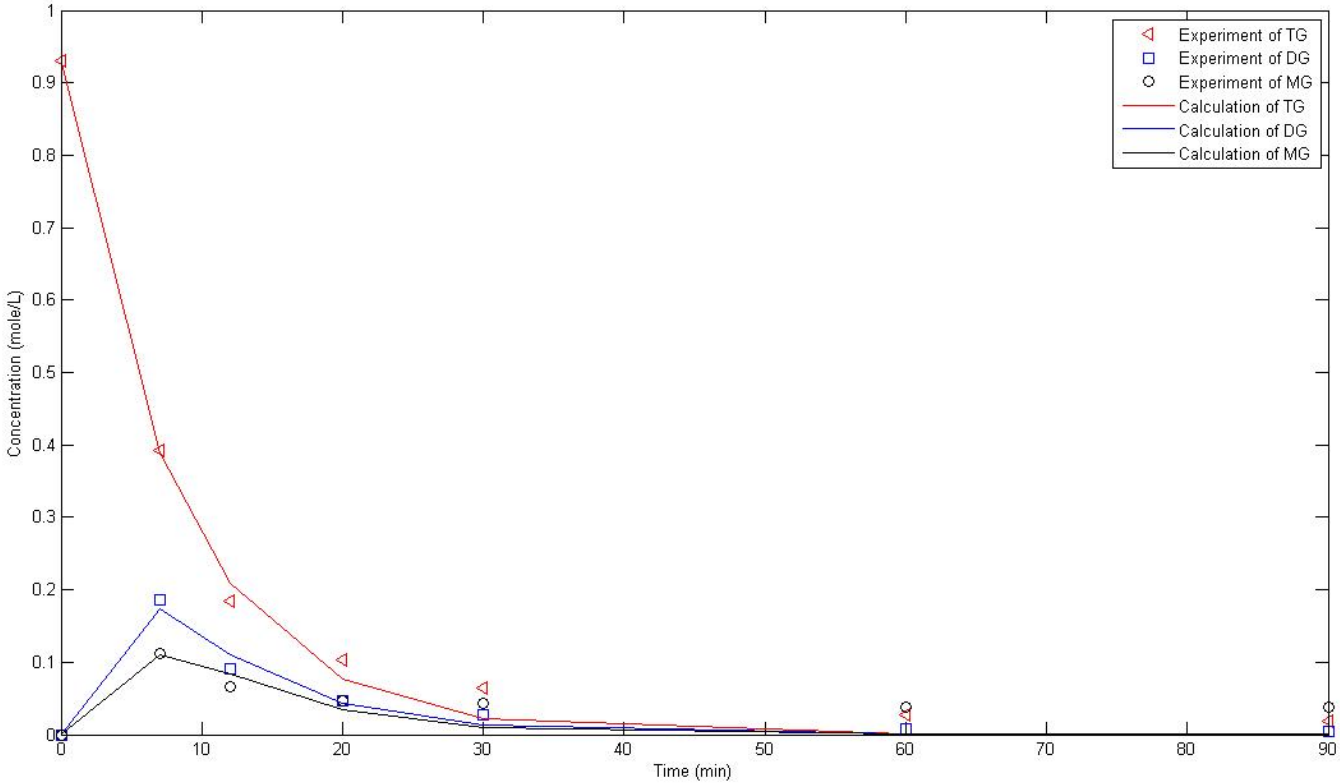
2.2 ผลของปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้

ภาพที่ 27 28 และ 29 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ แสดงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ที่เวลาต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 40 50 และ60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยค่า Sum of squares error ของผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลอง ที่สภาวะ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.01165 ที่สภาวะ 50 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.0144 และที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.011

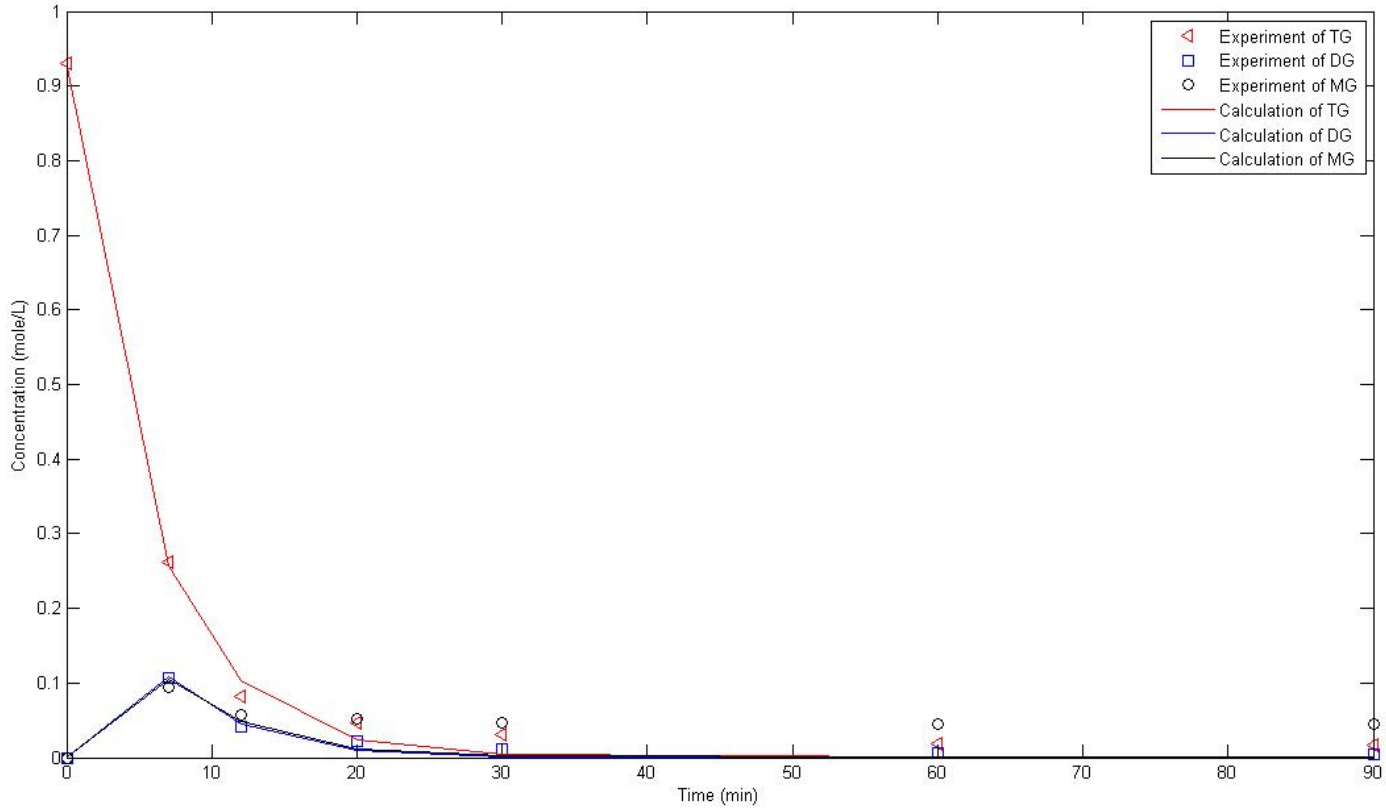
จากผลของค่า Sum of squares error เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างผลของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้และผลของปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ พบว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้มีค่า Sum of squares error ต่ำกว่าปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสอดคล้องกันและใกล้เคียงกันของผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้มากกว่า สรุปได้ว่าอันดับการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้



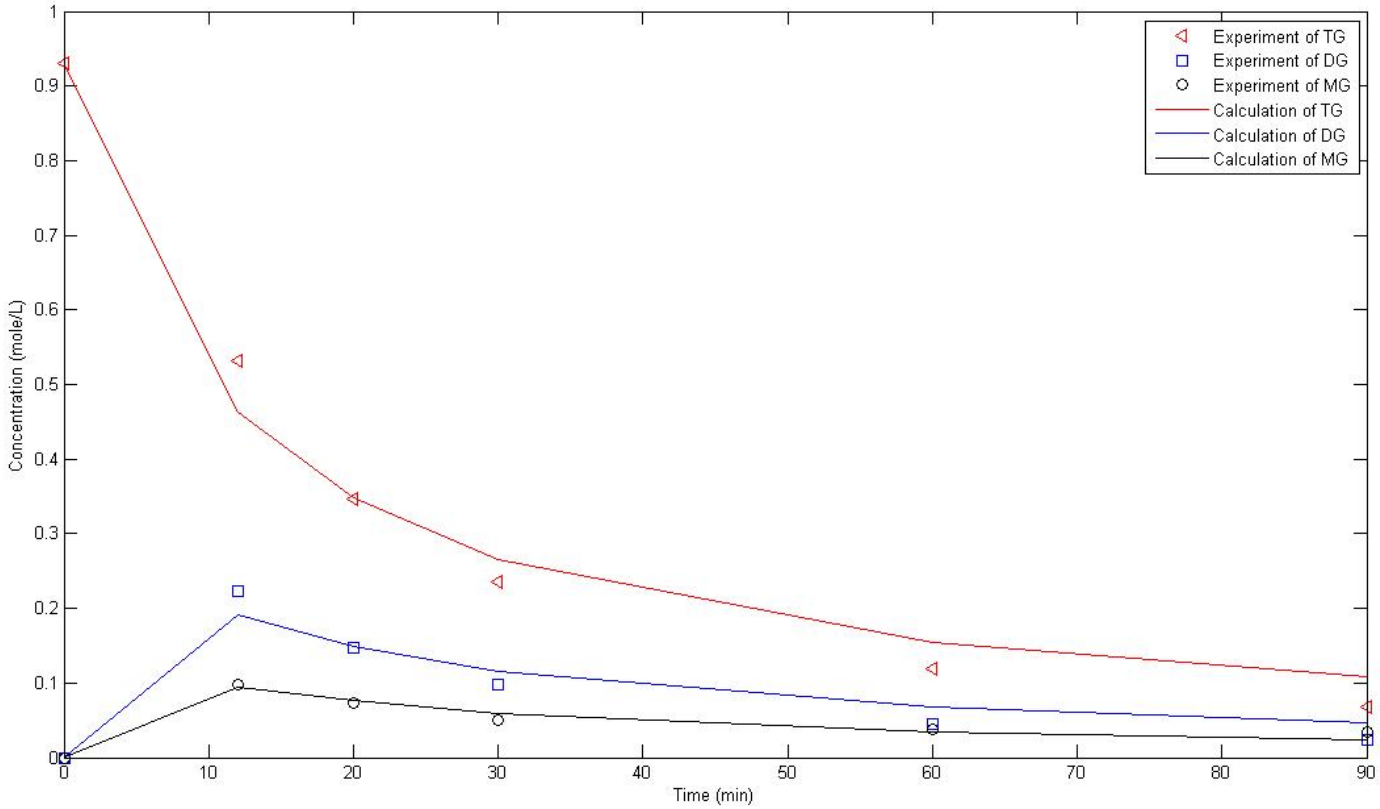
ภาพที่ 24 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้ แสดงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ที่เวลาต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



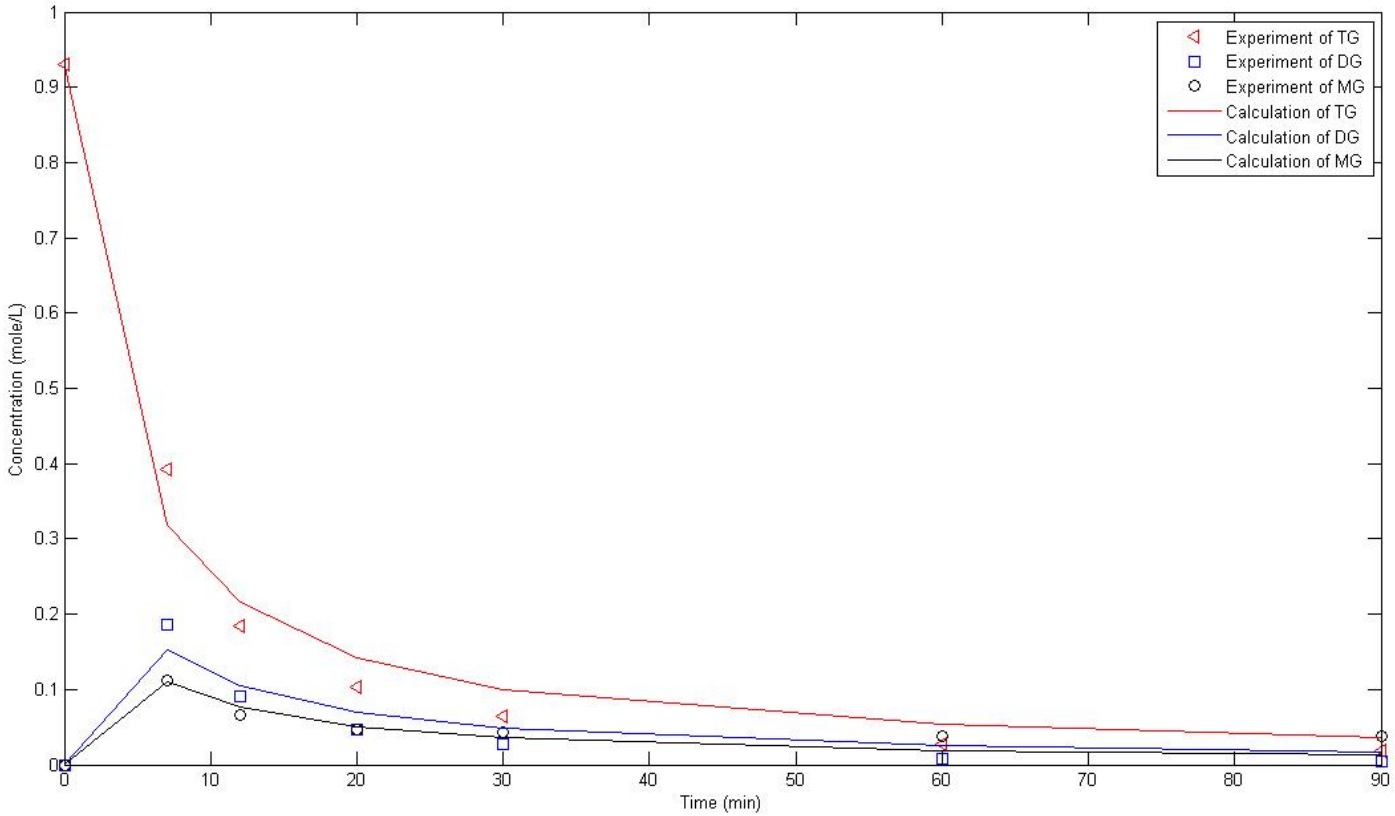
ภาพที่ 25 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้ แสดงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ที่เวลาต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



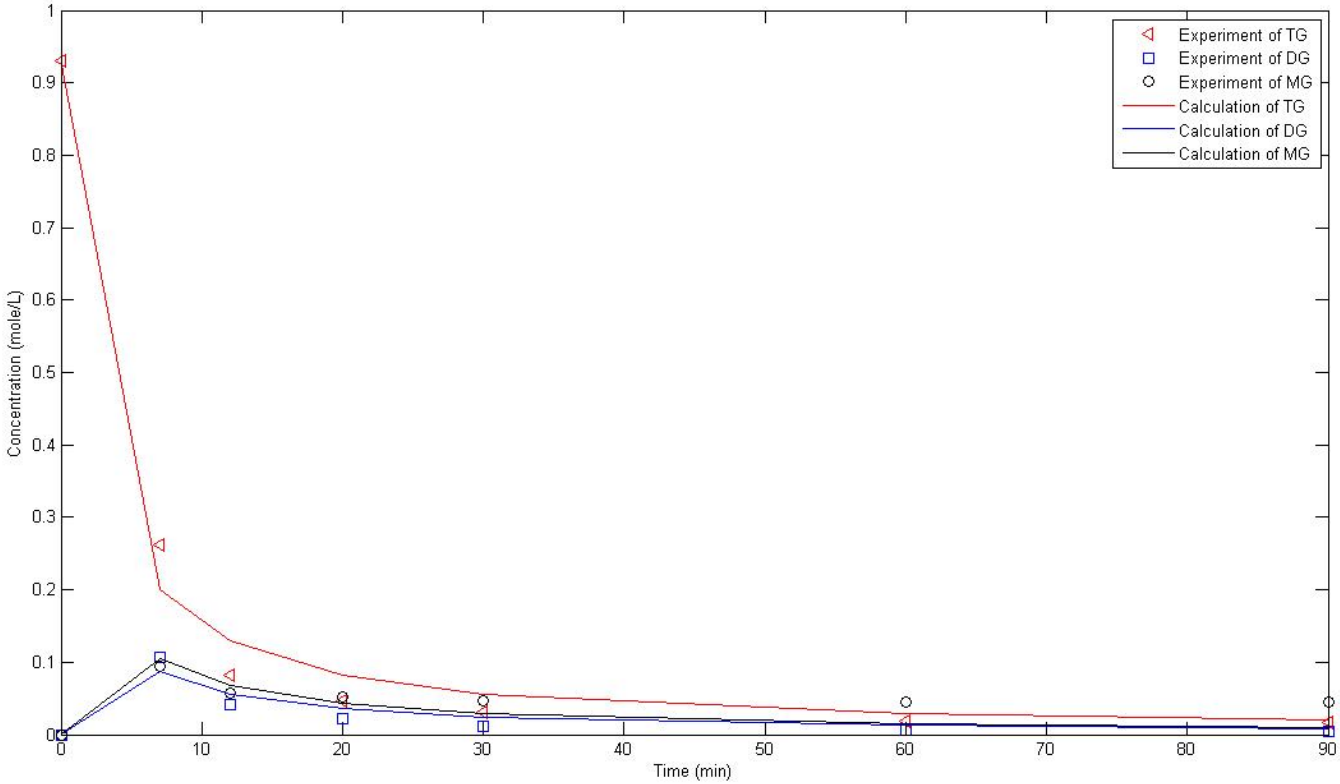
ภาพที่ 26 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้ แสดงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ที่เวลาต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 27 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ แสดงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ที่เวลาต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 28 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ แสดงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ที่เวลาต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 29 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ แสดงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ที่เวลาต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้

ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้ของไตรกลีเซอไรด์ (k_1) ไดกลีเซอไรด์ (k_2) และโมโนกลีเซอไรด์ (k_3) ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังตารางที่ 9 ผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมีผลให้ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา k_1 k_2และ k_3 เพิ่มสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ค่า k_1 มีค่าเท่ากับ 0.04596 0.12468 และ 0.18383 (นาที)$^{-1}$ ตามลำดับ ค่า k_2 มีค่าเท่ากับ 0.12959 0.3424 และ 0.59575 (นาที)$^{-1}$ ตามลำดับ และค่า k_3 มีค่าเท่ากับ 0.28326 0.54337 และ 0.73143 (นาที)$^{-1}$ ตามลำดับ โดย ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ค่า k_1 k_2และ k_3 มีค่ามากที่สุด

ตารางที่ 9 ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้ (k_1 k_2 และ k_3) ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส

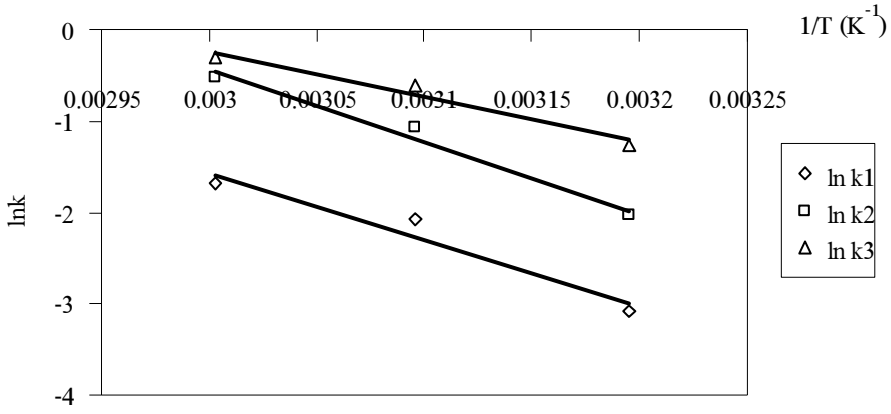
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (นาที)$^{-1}$		
	k_1	k_2	k_3
40	0.04596	0.12959	0.28326
50	0.12468	0.3424	0.54337
60	0.18383	0.59575	0.73143

ผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลองเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลายงานวิจัย ในปี2008 Doell *et al*; ในปี1997 Noureddini and Zhu; ในปี 2004 Cheng *et al*; ในปี2007 Narvaez *et al*; ในปี2006 Vicente *et al* ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาในทุกขั้นตอนของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นเพิ่มสูงขึ้น และในปี 2000 Darnoko and Cheryan ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันปาล์ม ใช้อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:6 ที่อุณหภูมิ 50 55 60 และ 65 องศาเซลเซียส พบว่าค่า k_1 k_2 และ k_3 เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นและที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ค่า k_1 k_2 และ k_3 มีค่ามากที่สุด จากผลของค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา k_1 k_2 และ k_3 แนวโน้มที่เกิดขึ้นพบว่า $k_3 > k_2 > k_1$ โดยค่า k_3 มีค่ามากที่สุด และ k_1 มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งขั้นตอนการเปลี่ยนแปลง $TG \rightarrow DG$ เป็นขั้นตอนที่ช้า

ที่สุดและเป็นขั้นกำหนดปฏิกิริยา ผลของแนวโน้มค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้สอดคล้องกับงานวิจัย ในปี 2000 Darnoko and Cheryan ได้รายงานแนวโน้มผลของค่า k_1 k_2 และ k_3 ที่เกิดขึ้นเป็น $k_3 > k_2 > k_1$ โดยค่า k_3 ในทุกสภาวะการทดลองมีค่ามากที่สุด

2.4 ผลของค่าพลังงานกระตุ้น

กราฟสมการเส้นตรง Arrhenius plot ระหว่างค่า lnk และ ค่าอุณหภูมิสมบูรณ์ 1/T (เคลวิน$^{-1}$) แสดงได้ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 Arrhenius plot ระหว่างค่า ln k กับ 1/[T] (เคลวิน)$^{-1}$

ผลของค่าพลังงานกระตุ้น แสดงได้ดังตารางที่ 10 ค่าพลังงานกระตุ้น(Ea) ในของขั้น $MG \rightarrow GL$ มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 41.23 กิโลจูล/โมล ส่วนค่า Ea ของขั้น $TG \rightarrow DG$ เท่ากับ 60.32 กิโลจูล/โมล และพบว่าค่า Ea ของขั้น $DG \rightarrow MG$ มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 66.26 กิโลจูล/โมล

อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่า k_1 ต่ำที่สุดแต่ค่า Ea ของขั้น $TG \rightarrow DG$ ก็มีค่าน้อยกว่าขั้นของ $DG \rightarrow MG$ อยู่ 5.94 กิโลจูล/โมล

ตารางที่ 10 ค่าพลังงานกระตุ้นของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์

ขั้นของปฏิกิริยา	ค่าพลังงานกระตุ้น Ea (กิโลจูล/โมล)
$TG \rightarrow DG$	60.32
$DG \rightarrow MG$	66.26
$MG \rightarrow GL$	41.23

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ผลกระทบของอุณหภูมิ และ อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ

1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าการเกิดปฏิกิริยา ที่ 12 นาทีแรกเกิดขึ้นสูง อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลให้การเกิดปฏิกิริยาและการสลายของไตรกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์เกิดขึ้นสูงตามไปด้วย โดยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส การเกิดปฏิกิริยาและการสลายของไตรกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์เกิดขึ้นสูงสุดและเกิดเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุด

1.2 ผลกระทบอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 1:9 และ 1:12 พบว่าเมื่ออัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเพิ่มสูงขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาและการสลายของไตรกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์เกิดขึ้นสูง โดยที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ที่เวลา 90 นาที เหลือไตรกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ต่ำที่สุด และเกิดเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุด

2. จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ

2.1 พบว่ากลไกทางจลนพลศาสตร์เป็นปฏิกิริยา 3 ขั้นตอนไม่เกิดการผันกลับอันดับหนึ่งแบบไม่แท้

2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา k_1 k_2และ k_3 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ค่า k_1 k_2และ k_3 เพิ่มสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ค่า k_1 k_2และ k_3 มากที่สุดเท่ากับ 0.18383 0.59575 และ0.73143 (นาที)$^{-1}$ ตามลำดับ

2.3 แนวโน้มของค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา k_1 k_2และ k_3 คือ $k_3 > k_2 > k_1$ โดยขั้นตอนการเปลี่ยน $TG \rightarrow DG$ เป็นขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุดและเป็นขั้นกำหนดปฏิกิริยา

2.6 ค่าพลังงานกระตุ้นในของขั้น $MG \rightarrow GL$ มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 41.23 กิโลจูล/โมล และค่าพลังงานกระตุ้นของขั้น $DG \rightarrow MG$ มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 66.26 กิโลจูล/โมล

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ในระบบถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous) เพื่อให้ได้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาที่ได้ไปคำนวณหาขนาดของถังปฏิกรณ์จริง และทำนายเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุลเพื่อปรับใช้ในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ต่อไป

2. ควรทำการฉีดวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์โดยตรงเพื่อหาค่าที่ถูกต้อง เนื่องจากผลของเมทิลเอสเทอร์จากการทดลองเป็นการหาค่าจากการดุลมวล จึงอาจทำให้ค่าที่ได้ผิดพลาดจากค่าที่ถูกต้องจริง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

จักรพันธ์ กังวาฬ. 2548. จากวิกฤตน้ำมันสู่พลังงานทางเลือก. **สารคดี**. 21 (249): 47-71.

นิรนาม. 2548. สบู่ดำกับน้ำมันดีเซล. **กสิกร**. 5 (78) : 22 ─ 33.

อวยพร เพชรหลายสี. 2548. สบู่ดำ: พืชพลังงานทดแทนในอนาคต. **วารสารเศรษฐกิจการเกษตร**. 51 (588): 4-7.

บริษัท พาราไซแอนติฟิค จำกัด. 2551. **ไขมันและน้ำมัน** แหล่งที่มา: www.google.com. June 7, 2008

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

Cheng, S. F., Y. M. Choo, A. N. Ma and C. H. Chuah. 2004. Kinetics study on transesterification of plam oil. **J. Oil Plam Res**. 16 (2): 19-29.

Chitra, P., P. Venkatachalam and A. Sampathrajan. 2005. Optimisation of experimental conditions for biodiesel production from alkali-catalysed transesterification of Jatropha curcus oil. **Energy Sustain. Dev**. 9:13 - 18.

Cordeiro, C.S., G.G.C. Arizaga, L.P. Ramos and F. Wypych. 2008. A new zinc hydroxide nitrate heterogeneous catalyst for the esterification of free fatty acids and the transesterification of vegetable oils. **Catal. Commun**. 9: 2140-2143.

Darnoko, D. and M. Cheryan. 2000. Kinetic of palm oil transesterification in a batch reactor. **J Am Oil Chem Soc**. 77:1263-1267.

Diasakou, M., A. Louloudi and N. Papayannakos. 1998. Kinetics of the Non- catalytic Transesterification of Soybean Oil . **Fuel**. 77 (12):1297-1302.

Doell, R., S.K. Konar and D.B.G. Boocock. 2008. Kinetic parameters of a homogeneous tranmethylation of soybean oil. **J Am Oil Chem Soc**. 85: 271-276.

Encicar, J.M., J.F. Gonzalez and A. Rodriguez-Reinares. 2007. Ethanolysis of used frying oil. Biodiesel preparation and characterization. **Fuel.** 88: 513-522.

He, H., H. Sun, T. Wang and S. Zhu. 2007. Transesterification Kinetics of Soybean Oil for Production of Biodiesel in Supercritical Methanol. **J Am Oil Chem Soc**. 84: 399-404.

Fangrui, M. and A. H. Milford. 1999. Biodiesel production: a review. **Biores. Technol**. 70 :1-15.

Freedman, B., R.O. Butterfield and E.H. Pryde. 1986. Transesterification kinetics of soybean oil. **J Am Oil Chem Soc**. 63:1385-1370.

Fukuda, H., A. Kondo and H. Noda. 2001. Biodiesel fuel production by Transesterification of oils. **Biosci. Bioeng**. 92: 405 – 416.

Jitputti, J., B. Kitiyanan, P. Rangsunvigit, K. Bunyakiat, L. Attanatho and P. Jenvanitpanjakul. 2005**.** Transesterification of crude plam kernel oil and crude coconut oil by different solid catalysts. **Chem. Eng**. 116: 61-66.

Joelianingsih., M., Hitoshi, H. Shoji, N. Hiroshi, S. Yasuyuki, H.S. Tatang, H.T. Armansyah and A. Kamaruddin. 2007. Biodiesel fuels from palm oil via the non-catalytic transesterification in a bubble column reactor at atmospheric pressure: A kinetic study. **Renew. Energy**. (Unpublished manuscript)

Kandpal, J.B. and M. Madan. 1995. Jatropha curcus: are renewable source of energy for meeting future energy needs. **Renew. Energy**. 6 (2): 159-160.

Keim, G.I. 1945. Process for treatment of fatty glyceride. **US Patent**. 2: 383-601.

Khan, A.K. 2002. **Research into Biodiesel Kinetics & Catalyst Development**. Available Source: http://www.cheque.uq.edu.au/ugrad/chee4001/CHEE400102/Adam_Khan_Thesis.pdf., January 4, 2008.

Korbitz, W. 2001. **In world fuel ethanol congress**. (Beijing, China).

Krawczyk, T. 1996. Biodiesel-Alternative fuel makes inroads but hurdles remain. **INFORM.** 7: 801-829.

Kusdiana, D. and S. Saka. 2000. Kinetic of transesterification of rapseed oil to biodiesel fuel as treated in supercritical methanol. **Fuel**. 80: 693-698.

Kyu W.L., J.X. Yu, J.H. Mei, L. Yam, Y.W. Kim. and K.W. Chung. 2007. A Kinetic Study on Transesterification of Glyceryl Monooleate and Soybean Used Frying Oil to Biodiesel. **J. Ind. Eng. Chem.** 13: 799-807.

Laurila, K. and M. Bohlen. 2007. **Biopolymer as protection during transport of construction material**. Available Source :http://dspace.bib.hb.se:8080/dspace/bitstream/dspace/ bitstream/2320/2805/1/BohlenLaurilaKandUppsats.pdf., January 20, 2008.

Leevijit, T., W. Wisutmethangoon, G. Prateepchaikul, C. Tongurai. and A. Michael. 2004. A Second Order Kinetics of Plam Oil Transesterification. The Joint International Conference on "***Sustainable Energy and Environment*** (*SEE*)". 277-281.

Levenspiel, O. 1999. **Chemical reaction engineering** 3rd ed. Chemical reaction engineering Department. Oregon state university. John Wiley & Sons. New York.

Marchetti, J.M., V.U. Miguel. and A.F. Errazu. 2007. Possible methods for biodiesel production. **Renew. Sustain. Energy Rev**. 11: 1300-1311.

Meher, L.C., V.S. Dharmagadda. and S.N. Naik. 2005. Optimization of alkali – catalyzed transesterification of Pongamia pinnata oil for production of biodiesel. **Biores. Technol**. 97: 1392-1397.

Narvaez, P.C., S.M. Ricon. and F.J. Sanchez. 2007. Kinetics of palm oil methanolysis. **J Am Oil Chem Soc**. 84: 971-977.

Noureddini, H. and D. Zhu. 1997. Kinetic of transesterification of soybean oil. **J Am Oil Chem Soc**. 74: 457-1463.

Pryde, E.H. 1983. Vegetable oil as diesel fuel: Overview. **J Am Oil Chem Soc**. 60:1557-1558.

Ratan, J. The cultivation of Jatropha curcas. **Indian Biofuels Awareness Centre**. Available Source: www.svlele.om/jatropha_plant.htm., May 20, 2007.

Sarin, R., M. Sharma, S. Sinharay. and R.K. Malhotra. 2006. Jatropha-Palm biodiesel blends: An optimum mix for Asia. **Fuel**. 86: 1355-1371.

Schwab, A.W., M.O. Bagby. and B. Freedman. 1987. Preparation and properties of diesel fuels from vegetable oils. **Fuel**. 66: 1372-1378.

Shirasawa, S., A. Sasaki, Y. Saida. and C. Satoh. 2007. A Rapid method for *trans*-Fatty Acid Determination Using a Single apillary GC. **J. Oleo Sci**. 56 (2): 53-58.

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

Srivastara, A. and R. Prasad. 2000. Triglycerides-based diesel fuels. **Renew. Sustain. Energy Rev**. 4: 111-133.

Stamenkovic, O.S., M.L. Lazic, Z.B. Todolovic, V.B. Veljkoviv. and D.U. Skala. 2008. Kinetic of sunflower oil methanolysis at low temperatures. **Biores. Technol**. 99:1131-1140.

Varese, R. and M. Varese. 1996. Methyl ester biodiesel: opportunity or necessity. **J Am Oil Chem Soc**. 7: 816-824.

Vicente, G., M. Martinez. and J. Aracil. 2006. kinetics of *Brassica carinata* oil methanolysis. **Energy Fuels** . 20:1722-1726.

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

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณหาอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล

การคำนวณหาอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นมีวิธีการดังนี้

กำหนด:

มวลโมเลกุลของน้ำมันสบู่ดำ = 900 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของเมทานอล = 32 กรัมต่อโมล

สมมติ:

ในการทดลองกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น กำหนดใช้อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 โดยใช้น้ำมันเริ่มต้นปริมาณ 100 กรัม

การคำนวณ:

เมทานอล 7 โมล มีน้ำหนัก = $7 \times 32 = 224$ กรัม

น้ำมันสบู่ดำ 1 โมล มีน้ำหนัก = $1 \times 900 = 900$ กรัม

ถ้าใช้น้ำมันสบู่ดำปริมาณ 900 กรัม จะต้องใช้เมทานอลปริมาณ 224 กรัม

ดังนั้นถ้าใช้สบู่ดำปริมาณ 100 กรัม จะต้องใช้เมทานอลปริมาณ $= \frac{100 \times 224}{900} = 24.89$ กรัม

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาค่าความเป็นกรด (Acid Value)

การคำนวณหาค่าความเป็นกรดของน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้นสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ

$$AV = \frac{56.1 \times N \times V}{m}$$

โดย

AV = ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมน้ำมัน)

N = ค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มัล)

V = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ (มิลลิลิตร)

m = น้ำหนักน้ำมันตัวอย่างหรือ ไบโอดีเซล (กรัม)

ตัวอย่างคำนวณหาค่าความเป็นกรดของน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้น

ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เท่ากับ 0.85 มิลลิลิตร

น้ำหนักน้ำมันสบู่ดำ 2 กรัม

ดังนั้นค่าความเป็นกรดของน้ำมันสบู่ดำ เท่ากับ

$$\frac{56.1 \times 0.1 \times 0.85}{2} = 2.38 \text{ มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมน้ำมัน}$$

ภาคผนวก ค

การสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อสอบเทียบ (Calibration curve standard) ของโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์และกลีเซอรอล (วิธีมาตรฐาน EN 14105)

เตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับสอบเทียบ (Calibration standard) ตามตารางผนวกที่ ค1 ละลายด้วยสารละลายไพริดีน

ตารางผนวกที่ ค1 สารมาตรฐาน

สารมาตรฐาน	ความเข้มข้นของสารมาตรฐาน (มิลลิกรัม/มิลลิลิตรไพริดีน)
กลีเซอรอล	3
โมโนโอเลอิน	5
ไดโอเลอิน	5
ไตรโอเลอิน	20
ไตรคาพริน (Tricaprin C10:0, Internal standard)	8

เตรียมสารละลายมาตรฐาน ตามตารางผนวกที่ ค2 จากนั้นเติมสาร MSTFA ปิดฝาขวดและเขย่าอย่างรุนแรง วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเติมสารละลายเฮปเทน ปริมาตร 8 มิลลิลิตร แล้วนำสารละลายที่ได้ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ไปฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่องเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางผนวกที่ ค2 ปริมาณการเตรียมสารละลายมาตรฐาน

Std. Solution number	กลีเซอรอล (μl)	โมโนโอเลอิน (μl)	ไดโอเลอิน (μl)	ไตรโอเลอิน (μl)	ไตรคาพริน (μl)	MSTFA (μl)
1	10	10	70	40	100	100
2	30	50	160	130	100	150
3	70	110	240	220	100	250
4	110	180	320	320	100	350
5	150	240	400	440	100	450
6	-	310	480	580	100	500

ผลการวิเคราะห์

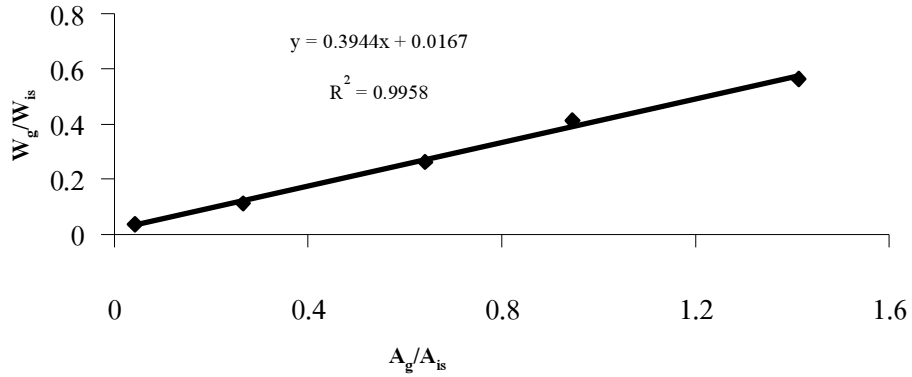
ในการวิเคราะห์ต้องสร้างกราฟมาตรฐานของสารมาตรฐานกลีเซอรอล โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ เพื่อหาความชันและจุดตัดแกน ซึ่งจะใช้ในการคำนวณหาปริมาณกลีเซอรอล โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ ได้ผลเป็นดังนี้

กลีเซอรอล

ผลจากโครมาโทแกรม แสดงพื้นที่พีคของกลีเซอรอล (GL) ที่แต่ละความเข้มข้น เทียบกับพื้นที่พีคของ Internal standard แสดงได้ดังตารางผนวกที่ ค3

ตารางผนวกที่ ค3 พื้นที่พีคของกลีเซอรอลและพื้นที่พีคของ Internal standard

พื้นที่พีคกลีเซอรอล	พื้นที่พีค Internal std.	A_g/A_{IS} (X)	W_g/W_{IS} (Y)
15030.2	353306.3	0.042	0.0375
93413.3	351431.1	0.2658	0.1125
212094.1	330311.2	0.6421	0.2625
299344.1	316428.3	0.946	0.4125
432153.3	305992.9	1.4123	0.5635



ภาพผนวกที่ ค1 กราฟมาตรฐานของกลีเซอรอล

จากกราฟมาตรฐาน ได้ค่าความชัน (a_g) เท่ากับ 0.3944 และจุดตัดแกน y (b_g) เท่ากับ 0.0167 เมื่อ

A_g พื้นที่พีคของกลีเซอรอล

A_{IS} พื้นที่พีคของ Internal standard

W_{IS} น้ำหนักของ Internal standard ในหน่วยมิลลิกรัม

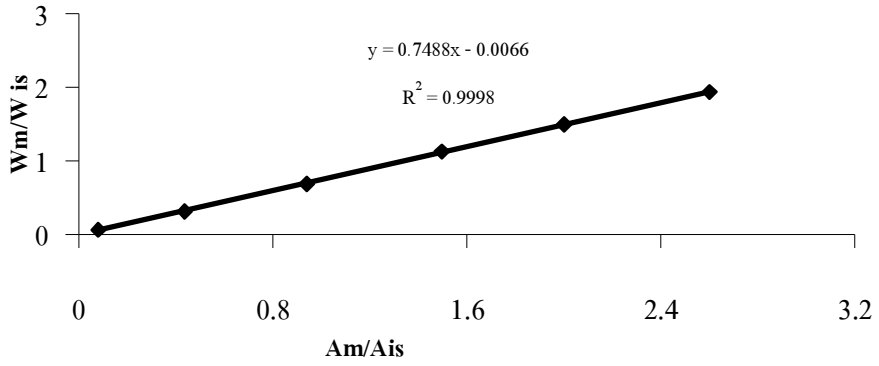
W_g น้ำหนักของกลีเซอรอล ในหน่วยมิลลิกรัม

โมโนกลีเซอไรด์

ผลจากโครมาโทแกรม แสดงพื้นที่พีคของโมโนโอเลอินที่แต่ละความเข้มข้น เทียบกับพื้นที่พีคของ Internal standard แสดงได้ดังตารางผนวกที่ ค4

ตารางผนวกที่ ค4 พื้นที่พีคของโมโนโอเลอินและพื้นที่พีคของ Internal standard

พื้นที่พีคโมโนโอเลอิน	พื้นที่พีค Internal std.	A_m/A_{IS} (X)	W_m/W_{IS} (Y)
28819.3	353306.3	0.08157	0.0625
153769.8	351431.1	0.4376	0.3125
310818.3	330311.2	0.941	0.6875
474150.5	316428.3	1.4984	1.125
612097.4	305992.9	2.0003	1.5
773936.3	297363.3	2.6027	1.935



ภาพผนวกที่ ค2 กราฟมาตรฐานของโมโนกลีเซอไรด์

จากกราฟมาตรฐาน ได้ค่าความชัน (a_m) เท่ากับ 0.7488 และจุดตัดแกน y (b_m) เท่ากับ-0.0066

นำค่า a_m และ b_m จากกราฟมาตรฐานของโมโนกลีเซอไรด์ ไปคำนวณหาปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ในภาคผนวก ง

เมื่อ

A_m พื้นที่พีคของโมโนโอเลอิน

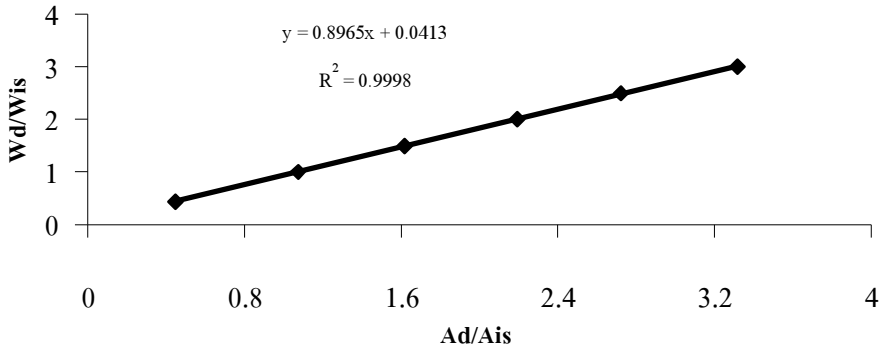
W_m น้ำหนักของโมโนโอเลอิน ในหน่วยมิลลิกรัม

ไดกลีเซอไรด์

ผลจากโครมาโทแกรม แสดงพื้นที่พีคของไดโอเลอินที่แต่ละความเข้มข้น เทียบกับพื้นที่พีคของ Internal standard แสดงได้ดังตารางผนวกที่ ค5

ตารางผนวกที่ ค5 พื้นที่พีคของไดโอเลอินและพื้นที่พีคของ Internal standard

พื้นที่พีคไดโอเลอิน	พื้นที่พีค Internal std.	A_d/A_{IS} (X)	W_d/W_{IS} (Y)
157774.1	353306.3	0.4466	0.4375
376984.6	351431.1	1.0727	1
534410.7	330311.2	1.6179	1.5
693762	316428.3	2.1925	2
832155.1	305992.9	2.7195	2.5
986341.6	297363.3	3.3169	3



ภาพผนวกที่ ค3 กราฟมาตรฐานของไดกลีเซอไรด์

จาก กราฟมาตรฐาน ได้ค่าความชัน (a_d) เท่ากับ 0.8965 และจุดตัดแกน y (b_d) เท่ากับ 0.0413

นำค่า a_d และ b_d จากกราฟมาตรฐานของไดกลีเซอไรด์ ไปคำนวณหาปริมาณไดกลีเซอไรด์ใน ภาคผนวก ง

เมื่อ

A_d พื้นที่พีคของไดโอเลอิน

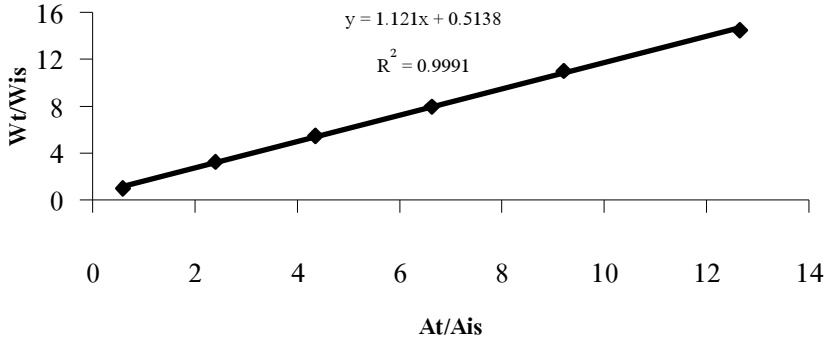
W_d น้ำหนักของไดโอเลอิน ในหน่วยมิลลิกรัม

ไตรกลีเซอไรด์

ผลจากโครมาโทแกรม แสดงพื้นที่พีคของไตรโอเลอินที่แต่ละความเข้มข้น เทียบกับพื้นที่พีคของ Internal standard แสดงได้ดังตารางผนวกที่ ค6

ตารางผนวกที่ ค6 พื้นที่พีคของไตรโอเลอินและพื้นที่พีคของ Internal standard

พื้นที่พีคไตรโอเลอิน	พื้นที่พีค Internal std.	A_d/A_{IS} (X)	W_d/W_{IS} (Y)
210649.9	353306.3	0.5962	1
844165.8	351431.1	2.4021	3.25
1440060.5	330311.2	4.3597	5.5
2096918.3	316428.3	6.6268	8
2815697.9	305992.9	9.2018	11
3759776.3	297363.3	12.6437	14.5



ภาพผนวกที่ ค4 กราฟมาตรฐานของไตรกลีเซอไรด์

จาก กราฟมาตรฐาน ได้ค่าความชัน (a_t) เท่ากับ 1.121 และจุดตัดแกน y (b_t) เท่ากับ 0.5183

นำค่า a_t และ b_t จากกราฟมาตรฐานของไตรกลีเซอไรด์ ไปคำนวณหาปริมาณไตรกลีเซอไรด์ในภาคผนวก ง

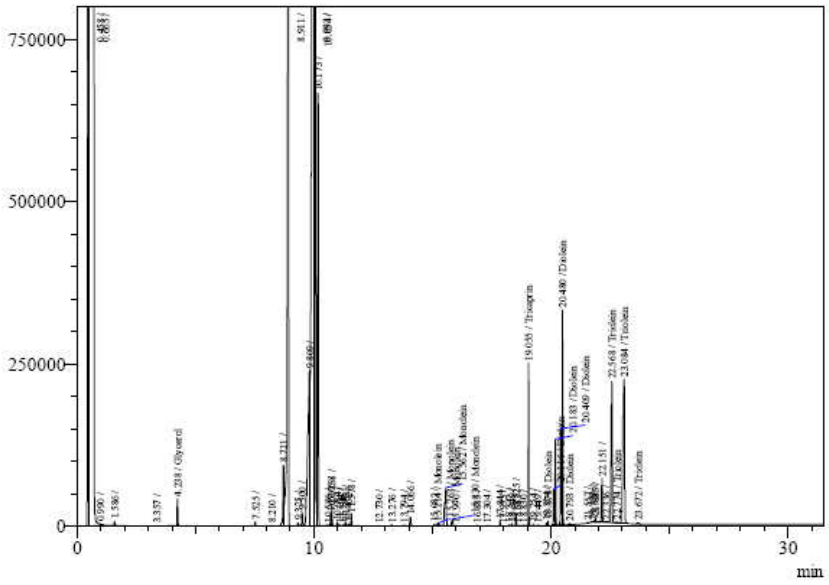
เมื่อ

A_t พื้นที่พีคของไตรโอเลอิน

W_t น้ำหนักของไตรโอเลอิน ในหน่วยมิลลิกรัม

ภาคผนวก ง

การคำนวณหาปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ ในน้ำมันชั้นบน



Peak No.	Ret. Time	Area	Height	Compound Name
1	0.458	1733494.1	896813.2	
2	0.665	3898685757	538253122	
3	0.99	1486.4	955.3	
4	1.586	8558.2	5926.4	
5	3.357	1442.4	832.6	
6	4.238	70447.6	40217.9	
7	7.525	11650.3	6418.8	
8	8.21	2322.1	1322.7	
9	8.711	240265.7	93585.2	
10	8.911	3358797.2	1118293.8	
11	9.325	11601.5	4707.1	
12	9.5	47648.4	20295	
13	9.809	1452540	237567.4	
14	9.993	10660060.9	1890347.1	
15	10.054	7397473	2403531.6	
16	10.173	1461734.7	655406.6	
17	10.586	4419.5	1304.5	
18	10.706	39986.6	18941.2	
19	10.758	63033.7	30600.8	
20	10.984	11877.6	5504.8	
21	11.104	6211.4	1645.8	
22	11.246	3961.2	1820	

Peak No.	Ret. Time	Area	Height	Compound Name
23	11.333	15978.7	6224	
24	11.462	6731.9	2067.2	
25	11.578	35903.7	16280.5	
26	12.73	2757.5	1013.6	
27	13.276	6021.6	2148.5	
28	13.794	2987.9	1258.2	
29	14.066	39175.2	14090.8	Monoglyceride
30	15.082	7391.2	2514.7	Monoglyceride
31	15.214	8923.3	3155.7	Monoglyceride
32	15.263	12390.7	4519.9	Monoglyceride
33	15.562	265092.5	58455.2	Monoglyceride
34	15.83	38037.4	10957.3	Monoglyceride
35	15.99	2196.7	809.4	
36	16.885	4576.2	1642.3	
37	17.304	1707	821.5	
38	17.844	14655.6	8176.6	
39	17.955	2028.7	1032.8	
40	18.242	2871.7	1719.4	
41	18.349	5744.8	3449	
42	18.525	29875.6	18600.7	
43	18.583	1750.5	1005.1	
44	18.83	1398.6	981.5	
45	19.055	355640.7	238937.9	Tricaprin (ISTD)
46	19.254	3510.6	2210.6	
47	19.449	1579	1037.6	
48	19.814	6635.5	4114.8	
49	19.878	11055.8	6793.4	
50	20.116	85399.8	54820.4	Diglyceride
51	20.183	194092.2	130522.3	Diglyceride
52	20.409	252757.6	144522.1	Diglyceride
53	20.48	588594.2	326776.7	Diglyceride
54	20.793	3832.4	2200.1	
55	21.557	1153.6	835.7	
66	21.733	3272.8	923.3	
57	21.82	5801	2601.5	
58	21.885	12183.8	5886.2	Triglyceride
59	22.151	140999.6	67510.1	Triglyceride
60	22.336	2544.6	925.1	Triglyceride
61	22.568	725427.9	216768.3	Triglyceride
62	22.774	5804.4	1705.9	Triglyceride
63	23.084	1186950.3	221904.6	Triglyceride
64	23.672	10023.8	1984.3	Triglyceride

ภาพผนวกที่ ง1 ตัวอย่างโครมาโทแกรม แสดงค่า Area และค่า Retention time (RT) ของโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ ในน้ำมันชั้นบนที่เวลา 7 นาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7

ตัวอย่างในการคำนวณ:

การวิเคราะห์นี้ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง เท่ากับ 25.6 มิลลิกรัมและความเข้มข้นของ Internal standard เท่ากับ 8.0 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร นำไปคำนวณได้ผลดังนี้

โมโนกลีเซอไรด์คำนวณตามสูตรที่ ง1

$G_M = (a_m \times A_m/A_{IS} + b_m) \times W_{IS} \times 100/W$ (ง1)

เมื่อ

G_M เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโมโนกลีเซอไรด์ในสารตัวอย่าง

A_m พื้นที่พีคของโมโนกลีเซอไรด์ เท่ากับ 371010

A_{IS} พื้นที่พีคของ Internal standard เท่ากับ 355641

W_{IS} น้ำหนักของ Internal standard ในหน่วยมิลลิกรัม

W น้ำหนักของสารตัวอย่าง ในหน่วยมิลลิกรัม

a_m คือ ความชัน และ b_m คือจุดตัดแกน y (จากกราฟมาตรฐานของโมโนกลีเซอไรด์)

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโมโนกลีเซอไรด์ $= (a_m \times A_m/A_{IS} + b_m) \times W_{IS} \times 100/W$

$= (0.7488\times(371010/355641)+(-0.0066)) \times 0.8\times 100/25.6$

= 2.42 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ไดกลีเซอไรด์คำนวณตามสูตรที่ ง2

$G_D = (a_d \times A_d/A_{IS} + b_d) \times W_{IS} \times 100/W$ (ง2)

เมื่อ

G_D เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไดกลีเซอไรด์ในสารตัวอย่าง

A_d พื้นที่พีคของไดกลีเซอไรด์ เท่ากับ 1120844

A_{IS} พื้นที่พีคของ Internal standard เท่ากับ 355641

W_{IS} น้ำหนักของ Internal standard ในหน่วยมิลลิกรัม

W น้ำหนักของสารตัวอย่าง ในหน่วยมิลลิกรัม

a_d คือ ความชัน และ b_d คือจุดตัดแกน y (จากกราฟมาตรฐานของไดกลีเซอไรด์)

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไดกลีเซอไรด์ = $(a_d \times A_d/A_{IS} + b_d) \times W_{IS} \times 100/W$

$= (0.8956 \times (1120844/355641) + 0.0413)) \times 0.8 \times 100/25.6$

= 8.96 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ไตรกลีเซอไรด์คำนวณตามสูตรที่ ง3

$$G_T = (a_t \times A_t/A_{IS} + b_t) \times W_{IS} \times 100/W \qquad (ง3)$$

เมื่อ

G_T เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ในสารตัวอย่าง

A_t พื้นที่พีคของไตรกลีเซอไรด์ เท่ากับ 2083934

A_{IS} พื้นที่พีคของ Internal standard เท่ากับ 355641

W_{IS} น้ำหนักของ Internal standard ในหน่วยมิลลิกรัม

W น้ำหนักของสารตัวอย่าง ในหน่วยมิลลิกรัม

a_t คือ ความชัน และ b_t คือจุดตัดแกน y (จากกราฟมาตรฐานของไตรกลีเซอไรด์)

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ = $(a_t \times A_t/A_{IS} + b_t) \times W_{IS} \times 100/W$

$= (1.121 \times (2083934/355641) + 0.5138)) \times 0.8 \times 100/25.6$

= 22.13 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ (FAME) ใช้หลักการของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ คิดรวมกันเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ในตัวอย่างนี้คำนวณตามสูตรที่ ง4

$$\%FAME = 100-[\%\ TG+\%\ DG+\ \%\ MG] \qquad (ง4)$$

เมื่อ % FAME และ % TG คือเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์และไตรกลีเซอไรด์ ตามลำดับ

% DG และ % MG คือเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์ ตามลำดับ

ตัวอย่างนี้มีปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ

= 100-(2.42+8.96+22.13) = 66.49 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางผนวกที่ ง1 ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก			
		TG	DG	MG	FAME
	12	25.48	10.11	2.2	62.21
	20	21.2	7.34	1.41	70.05
	30	17.4	5.38	1.21	76.01
	60	12.63	3.16	1.03	83.18
40	90	9.83	2.2	0.96	87.01
	7	21.65	8.92	2.53	66.9
	12	18.56	6.55	1.67	73.22
	20	14.94	4.55	1.37	79.14
	30	12.12	3.26	1.27	83.35
	60	7.75	1.72	1.14	89.39
50	90	5.62	1.18	1.12	92.08
	7	19.62	7.41	2.05	70.85
	12	14.94	4.39	1.45	79.22
	20	11.92	3.35	1.4	83.33
	30	10.28	2.62	1.39	85.71
	60	6.74	1.48	1.43	90.29
60	90	5.49	1.22	1.32	91.97

ตารางผนวกที่ ง2 ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก			
		TG	DG	MG	FAME
	12	25.54	9.21	2.09	63.16
	20	21.66	7.45	1.42	69.47
	30	18.65	4.92	1.17	75.26
	60	13.33	2.92	0.87	82.88
40	90	10.34	1.95	0.82	86.89
	7	22.13	8.96	2.42	66.49
	12	18.08	6.28	1.64	74
	20	14.13	4.23	1.32	80.32
	30	11.33	2.99	1.2	84.48
	60	7.04	1.55	1.08	90.33
50	90	5.0	1.04	1.13	92.83
	7	19.68	7.63	2.57	70.13
	12	15.37	5.11	1.83	77.68
	20	11.47	3.33	1.6	83.60
	30	9.62	2.55	1.59	86.24
	60	6.66	1.51	1.60	90.1
60	90	5.1	1.20	1.50	92.19

ตารางผนวกที่ ง3 ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก			
		TG	DG	MG	FAME
	12	25.79	9.43	2.02	62.76
	20	21.40	7.48	1.42	69.70
	30	19.45	5.14	1.22	74.19
	60	13.67	3.03	0.89	82.41
40	90	10.46	2.0	0.83	86.70
	7	21.75	8.94	2.44	66.88
	12	18.30	6.39	1.67	73.64
	20	14.9	4.54	1.32	79.24
	30	12.02	3.24	1.27	83.48
	60	7.77	1.70	1.15	89.37
50	90	5.39	1.15	1.14	92.32
	7	18.64	6.95	1.92	72.5
	12	15.05	4.41	1.45	79.08
	20	11.83	3.24	1.38	83.56
	30	10.13	2.58	1.37	85.93
	60	6.67	1.46	1.21	90.65
60	90	5.43	1.2	1.31	92.06

ตารางผนวกที่ ง4 ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:9 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก			
		TG	DG	MG	FAME
	12	45	14.52	3.65	36.83
	20	26.39	8.89	2.35	62.37
	30	21.98	6.32	1.64	70.06
	60	14.2	3.78	1.37	80.65
40	90	10.1	2.54	1.32	86.04
	7	31.18	11.66	4.06	53.1
	12	24.02	8.55	2.95	64.48
	20	16.7	5.42	2.17	75.71
	30	12.07	3.57	1.74	82.62
	60	7.18	1.95	1.61	89.26
50	90	4.78	1.25	1.48	92.49
	7	19.17	6.83	3.51	70.49
	12	13.37	4.11	2.49	80.03
	20	9.35	2.56	2.06	86.03
	30	6.92	1.82	2.06	89.2
	60	4.27	1.0	2.04	92.69
60	90	3.2	0.74	2.06	94

ตารางผนวกที่ ง5 ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:9 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก			
		TG	DG	MG	FAME
	12	54.15	14.69	3.79	27.37
	20	29.52	10.09	2.5	57.89
	30	24.59	7.46	1.87	66.08
	60	16.93	4.11	1.38	77.58
40	90	12.07	2.86	1.32	83.75
	7	44.96	15.91	5.9	33.23
	12	26.17	9.43	3.32	61.08
	20	19.84	6.5	2.23	71.43
	30	16.33	4.91	1.95	76.81
	60	10.1	2.66	1.7	85.54
50	90	7.44	1.9	1.46	89.2
	7	16.78	7.71	3.19	72.32
	12	11.84	5.08	2.55	80.53
	20	7.92	3.26	1.87	86.95
	30	5.94	2.30	1.77	89.99
	60	4.04	1.51	1.97	92.48
60	90	2.82	1.06	1.57	94.54

ตารางผนวกที่ ง6 ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:9 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก			
		TG	DG	MG	FAME
	12	42.42	14.11	3.42	40.05
	20	26.93	9.03	2.36	61.68
	30	21.76	6.25	1.62	70.36
	60	14.08	3.75	1.35	80.82
40	90	10.20	2.57	1.35	85.87
	7	31.4	11.57	3.91	53.12
	12	24.06	8.45	2.94	64.54
	20	16.96	5.45	2.19	75.39
	30	12.3	3.7	1.76	82.24
	60	7.11	1.94	1.61	89.35
50	90	4.9	1.27	1.52	92.31
	7	19.0	6.75	3.45	70.81
	12	13.37	4.02	2.47	80.14
	20	9.43	2.57	2.05	85.95
	30	6.92	1.81	2.08	89.19
	60	4.31	1.01	2.09	92.59
60	90	3.18	0.73	2.0	94.09

ตารางผนวกที่ ง7 ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก			
		TG	DG	MG	FAME
	12	59.91	16.54	4.07	19.48
	20	37.98	10.79	3.0	48.23
	30	26.23	7.2	2.16	64.41
	60	13.95	3.6	1.73	80.72
40	90	8.44	2.08	1.48	88
	7	44.97	13.23	4.2	37.6
	12	15.75	5.76	2.52	75.97
	20	9.74	3.17	1.85	85.24
	30	6.71	1.95	1.82	89.52
	60	2.67	0.59	1.61	95.13
50	90	1.92	0.35	1.57	96.16
	7	28.14	7.95	4.02	59.89
	12	9.0	3.11	2.4	85.49
	20	5.34	1.69	2.22	90.75
	30	3.34	0.88	1.95	93.83
	60	2.06	0.42	1.89	95.63
60	90	1.76	0.33	1.88	96.03

ตารางผนวกที่ ง8 ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก			
		TG	DG	MG	FAME
	12	55.78	16.07	4.12	24.03
	20	37.22	10.67	3.08	49.03
	30	24.77	6.94	2.12	66.17
	60	12.25	3.14	1.56	83.05
40	90	6.8	1.62	1.43	90.15
	7	40.84	13.69	4.86	40.61
	12	21.73	6.99	2.87	68.41
	20	11.89	3.51	1.96	82.64
	30	7.11	1.98	1.76	89.15
	60	2.95	0.65	1.63	94.77
50	90	2.08	0.39	1.62	95.91
	7	27.23	6.88	3.57	62.32
	12	8.49	2.79	2.42	86.3
	20	4.7	1.36	2.05	91.89
	30	2.99	0.75	1.93	94.33
	60	1.91	0.36	1.92	95.81
60	90	1.8	0.32	1.92	95.96

ตารางผนวกที่ ง9 ค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก			
		TG	DG	MG	FAME
	12	55.99	15.84	4.07	24.1
	20	36.76	10.61	3.07	49.56
	30	24.86	6.98	2.07	66.1
	60	12.18	3.09	1.54	83.19
40	90	6.82	1.62	1.43	90.14
	7	40.79	13.61 2	4.87	40.73
	12	21.92	6.98	2.86	68.24
	20	11.85	3.46	1.95	82.74
	30	7.15	1.97	1.76	89.12
	60	2.95	0.64	1.59	94.81
50	90	2.08	0.38	1.57	95.97
	7	28.88	8.17	4.09	58.86
	12	8.99	3.12	2.4	85.49
	20	5.26	1.69 8	2.24	90.81
	30	3.34	0.88	1.95	93.83
	60	2.08	0.42	1.82	95.67
60	90	1.77	0.33	1.84	96.06

ภาคผนวก จ

การคำนวณหาน้ำหนักสารในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์ และกลีเซอรอล

ตัวอย่างการคำนวณหาน้ำหนักสารในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์ และกลีเซอรอล ที่เกิดขึ้นในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ดังนี้

กำหนด:

มวลโมเลกุลเฉลี่ยของไตรกลีเซอไรด์ = 923 กรัม/โมล
มวลโมเลกุลเฉลี่ยของไดกลีเซอไรด์ = 622 กรัม/โมล
มวลโมเลกุลเฉลี่ยของโมโนกลีเซอไรด์ = 357 กรัม/โมล
มวลโมเลกุลเฉลี่ยของเมทิลเอสเทอร์ = 296.5 กรัม/โมล

หมายเหตุ: ค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ยของสารดังกล่าว เป็นการคิดจากค่ามวลโมเลกุลของกรดไขมันชนิด C 18:1 เท่ากับ 282.5 กรัม/โมล (Shirasawa et al., 2007) ที่พบว่าเป็นองค์ประกอบที่มากที่สุดในน้ำมันสบู่ดำ

การคำนวณหาปริมาณสารในหน่วย (โมล/ลิตร) ตามสูตรผนวกที่ จ1

$$\text{ปริมาณสารในหน่วย (โมล/ลิตร)} = \frac{M_m \times \%W_t}{MW \times V_m} \qquad \text{(จ1)}$$

เมื่อ M_m คือ น้ำหนักทั้งหมดของสารผสม (กรัม)
$\%W_t$ คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสาร
MW คือ มวลโมเลกุลเฉลี่ยของสาร (กรัม/โมล)
V_m คือ ปริมาตรทั้งหมดของสารผสม (ลิตร)

การคำนวณ:

ณ เวลาที่ 7 นาที ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 ปริมาตรของสารผสมเท่ากับ 0.1435 ลิตรและมีมวลรวมเท่ากับ 124.9 กรัม

มีไตรกลีเซอไรด์เท่ากับ 22.13 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

มีไดกลีเซอไรด์เท่ากับ 8.96 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

มีโมโนกลีเซอไรด์เท่ากับ 2.42 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

มีเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 66.49 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

$$\text{ไตรกลีเซอไรด์} = \frac{124.9 \times 0.2213}{0.1435 \times 923} = 0.21 \quad \text{โมล/ลิตร}$$

$$\text{ไดกลีเซอไรด์} = \frac{124.9 \times 0.0896}{0.1435 \times 622} = 0.125 \quad \text{โมล/ลิตร}$$

$$\text{โมโนกลีเซอไรด์} = \frac{124.9 \times 0.0242}{0.1435 \times 357} = 0.059 \quad \text{โมล/ลิตร}$$

$$\text{เมทิลเอสเทอร์} = \frac{124.9 \times 0.6649}{0.1435 \times 296.5} = 1.95 \quad \text{โมล/ลิตร}$$

ในส่วนการหาปริมาณกลีเซอรอล คำนวณหาโดยการดุลมวล คือเมื่อเกิดเมทิลเอสเทอร์ 3 โมล จะเกิดกลีเซอรอล 1 โมล ตามทฤษฎีปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันกับเอกอฮอล์

ฉนั้น มีปริมาณกลีเซอรอล = จำนวนโมลของเมทิลเอสเทอร์/3

ตัวอย่างนี้มีกลีเซอรอล = 1.95/3 = 0.65 โมล/ลิตร

การคำนวณในกรณีที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:9 ปริมาตรของสารผสมจะเท่ากับ 0.153 ลิตร และมีมวลรวมเท่ากับ 133 กรัม และที่อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 ปริมาตรของสารผสมจะเท่ากับ 0.166 ลิตร และมีมวลรวมเท่ากับ 142.67 กรัม

ตารางผนวกที่ จ1 ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบของสาร (โมล/ลิตร)				
		TG	DG	MG	FAME	GL
	12	0.240888	0.1415	0.053648	1.826546	0.60884882
	20	0.204292	0.102731	0.034383	2.056737	0.68557884
	30	0.175903	0.075299	0.029506	2.231728	0.74390931
	60	0.125726	0.044227	0.025117	2.442246	0.81408205
40	90	0.097525	0.030791	0.02341	2.554699	0.85156623
	7	0.204198	0.124845	0.061695	1.964249	0.65474981
	12	0.175054	0.091674	0.040723	2.149811	0.7166036
	20	0.140911	0.063682	0.033408	2.323628	0.7745426
	30	0.114313	0.045627	0.030969	2.447238	0.81574584
	60	0.073096	0.024073	0.027799	2.624578	0.87485928
50	90	0.053007	0.016515	0.027311	2.703559	0.90118629
	7	0.184863	0.10427	0.049746	2.058205	0.68606833
	12	0.140533	0.061443	0.035359	2.325389	0.77512967
	20	0.112238	0.046887	0.034139	2.445769	0.81525633
	30	0.097147	0.03667	0.034139	2.516236	0.83874533
	60	0.06357	0.021414	0.034871	2.651296	0.88376533
60	90	0.05178	0.016935	0.032189	2.70121	0.90040333

ตารางผนวกที่ จ2 ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบของสาร (โมล/ลิตร)				
		TG	DG	MG	FAME	GL
	12	0.240322	0.128903	0.050965	1.854439	0.6181465
	20	0.199954	0.10427	0.034627	2.039707	0.6799024
	30	0.164113	0.06886	0.028531	2.209707	0.7365691
	60	0.119123	0.040868	0.021215	2.433438	0.811146
40	90	0.092714	0.027292	0.019996	2.551175	0.8503918
	7	0.208725	0.125404	0.059012	1.952211	0.6507371
	12	0.170527	0.087895	0.039992	2.172712	0.7242375
	20	0.133271	0.059203	0.032189	2.358274	0.7860913
	30	0.106862	0.041848	0.029262	2.362972	0.7876572
	60	0.0664	0.021694	0.026336	2.652177	0.884059
50	90	0.047159	0.014556	0.027555	2.72558	0.9085265
	7	0.185617	0.10637	0.06267	2.084629	0.6948763
	12	0.144966	0.07152	0.044625	2.260795	0.7535983
	20	0.108182	0.046607	0.039016	2.454578	0.8181927
	30	0.090734	0.03569	0.038773	2.530916	0.8436387
	60	0.062816	0.022953	0.039016	2.645424	0.881808
60	90	0.048008	0.016795	0.036578	2.707082	0.9023607

ตารางผนวกที่ จ3 ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบของสาร (โมล/ลิตร)				
		TG	DG	MG	FAME	GL
	12	0.243246	0.131983	0.049258	1.842695	0.6142317
	20	0.20184	0.10469	0.034627	2.04646	0.6821534
	30	0.183448	0.07194	0.02975	2.178291	0.726097
	60	0.128942	0.042408	0.021947	2.419638	0.8065461
40	90	0.098656	0.027992	0.02024	2.545597	0.8485323
	7	0.205141	0.125124	0.0595	1.963662	0.6545541
	12	0.172602	0.089435	0.040723	2.162142	0.7207141
	20	0.140533	0.063542	0.032189	2.326564	0.7755213
	30	0.11337	0.045347	0.030969	2.451054	0.8170181
	60	0.073285	0.023793	0.028043	2.623991	0.8746635
50	90	0.050837	0.016095	0.027799	2.710605	0.9035352
	7	0.175808	0.097272	0.04682	2.128671	0.709557
	12	0.141948	0.061722	0.035359	2.321866	0.7739553
	20	0.111578	0.045347	0.033652	2.453403	0.817801
	30	0.095544	0.03611	0.033408	2.522989	0.8409963
	60	0.06291	0.020574	0.029506	2.661573	0.887191
60	90	0.051215	0.016795	0.031945	2.702972	0.9009907

ตารางผนวกที่ จ4 ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:9 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบของสาร (โมล/ลิตร)				
		TG	DG	MG	FAME	GL
	12	0.424073	0.203051	0.088931	1.080454	0.36015144
	20	0.248695	0.12432	0.057257	1.829702	0.60990077
	30	0.207136	0.08838	0.039958	2.055298	0.68509937
	60	0.133818	0.05286	0.03338	2.365969	0.78865636
40	90	0.095181	0.03552	0.032161	2.524091	0.84136383
	7	0.293835	0.163056	0.098921	1.557755	0.51925174
	12	0.226361	0.119565	0.071876	1.891602	0.63053394
	20	0.157378	0.075795	0.052871	2.221048	0.74034932
	30	0.113746	0.049924	0.042395	2.423761	0.8079205
	60	0.067663	0.027269	0.039227	2.618554	0.87285141
50	90	0.045046	0.01748	0.03606	2.71331	0.90443678
	7	0.180655	0.095512	0.08552	2.067913	0.68930424
	12	0.125997	0.057475	0.060668	2.347781	0.78259353
	20	0.088113	0.0358	0.050191	2.523798	0.84126604
	30	0.065213	0.025451	0.050191	2.616794	0.87226469
	60	0.04024	0.013984	0.049704	2.719178	0.90639253
60	90	0.030156	0.010348	0.050191	2.757608	0.9192027

ตารางผนวกที่ จ5 ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:9 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบของสาร (โมล/ลิตร)				
		TG	DG	MG	FAME	GL
	12	0.510301	0.205429	0.092342	0.802933	0.2676444
	20	0.278192	0.141101	0.060912	1.698276	0.566092
	30	0.231732	0.104322	0.045562	1.93854	0.6461799
	60	0.159546	0.057475	0.033623	2.275907	0.7586356
40	90	0.113746	0.039995	0.032161	2.456911	0.8189705
	7	0.423696	0.222489	0.143752	0.974844	0.3249479
	12	0.246622	0.131871	0.080891	1.791859	0.5972862
	20	0.186969	0.090898	0.054333	2.095489	0.6984963
	30	0.153891	0.068663	0.047511	2.253318	0.7511059
	60	0.095181	0.037198	0.04142	2.509423	0.8364745
50	90	0.049098	0.018599	0.035329	2.616794	0.8722647
	7	0.15832	0.107819	0.077723	2.121011	0.7070038
	12	0.111201	0.07104	0.06213	2.361569	0.7871895
	20	0.074637	0.045589	0.045562	2.549321	0.8497736
	30	0.056072	0.032164	0.043126	2.640263	0.8800877
	60	0.038072	0.021116	0.047998	2.713604	0.9045346
60	90	0.026575	0.014823	0.038253	2.772276	0.9240921

ตารางผนวกที่ จ6 ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:9 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบของสาร (โมล/ลิตร)				
		TG	DG	MG	FAME	GL
	12	0.399759	0.197318	0.083327	1.17345	0.3911501
	20	0.248695	0.12432	0.057257	1.829702	0.6099008
	30	0.207136	0.08838	0.039958	2.055298	0.6850994
	60	0.133818	0.05286	0.03338	2.365969	0.7886564
40	90	0.095181	0.03552	0.032161	2.524091	0.8413638
	7	0.295908	0.161798	0.095266	1.558342	0.5194473
	12	0.226737	0.118167	0.071632	1.893362	0.6311207
	20	0.159828	0.076214	0.053359	2.21166	0.7372201
	30	0.115913	0.051742	0.042882	2.412614	0.8042046
	60	0.067003	0.027129	0.039227	2.621195	0.8737315
50	90	0.046177	0.01776	0.037034	2.70803	0.9026766
	7	0.179053	0.094394	0.084058	2.0773	0.6924334
	12	0.125997	0.056217	0.060181	2.351008	0.7836692
	20	0.088867	0.03594	0.049948	2.521451	0.8404837
	30	0.065213	0.025311	0.050679	2.616501	0.8721669
	60	0.040617	0.014124	0.050922	2.716244	0.9054147
60	90	0.029968	0.010208	0.048729	2.760248	0.9200828

ตารางผนวกที่ จ7 ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบของสาร (โมล/ลิตร)				
		TG	DG	MG	FAME	GL
	12	0.557477	0.228389	0.097916	0.564278	0.18809279
	20	0.353413	0.148991	0.072174	1.397081	0.46569381
	30	0.244076	0.099419	0.051965	1.865768	0.62192283
	60	0.129808	0.04971	0.04162	2.338221	0.77940709
40	90	0.078536	0.028721	0.035606	2.549101	0.8497005
	7	0.418457	0.182683	0.101044	1.089162	0.36305385
	12	0.146557	0.079536	0.060626	2.200628	0.73354258
	20	0.090633	0.043772	0.044507	2.469152	0.8230508
	30	0.062438	0.026926	0.043786	2.593131	0.86437714
	60	0.024845	0.008147	0.038734	2.755637	0.91854555
50	90	0.017866	0.004833	0.037771	2.785473	0.92849091
	7	0.261849	0.109776	0.096713	1.734837	0.57827912
	12	0.083747	0.042944	0.057739	2.476394	0.82546472
	20	0.04969	0.023336	0.053409	2.628761	0.87625364
	30	0.031079	0.012151	0.046913	2.717979	0.90599315
	60	0.019169	0.005799	0.04547	2.77012	0.92337339
60	90	0.016377	0.004557	0.045229	2.781707	0.92723567

ตารางผนวกที่ จ8 ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2

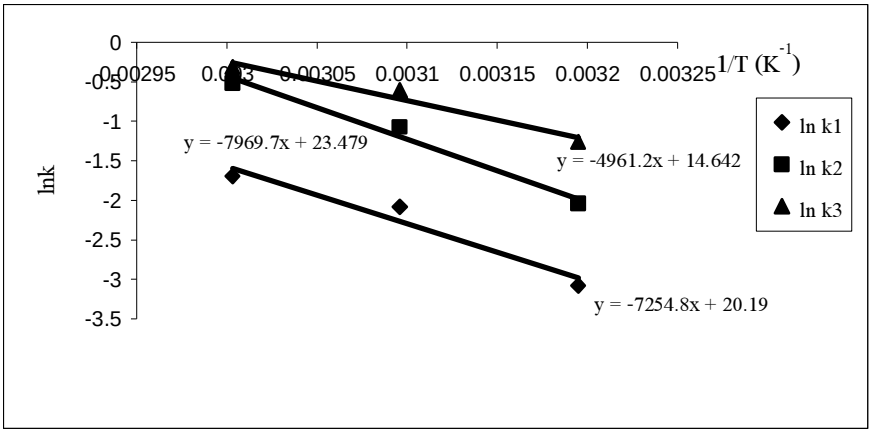
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบของสาร (โมล/ลิตร)				
		TG	DG	MG	FAME	GL
	12	0.519046	0.221899	0.099119	0.696079	0.2320262
	20	0.346341	0.147334	0.074099	1.420255	0.4734184
	30	0.230491	0.095829	0.051003	1.916751	0.6389168
	60	0.113989	0.043358	0.037531	2.405715	0.8019048
40	90	0.063276	0.022369	0.034403	2.611381	0.8704602
	7	0.380026	0.189035	0.116922	1.176352	0.3921175
	12	0.202203	0.09652	0.069047	1.981637	0.6605456
	20	0.110639	0.048467	0.047154	2.393838	0.797946
	30	0.06616	0.02734	0.042342	2.582414	0.8608045
	60	0.02745	0.008975	0.039215	2.745209	0.9150695
50	90	0.019355	0.005385	0.038974	2.778231	0.926077
	7	0.253382	0.095001	0.085887	1.805227	0.6017424
	12	0.079001	0.038525	0.058221	2.499857	0.8332858
	20	0.043735	0.018779	0.049319	2.661783	0.8872611
	30	0.027823	0.010356	0.046432	2.732463	0.910821
	60	0.017773	0.004971	0.046192	2.775334	0.9251114
60	90	0.016749	0.004419	0.046192	2.779679	0.9265598

ตารางผนวกที่ จ9 ค่าปริมาณน้ำหนักในหน่วย (โมล/ลิตร) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:12 และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าปริมาณองค์ประกอบของสาร (โมล/ลิตร)				
		TG	DG	MG	FAME	GL
	12	0.521	0.218723	0.097916	0.698106	0.2327021
	20	0.342061	0.146506	0.073858	1.435608	0.4785359
	30	0.231328	0.096382	0.0498	1.914723	0.6382409
	60	0.113338	0.042668	0.037049	2.40977	0.8032566
40	90	0.063462	0.022369	0.034403	2.611091	0.8703637
	7	0.379561	0.18793	0.117163	1.179828	0.3932762
	12	0.203971	0.096382	0.068806	1.976712	0.6589041
	20	0.110267	0.047777	0.046913	2.396735	0.7989116
	30	0.066532	0.027202	0.042342	2.581545	0.8605149
	60	0.02745	0.008837	0.038252	2.746367	0.9154557
50	90	0.019355	0.005247	0.037771	2.779969	0.9266563
	7	0.268735	0.112813	0.098398	1.705001	0.5683338
	12	0.083654	0.043082	0.057739	2.476394	0.8254647
	20	0.048946	0.023336	0.05389	2.630499	0.876833
	30	0.031079	0.012151	0.046913	2.717979	0.9059932
	60	0.019355	0.005799	0.043786	2.771279	0.9237596
60	90	0.01647	0.004557	0.044267	2.782576	0.9275253

ภาคผนวก ฉ
การคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น

ตัวอย่างการคำนวณค่าพลังงานกระตุ้น



กราฟ Arrhenius plot ระหว่างค่า ln k กับ 1/[T] (เคลวิน)$^{-1}$ สร้างกราฟสมการเส้นตรงตามสมการที่ ฉ1

$$\ln k = \ln k_0 - E_a / RT \qquad \text{ฉ1}$$

จากสมการที่ ฉ1 Ea คือค่าพลังงานกระตุ้น

R คือค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 8.314 จูล/โมล.เคลวิน

k คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา

k_0 คือ Frequency factor

การคำนวณ:

ค่าความชันที่ได้จากกราฟของขั้น $TG \rightarrow DG$ $\ln k_1$คือ –Ea/R= -7254.8

ได้ค่าพลังงานกระตุ้น (Ea) = 7254.8×8.314 = 60.32 กิโลจูล/โมล

ค่าความชันที่ได้จากกราฟของขั้น $DG \rightarrow MG$ $\ln k_2$คือ –Ea/R= -7969.7

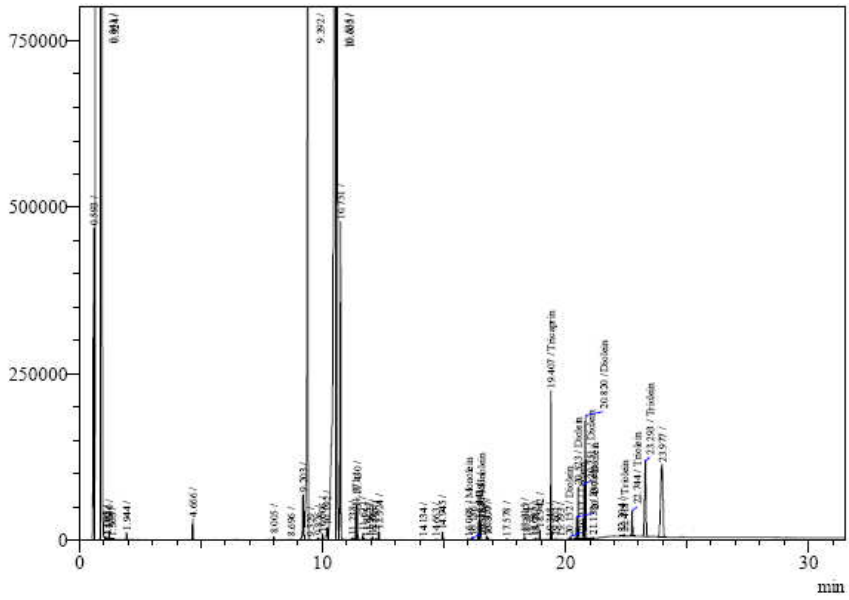
ได้ค่าพลังงานกระตุ้น (Ea) = 7969.7×8.314 = 66.26 กิโลจูล/โมล

และค่าความชันที่ได้จากกราฟของขั้น $MG \rightarrow GL$ $\ln k_2$คือ –Ea/R= -4961.2

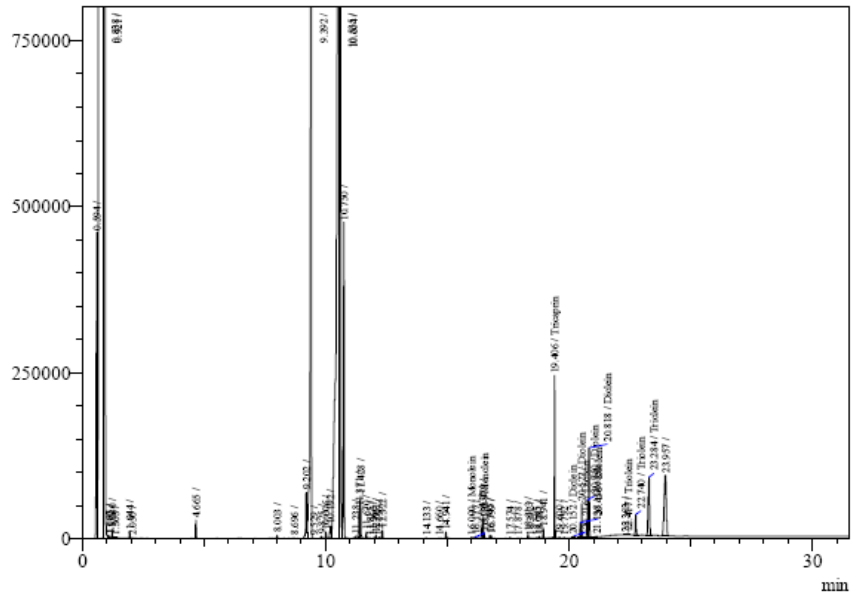
ได้ค่าพลังงานกระตุ้น (Ea) = 4961.2×8.314 = 41.23 กิโลจูล/โมล

ภาคผนวก ช

ลักษณะโครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี

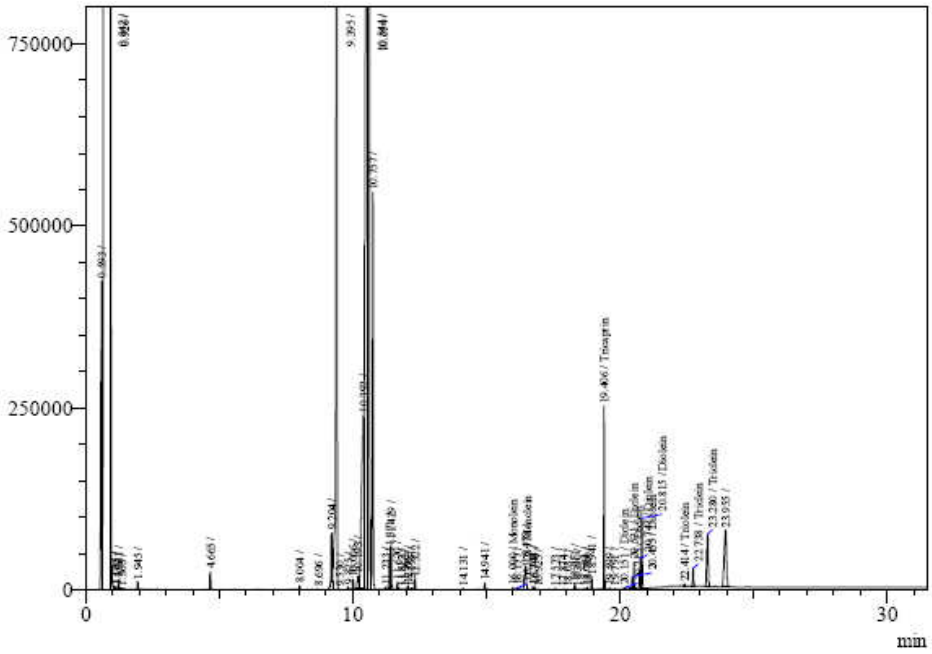


(ก)

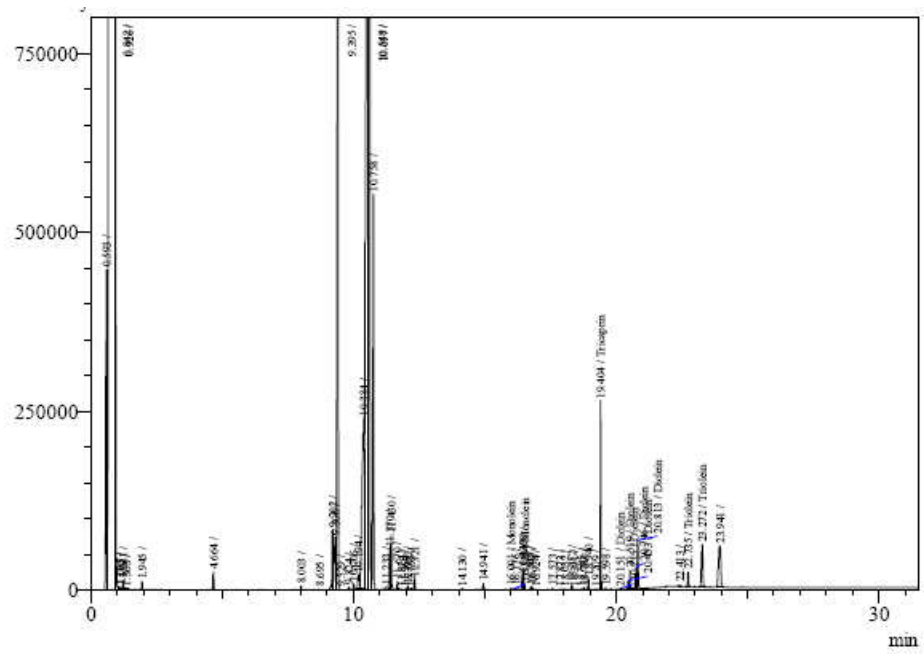


(ข)

ภาพผนวกที่ ช1 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 7 นาที (ก) และ 12 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

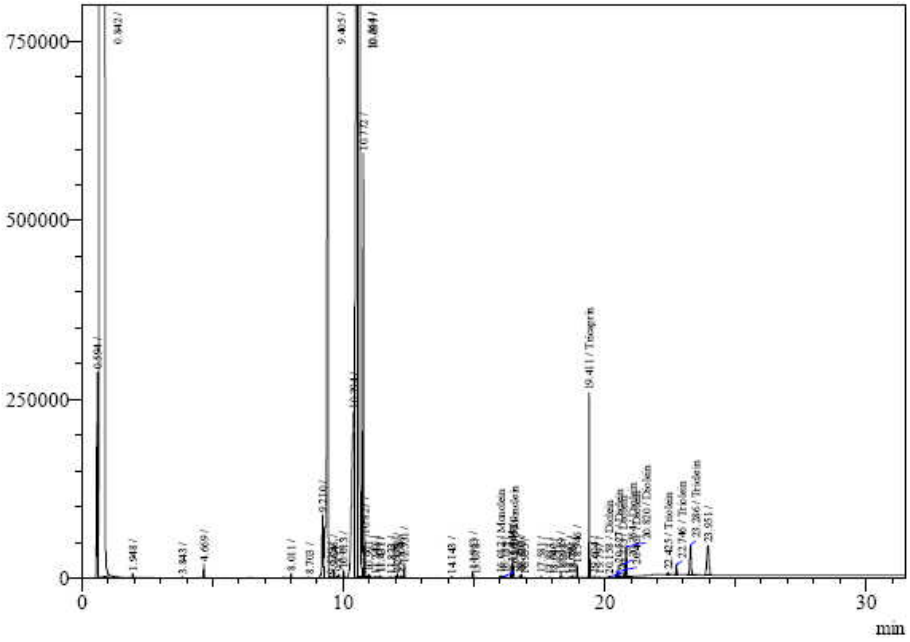


(ก)

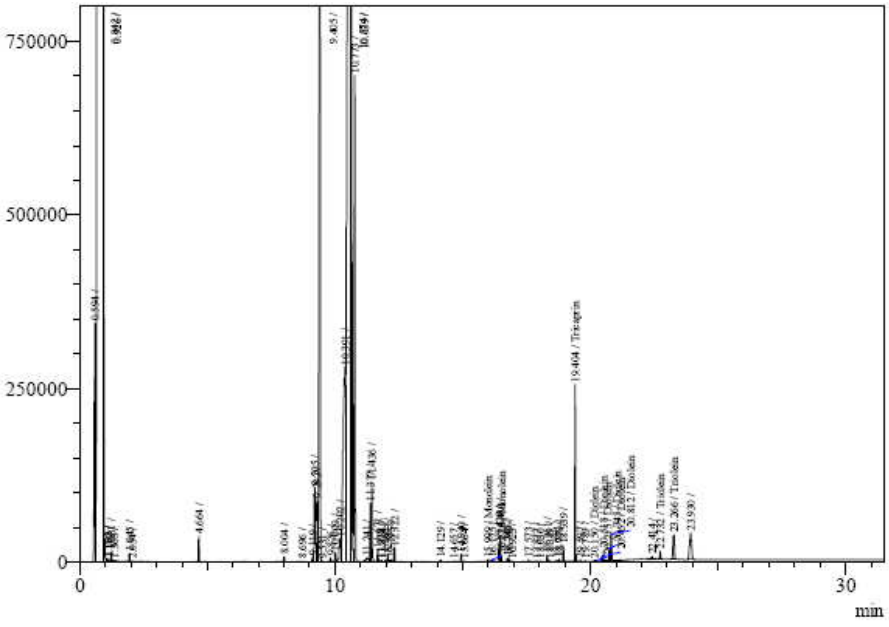


(ข)

ภาพผนวกที่ ช2 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 20 นาที (ก) และ 30 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

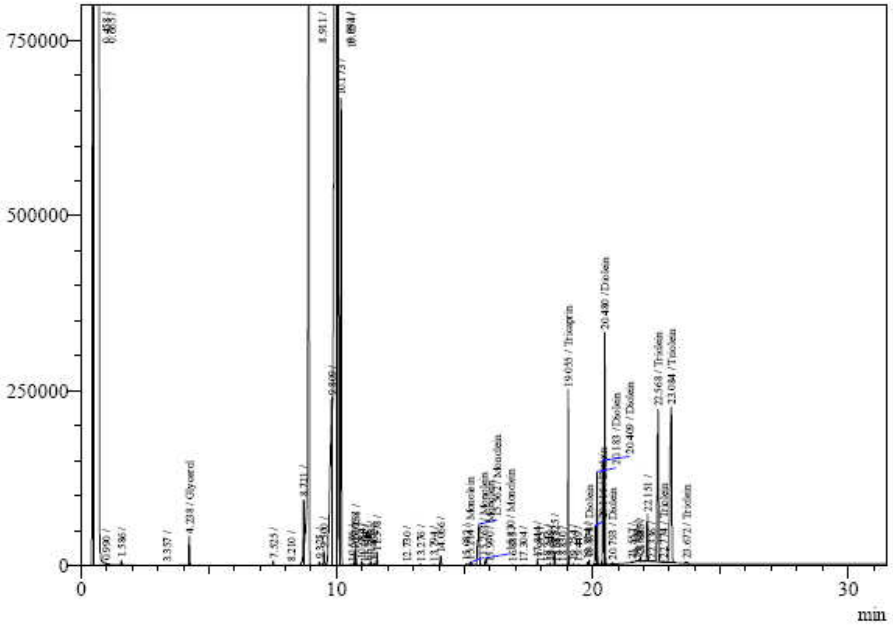


(ก)

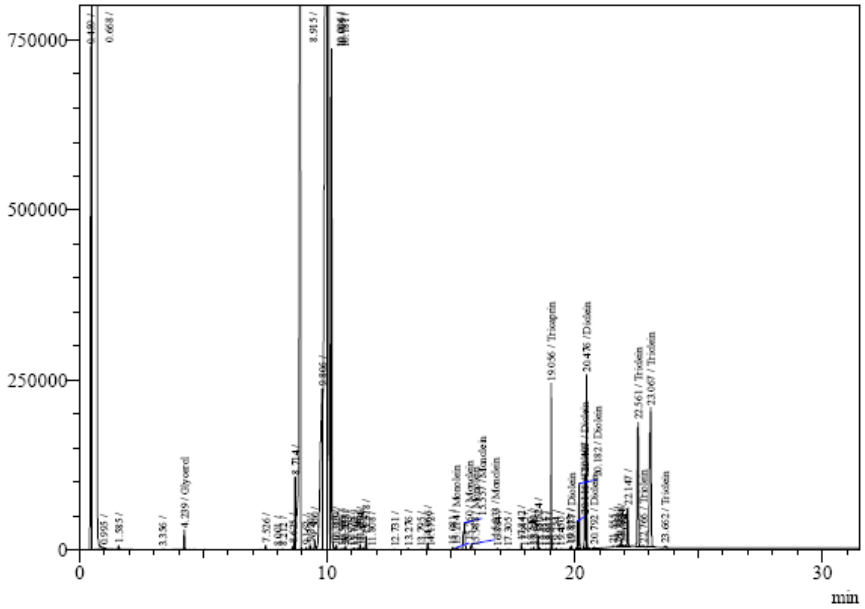


(ข)

ภาพผนวกที่ ช3 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 60 นาที (ก) และ 90 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

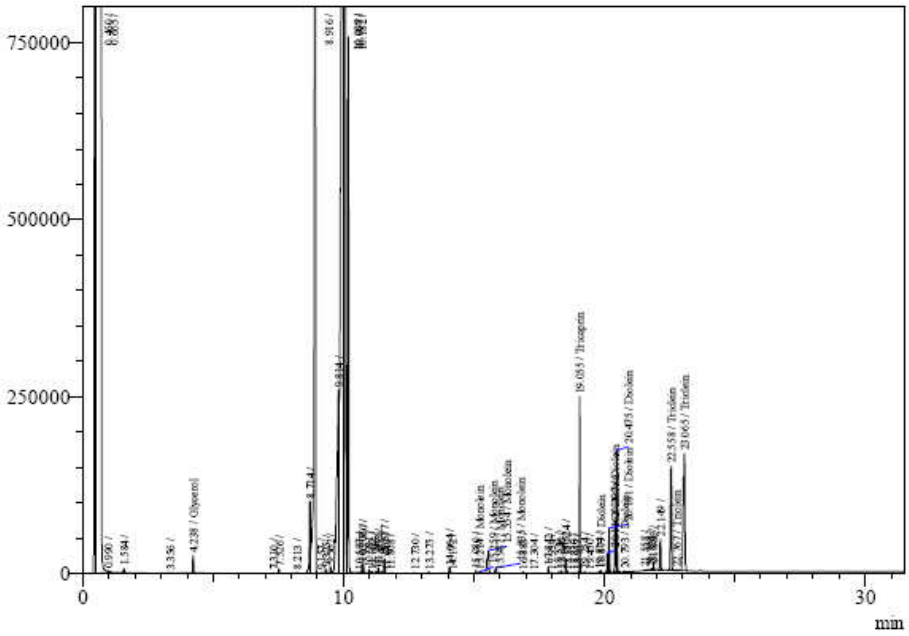


(ก)

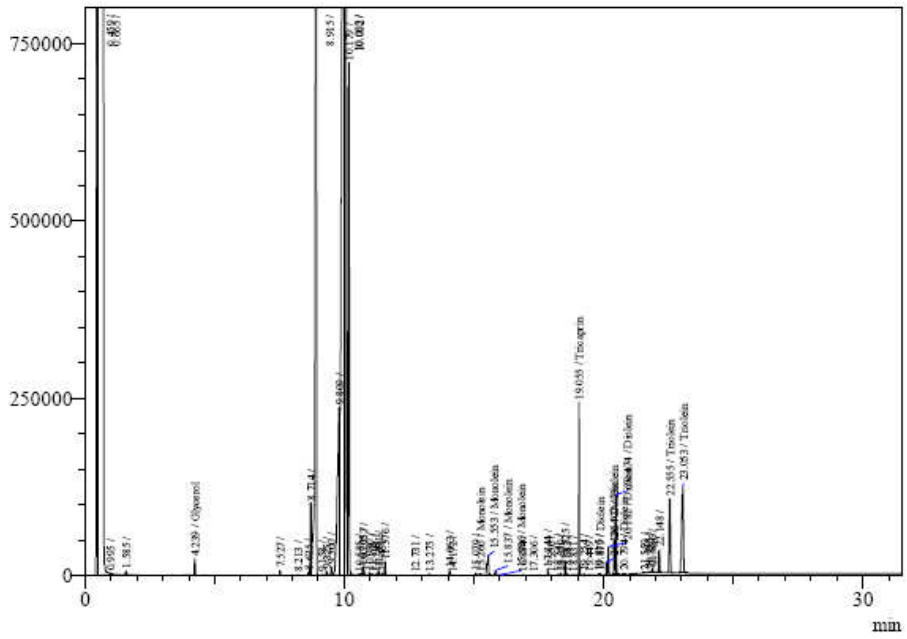


(ข)

ภาพผนวกที่ ช4 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 7 นาที (ก) และ 12 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

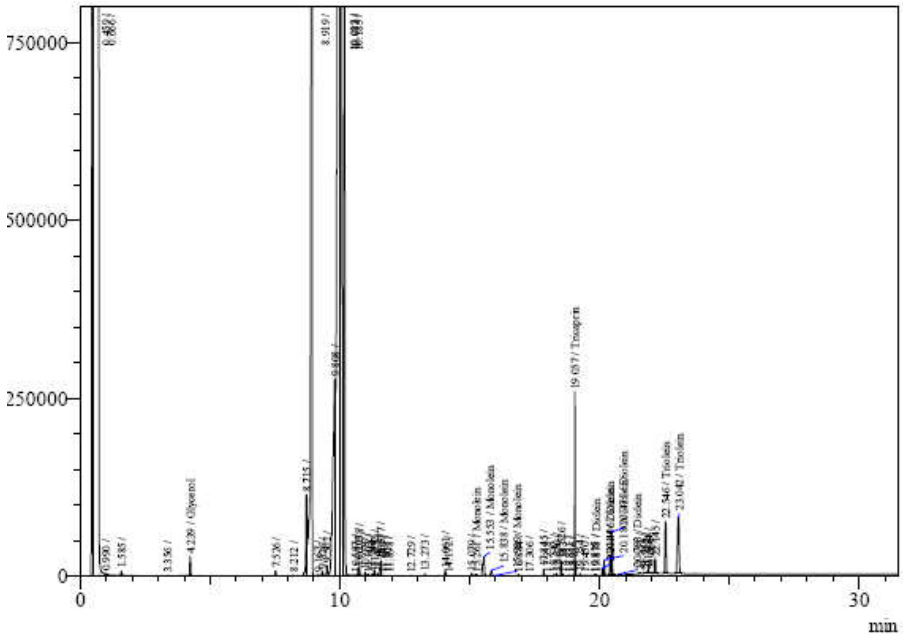


(ก)

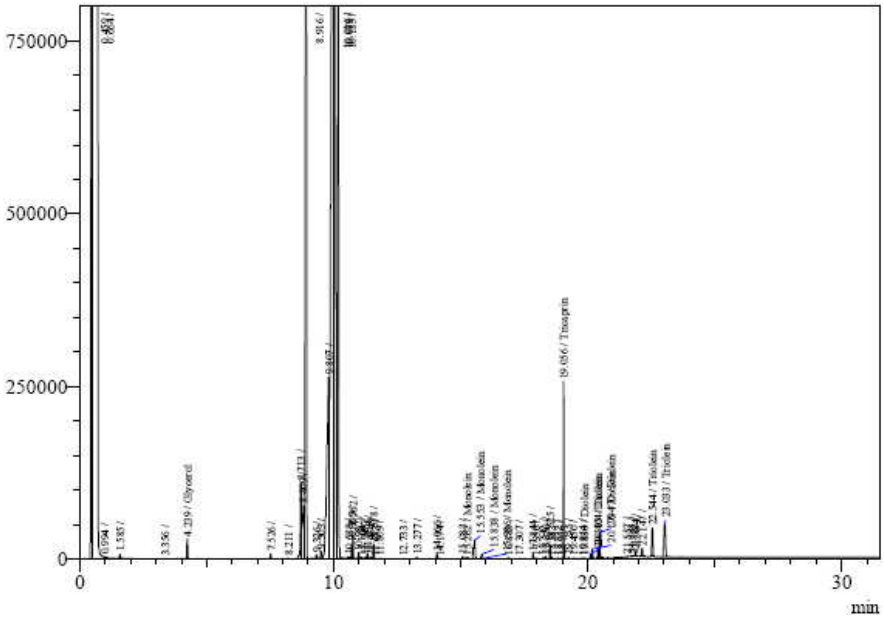


(ข)

ภาพผนวกที่ ช5 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 20 นาที (ก) และ 30 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

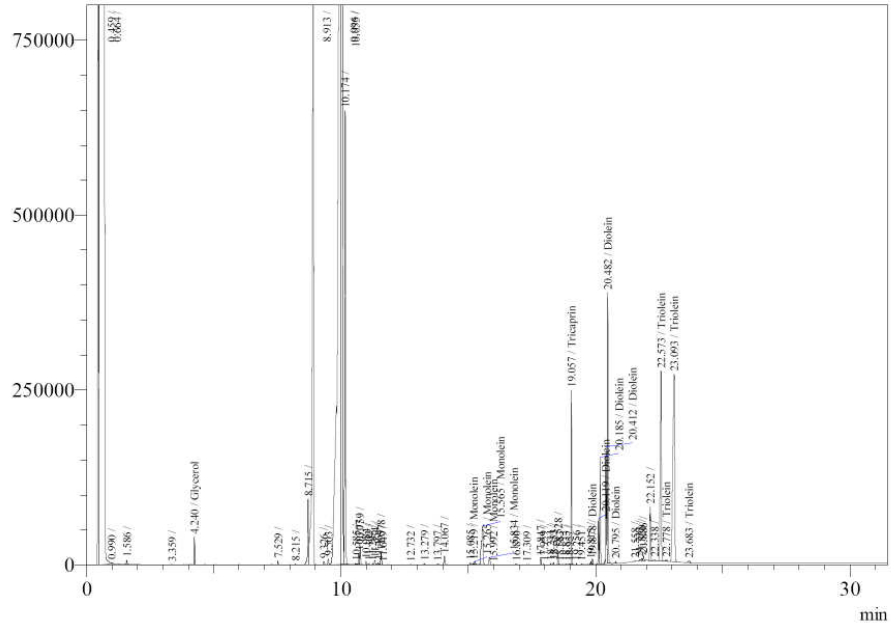


(ก)

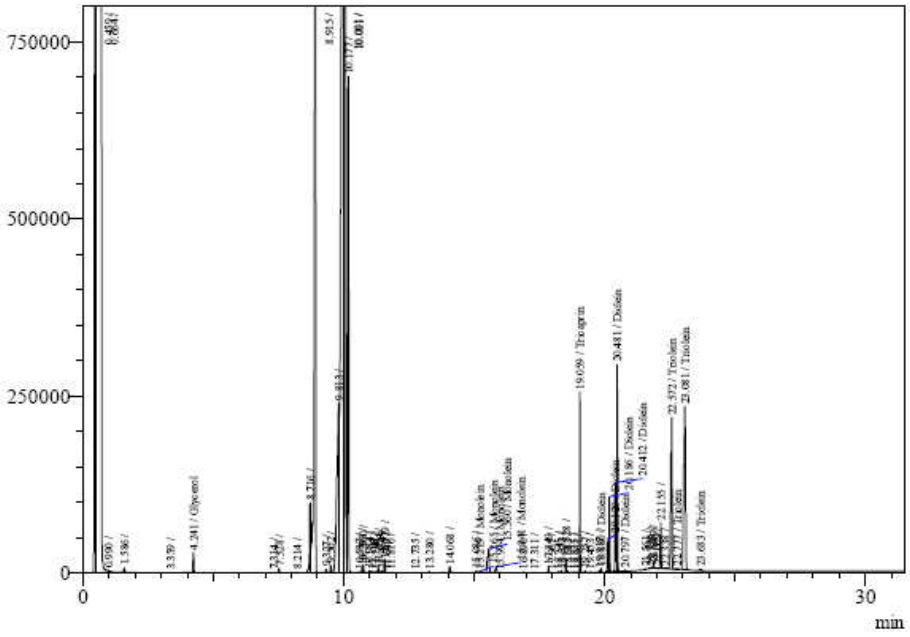


(ข)

ภาพผนวกที่ ช6 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 60 นาที (ก) และ 90 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

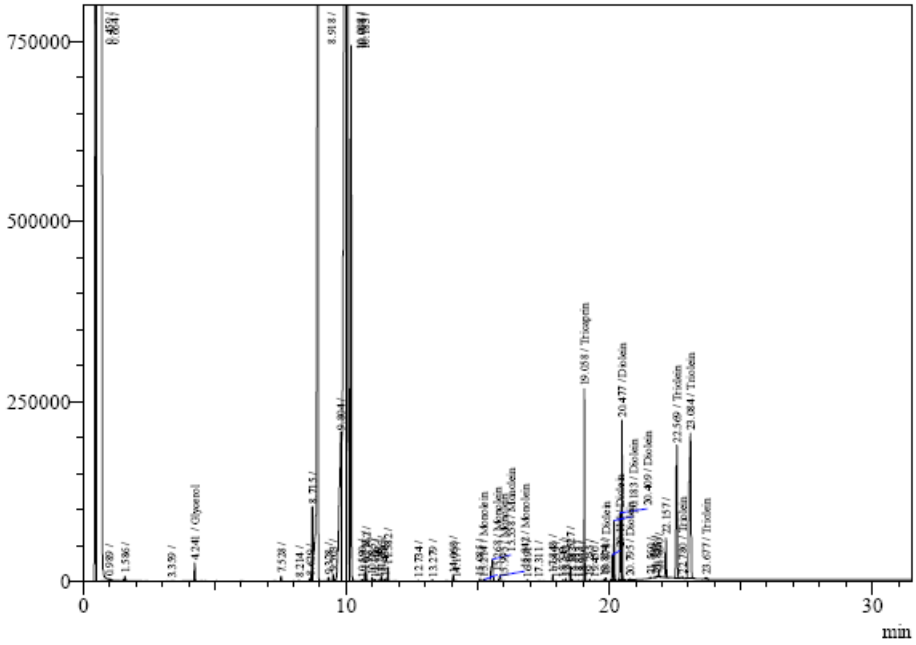


(ก)

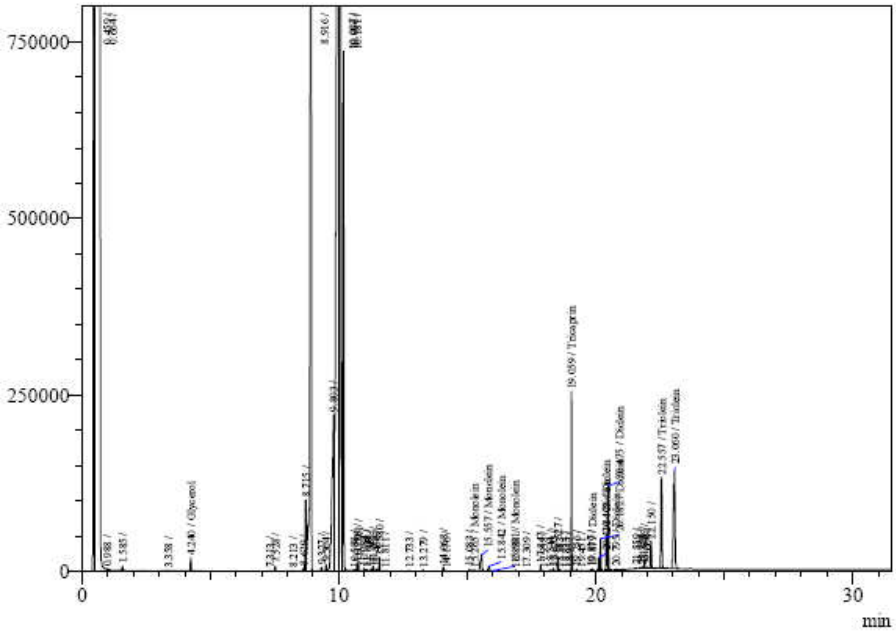


(ข)

ภาพผนวกที่ ช7 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 12 นาที (ก) และ 20 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

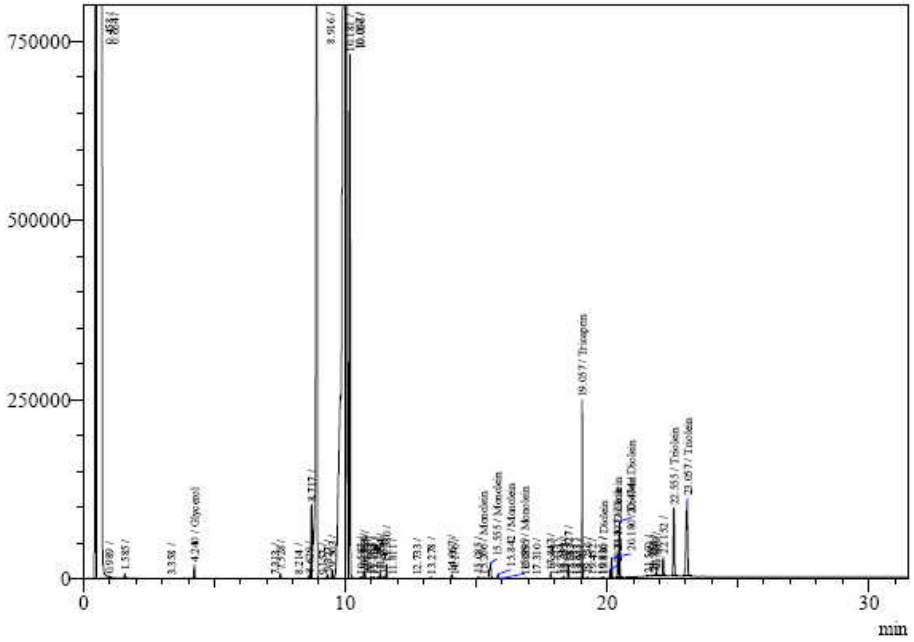


(ก)

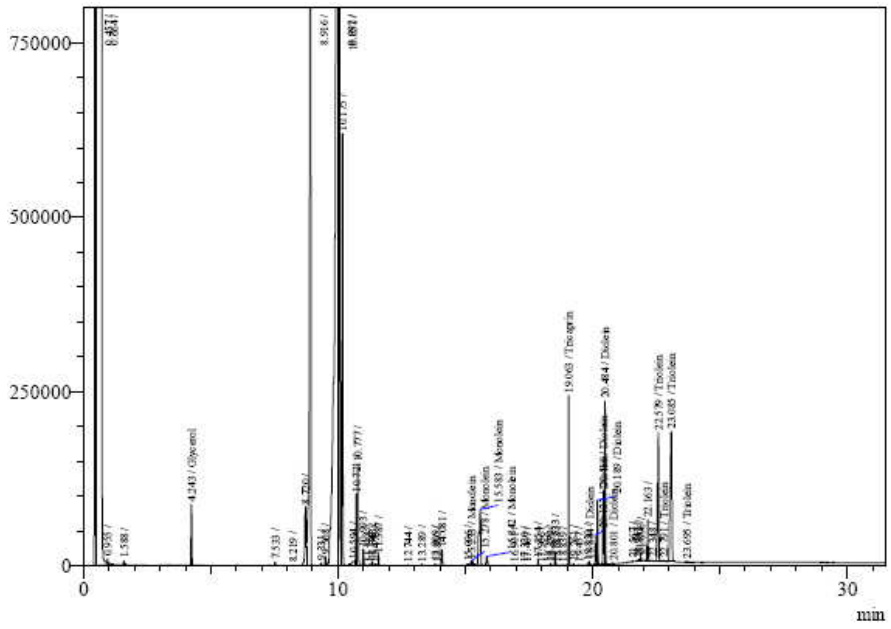


(ข)

ภาพผนวกที่ ช8 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 30 นาที (ก) และ 60 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:7 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

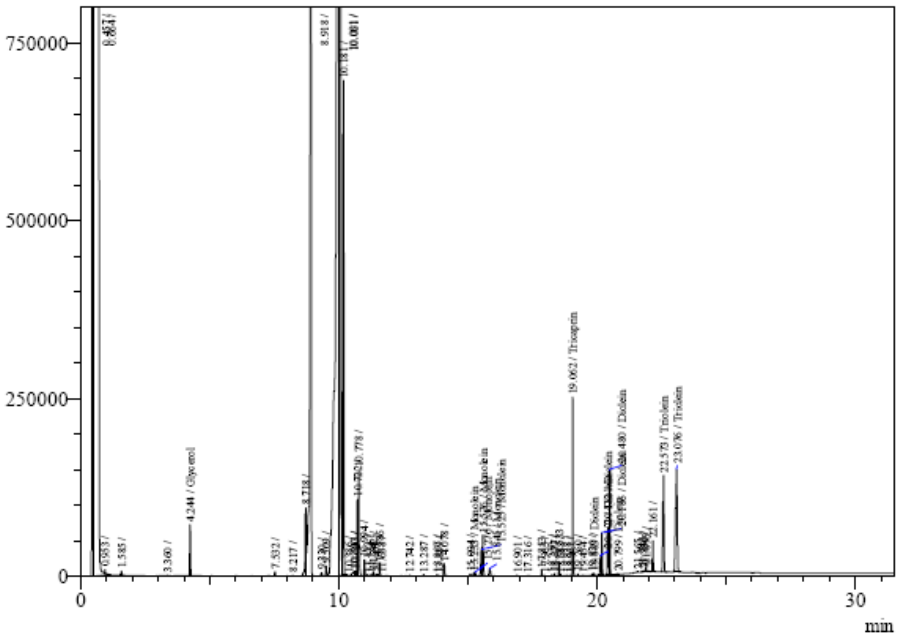


(ก)

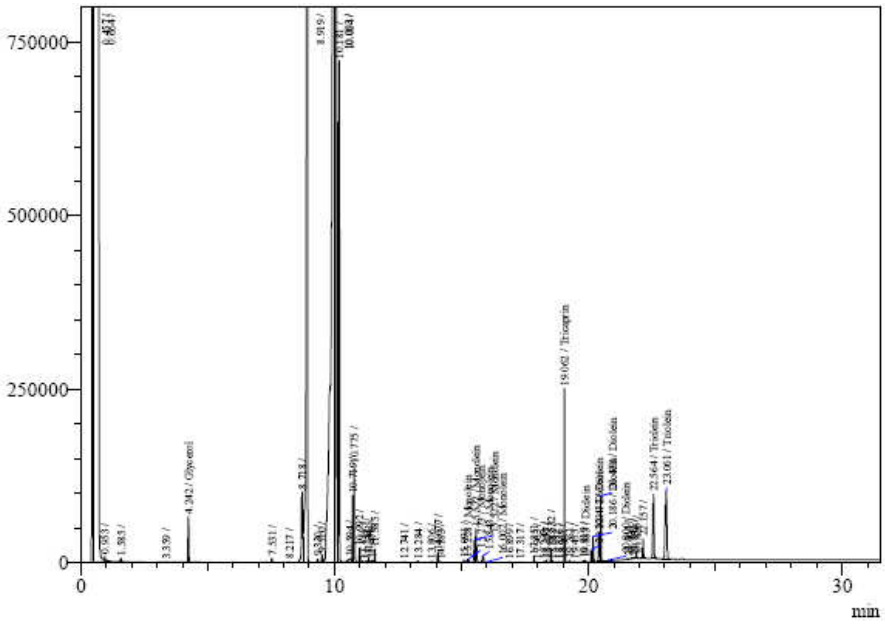


(ข)

ภาพผนวกที่ ช9 โครมาโทแกรมของน้ำมันบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 90 นาที ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทนอล 1:7 (ก) และที่เวลา 7 นาที ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 (ข) ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

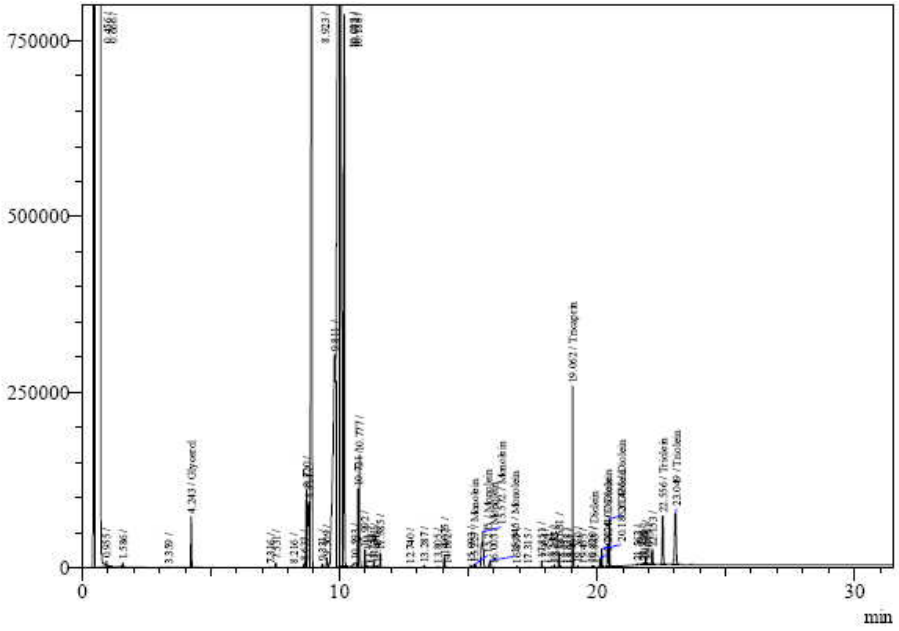


(ก)

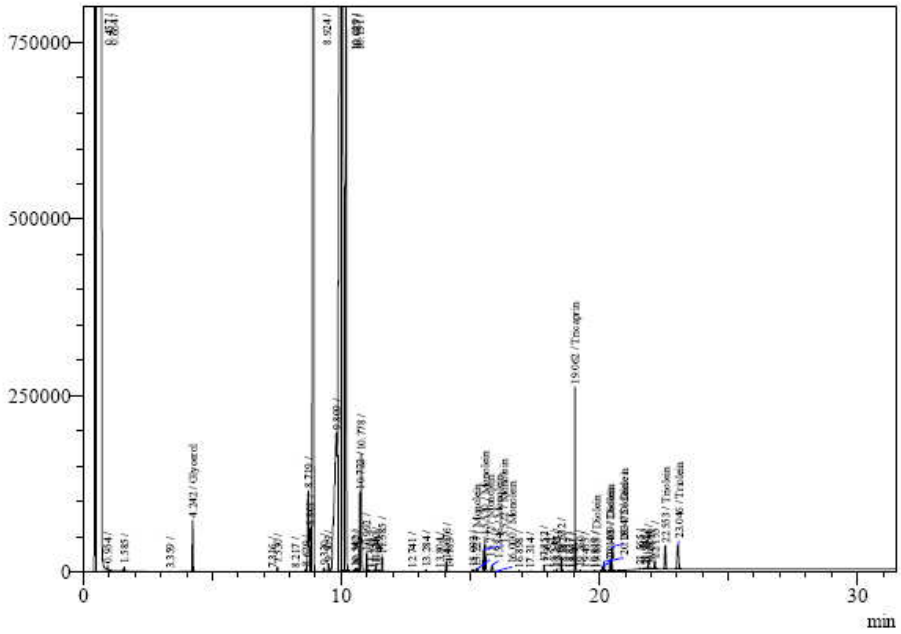


(ข)

ภาพผนวกที่ ช10 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นที่เวลา 12 นาที (ก) และ 20 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

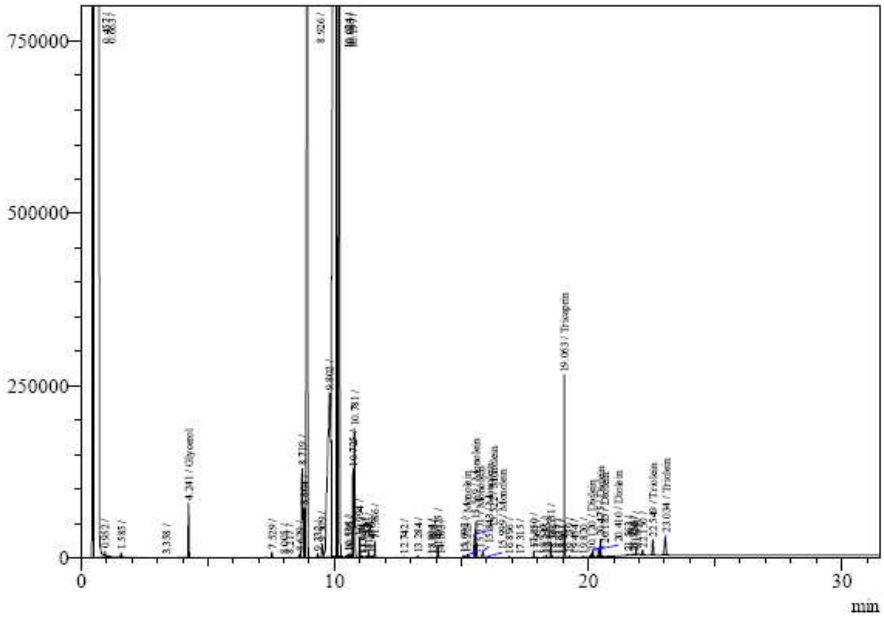


(ก)

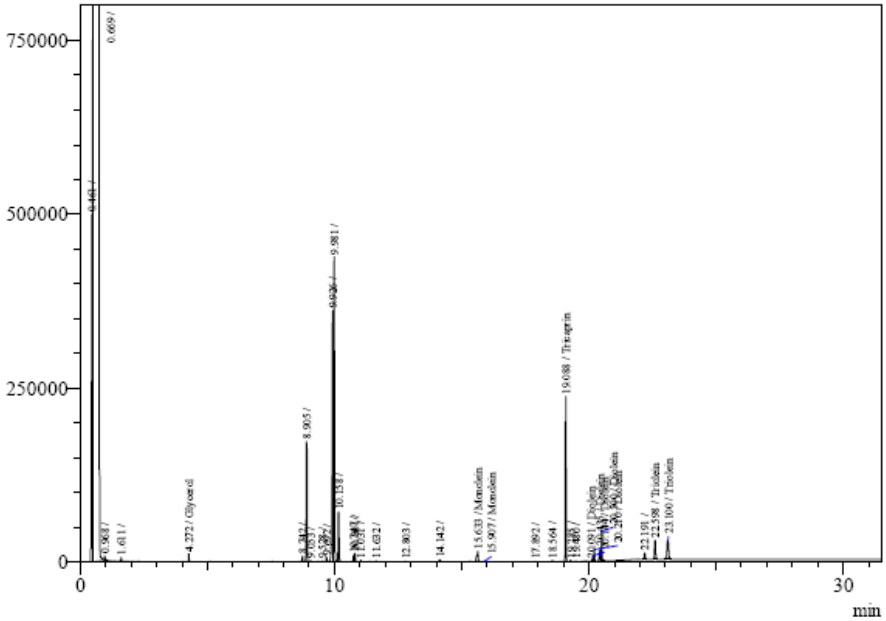


(ข)

ภาพผนวกที่ ช11 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 30 นาที (ก) และ 60 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

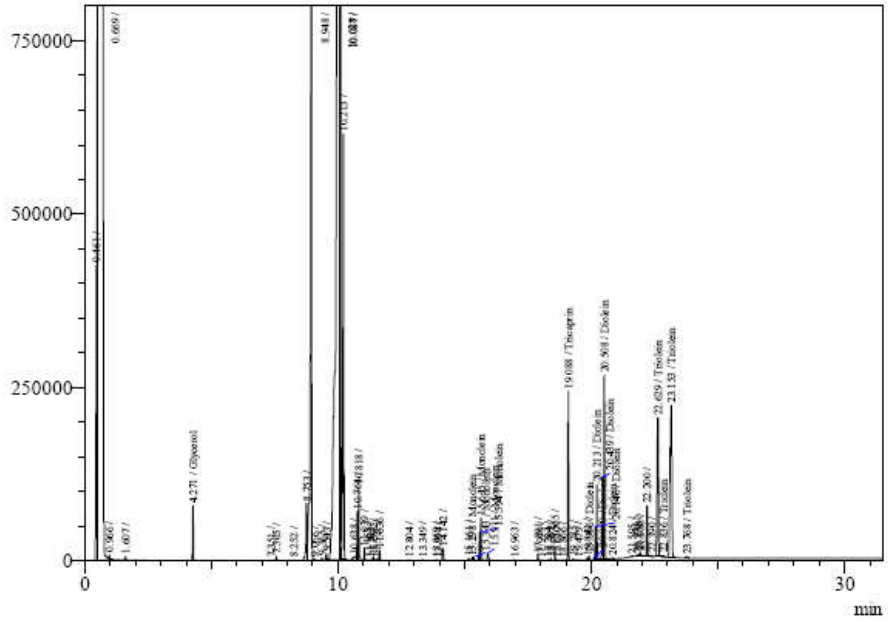


(ก)

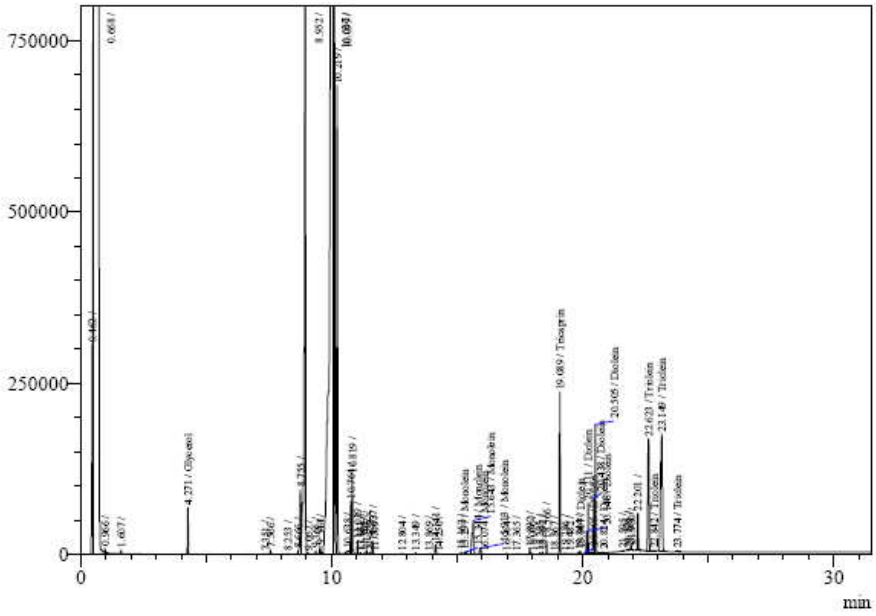


(ข)

ภาพผนวกที่ ช12 โครมาโทแกรมของน้ำมันบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 90 นาที ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทนอล 1:9 (ก) และที่เวลา 7 นาที ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 (ข) ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

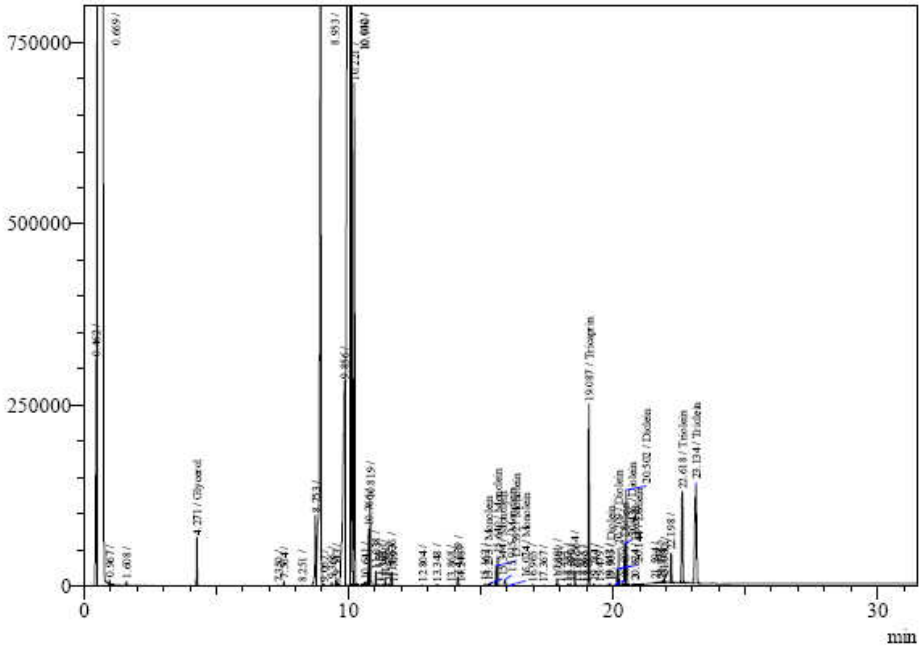


(ก)

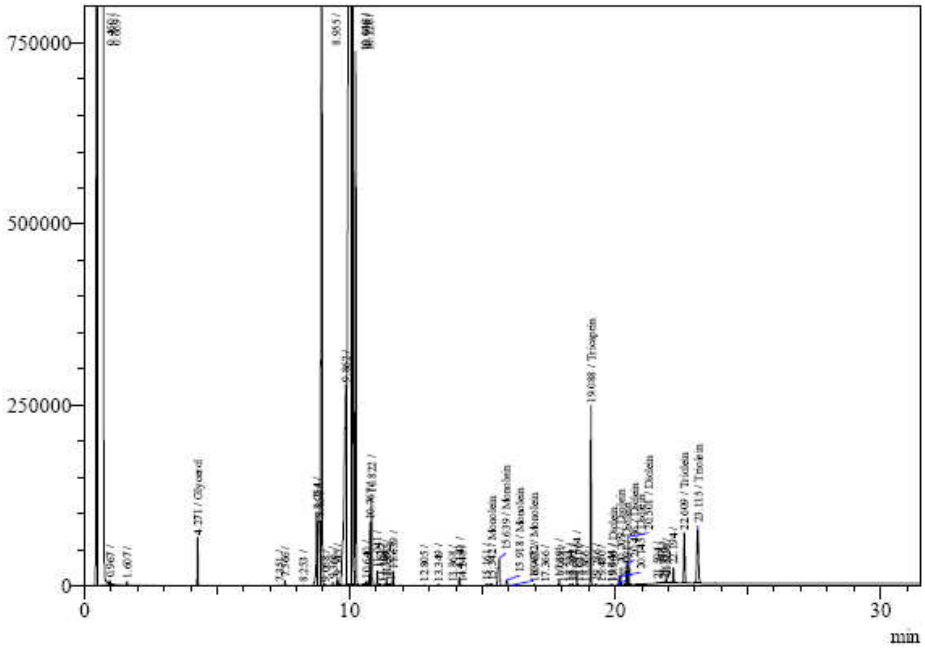


(ข)

ภาพผนวกที่ ช13 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นที่เวลา 12 นาที (ก) และ 20 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

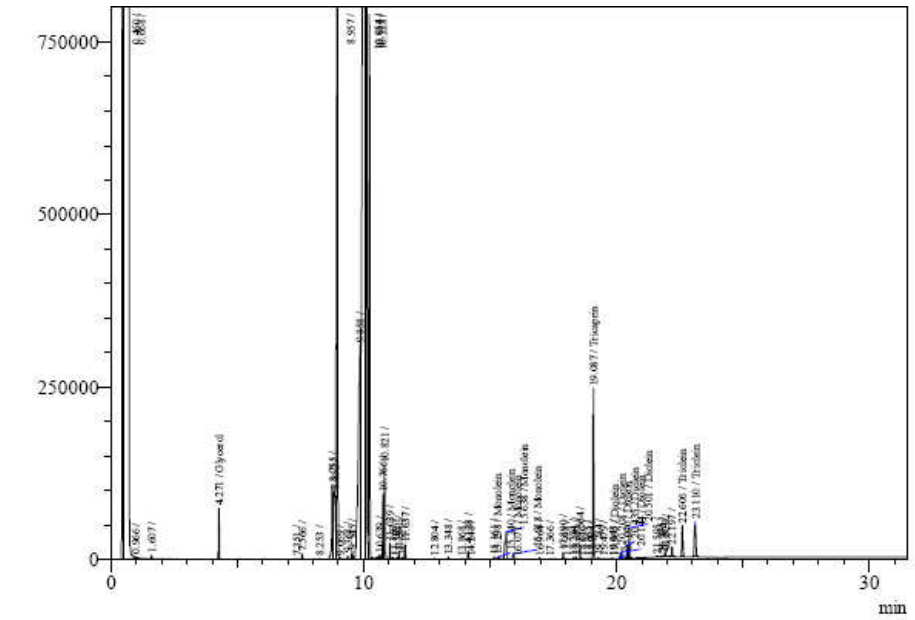


(ก)

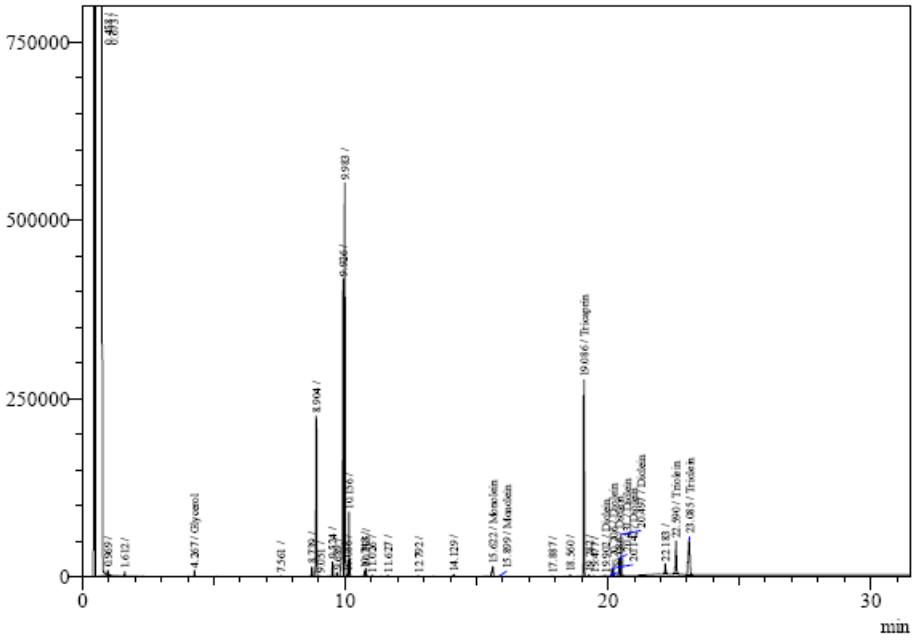


(ข)

ภาพผนวกที่ ช14 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นที่เวลา 30 นาที (ก) และ 60 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

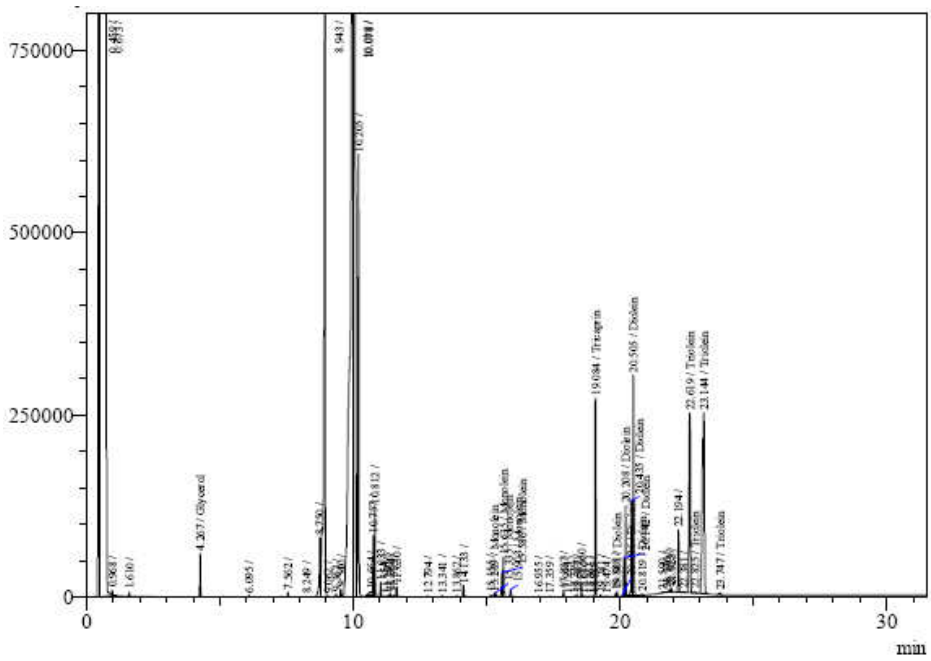


(ก)

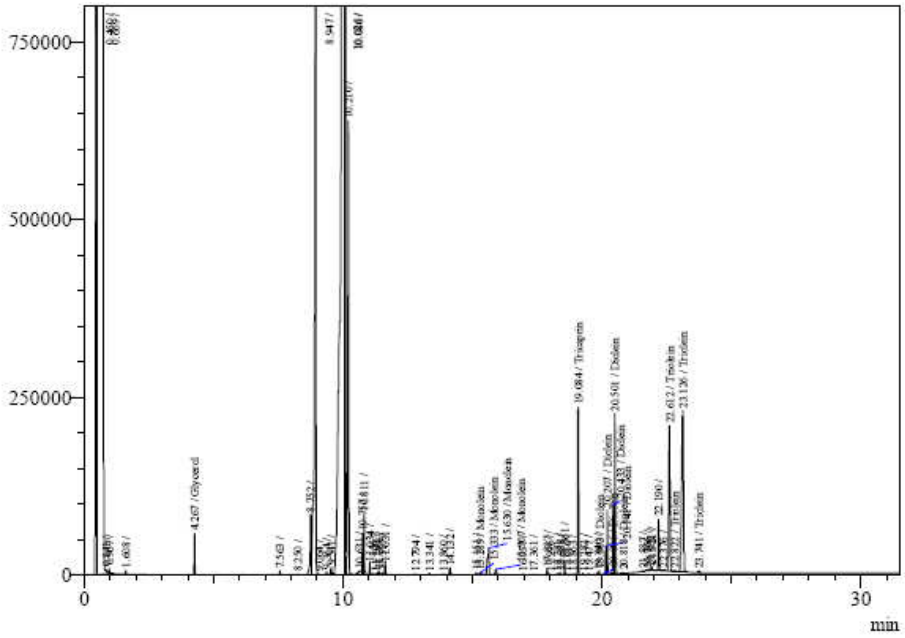


(ข)

ภาพผนวกที่ ช15 โครมาโทแกรมของน้ำมันบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 90 นาที ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 (ก) และที่เวลา 12 นาที ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 (ข) ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

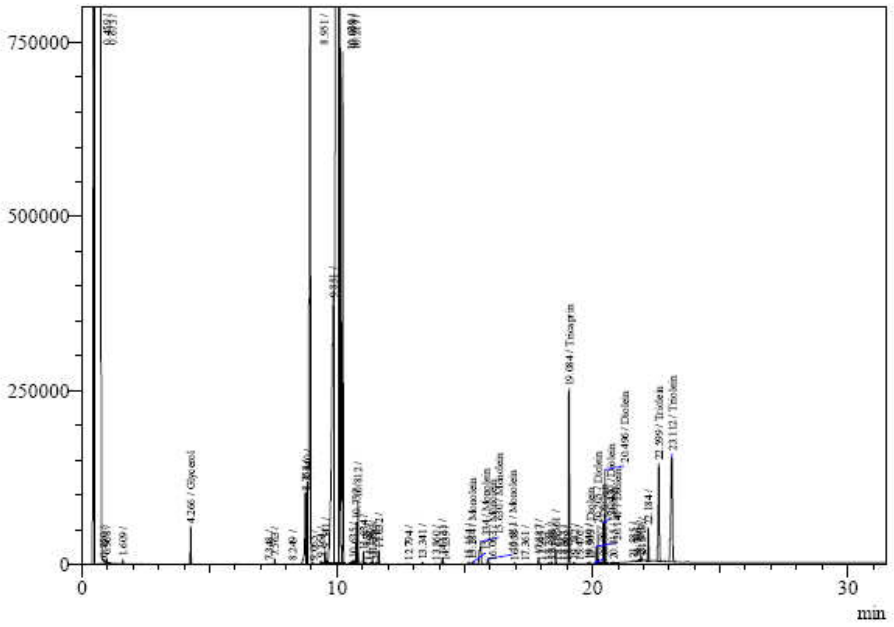


(ก)

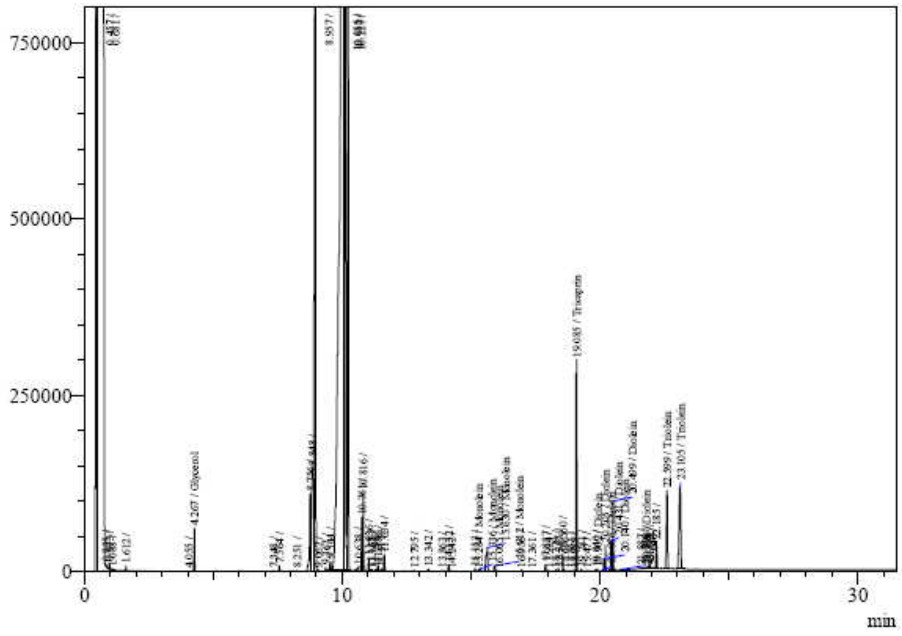


(ข)

ภาพผนวกที่ ช16 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นที่เวลา 20 นาที (ก) และ 30 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

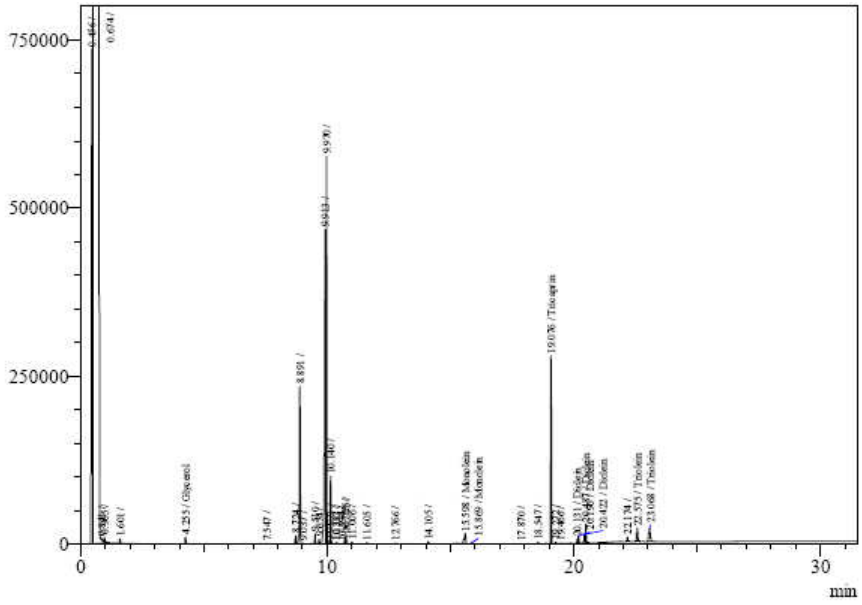


(ก)

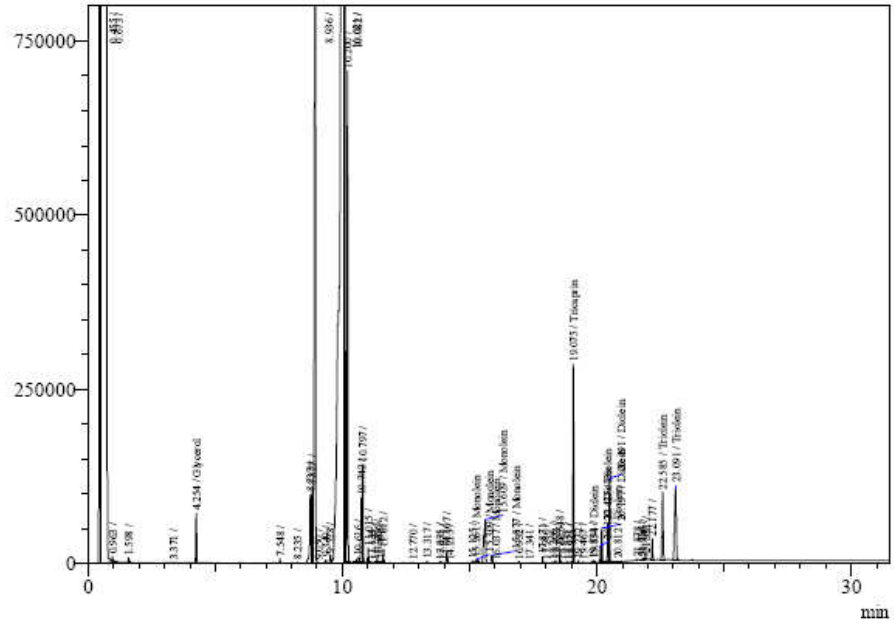


(ข)

ภาพผนวกที่ ช17 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 60 นาที (ก) และ 90 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

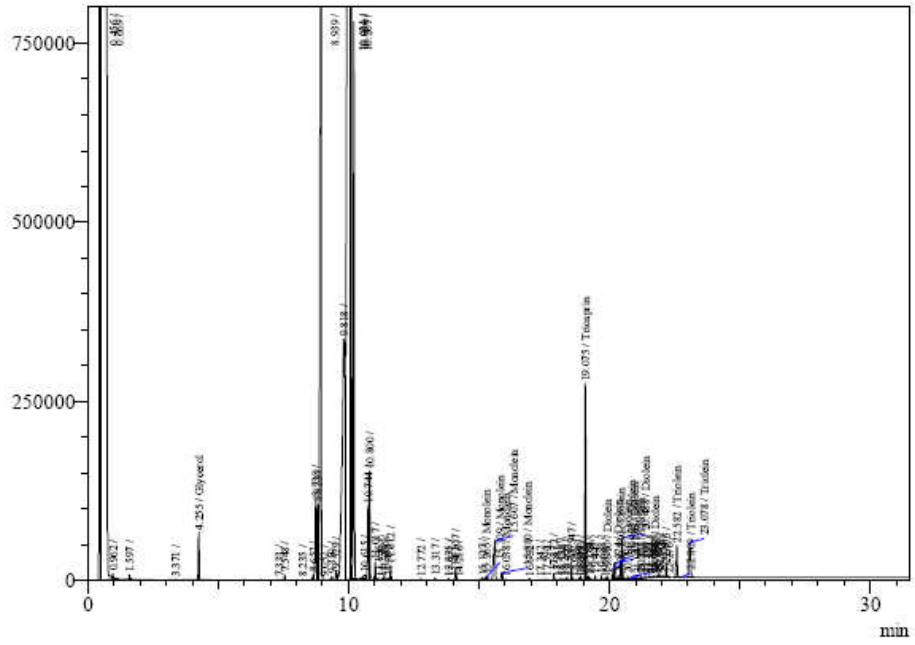


(ก)

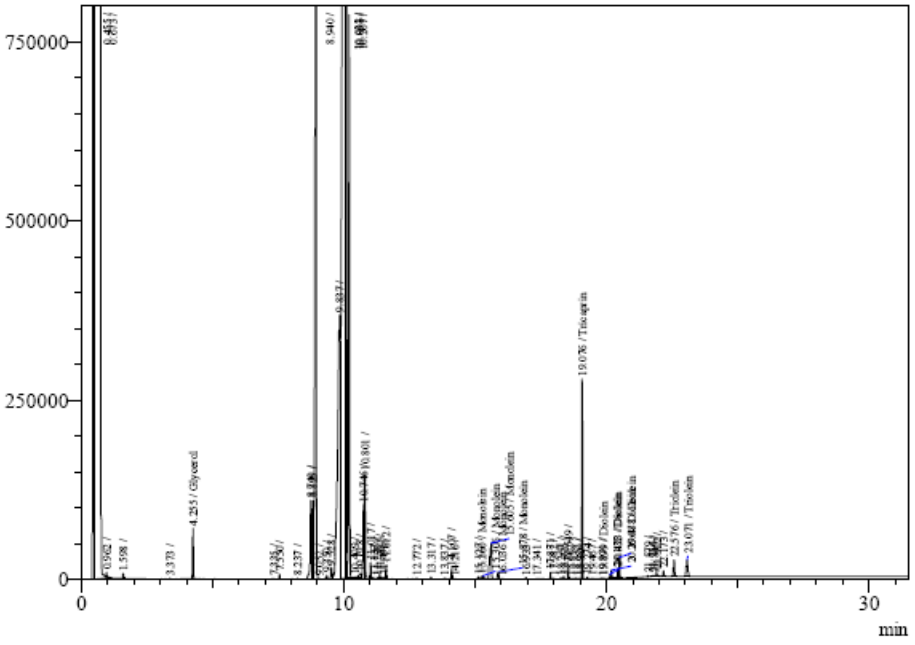


(ข)

ภาพผนวกที่ ช18 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 7 นาที (ก) และ 12 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

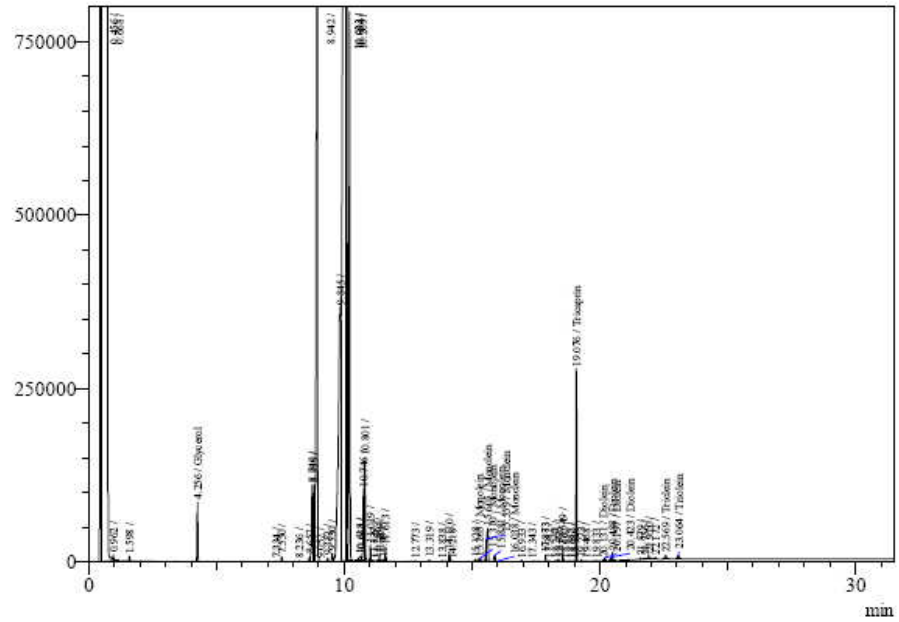


(ก)

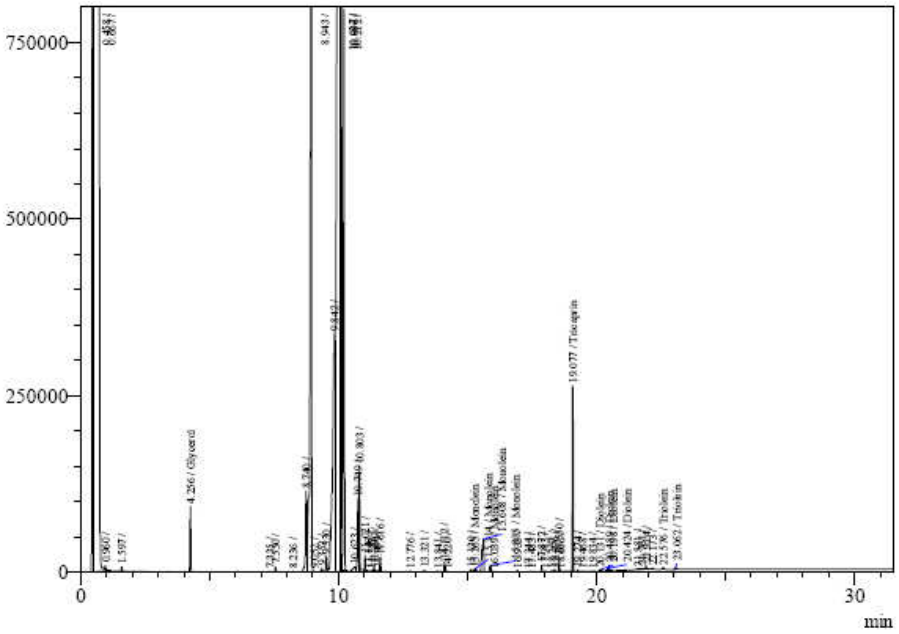


(ข)

ภาพผนวกที่ ช19 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 20 นาที (ก) และ 30 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

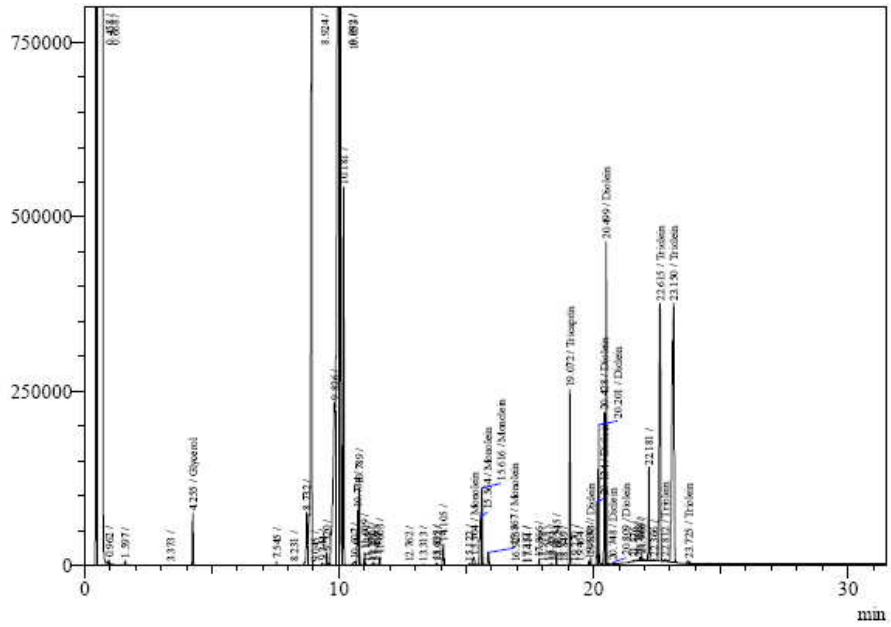


(ก)

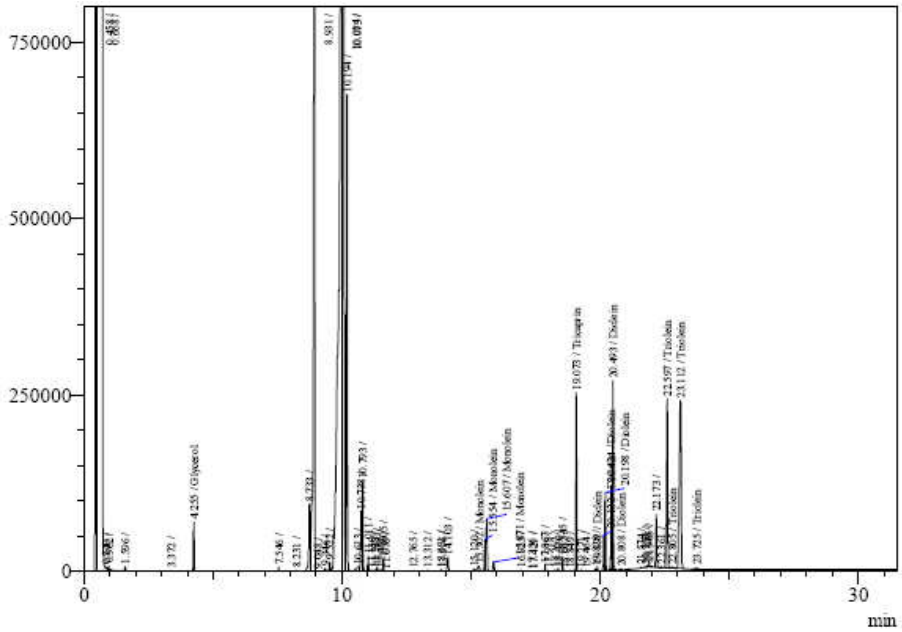


(ข)

ภาพผนวกที่ ช20 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 60 นาที (ก) และ 90 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

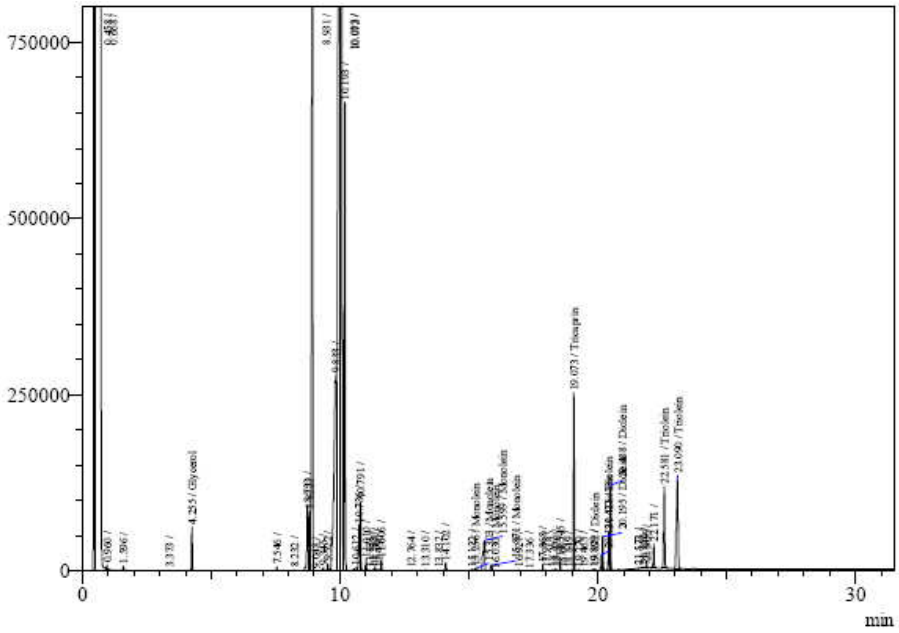


(ก)

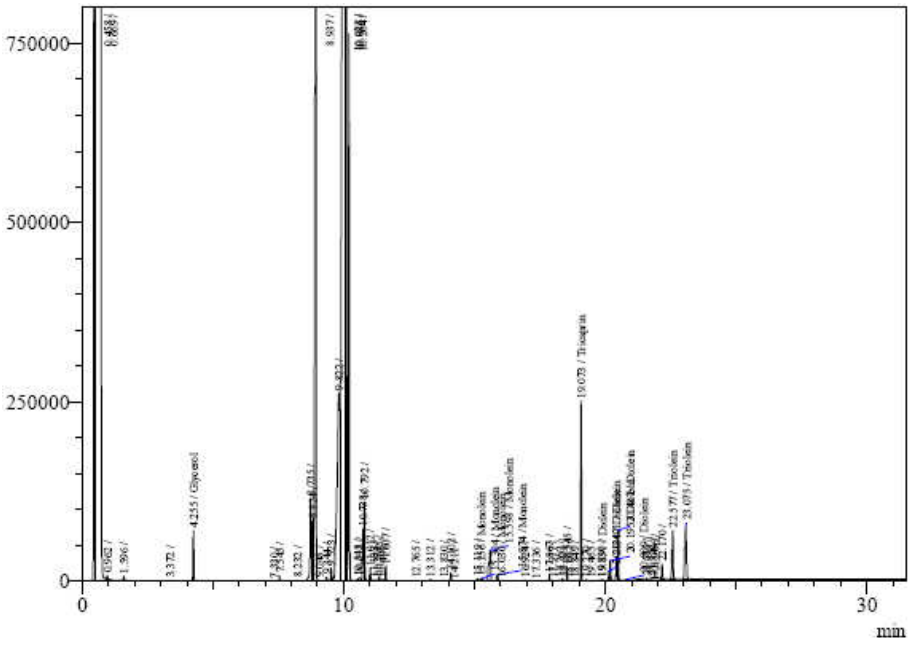


(ข)

ภาพผนวกที่ ช21 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 7 นาที (ก) และ 12 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

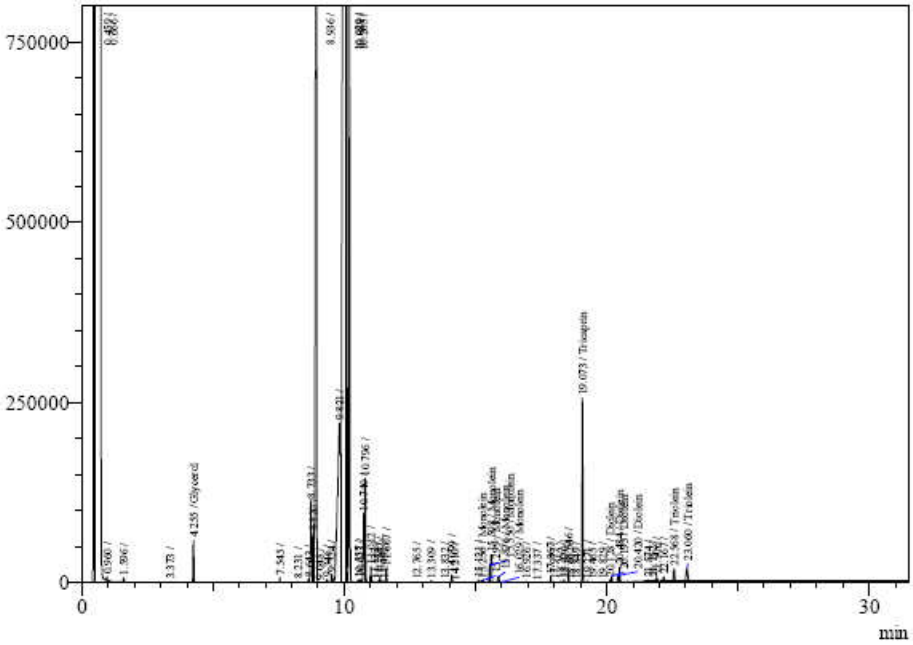


(ก)

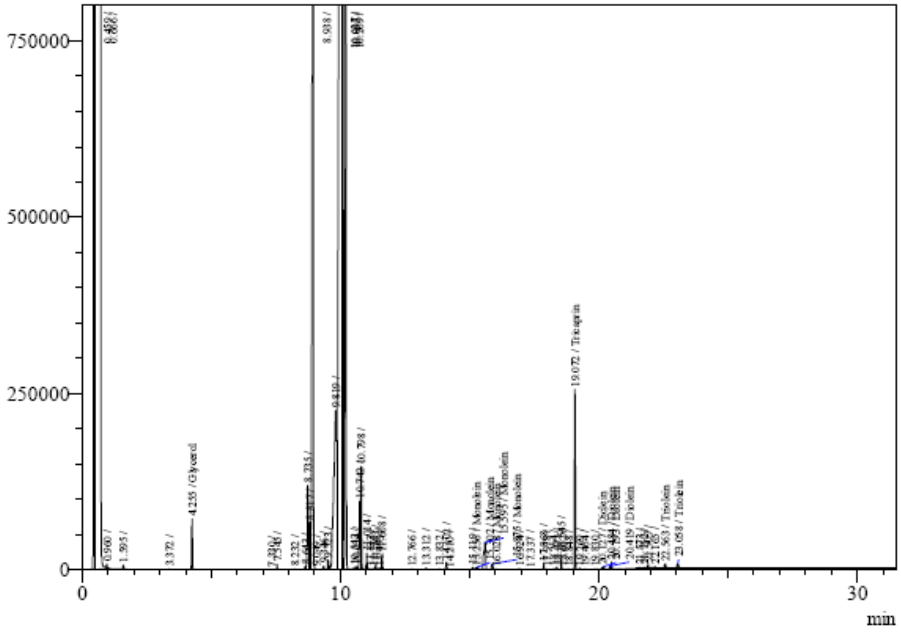


(ข)

ภาพผนวกที่ ช22 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 20 นาที (ก) และ 30 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

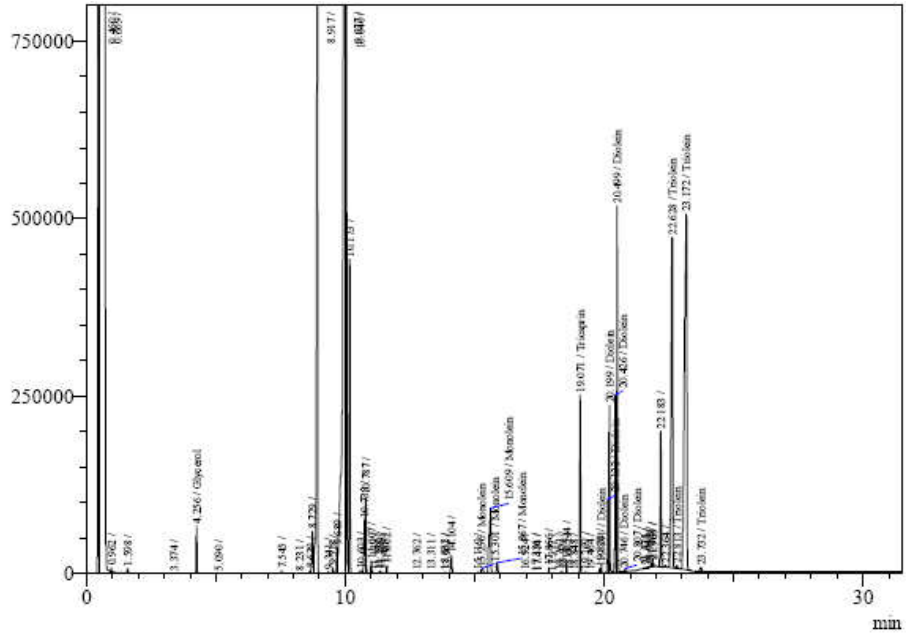


(ก)

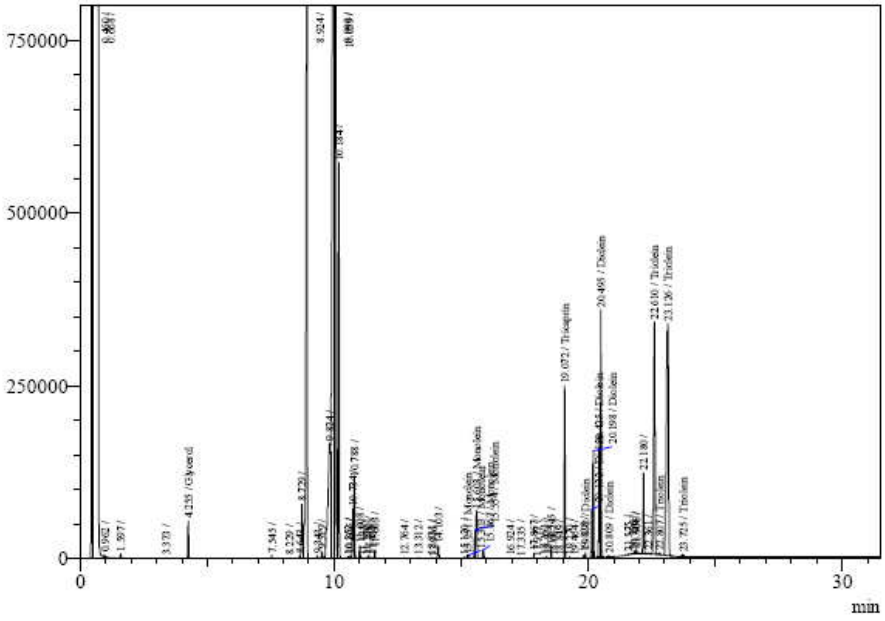


(ข)

ภาพผนวกที่ ช23 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 60 นาที (ก) และ 90 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

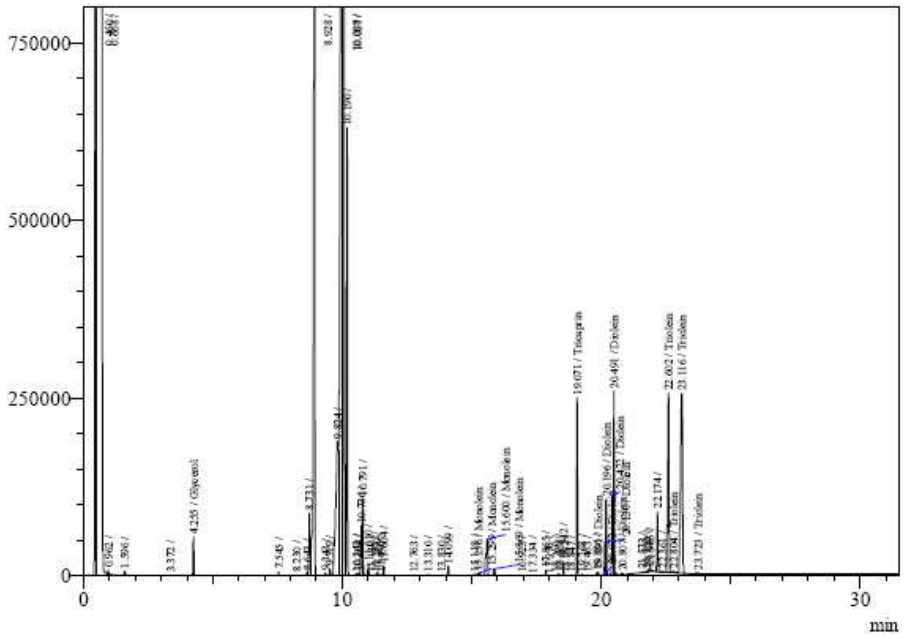


(ก)

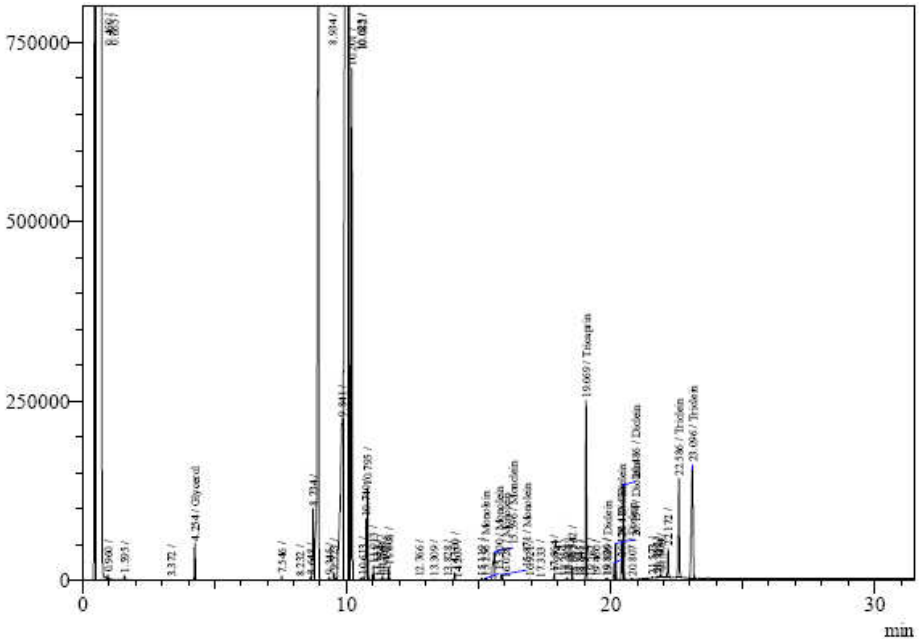


(ข)

ภาพผนวกที่ ช24 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นที่เวลา 12 นาที (ก) และ 20 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

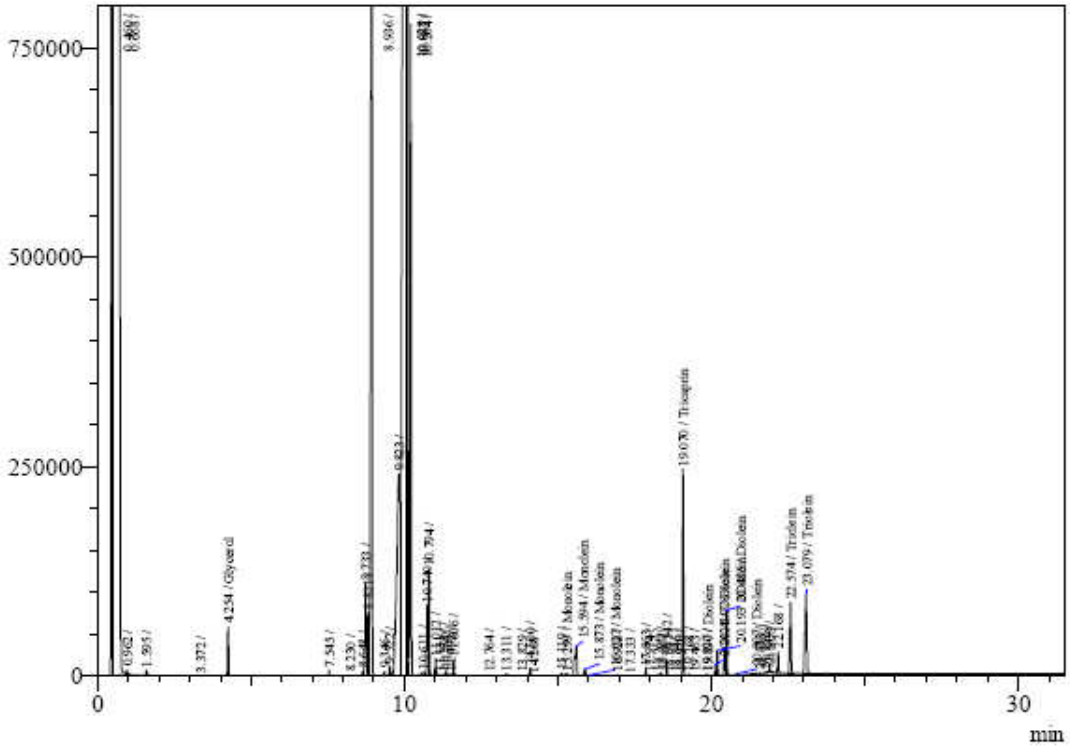


(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ช25 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 30 นาที (ก) และ 60 นาที (ข) ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพผนวกที่ ช26 โครมาโทแกรมของน้ำมันชั้นบน จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ที่เวลา 90 นาที ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ภาคผนวก ซ

Code ของ MATLAB Version 7.5.0.342 R2007b สำหรับการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้และปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น

Code ของสมการเชิงอนุพันธ์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้ ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Transesterification of jatropha oil
%Irreversable reaction
%TG --r1--> DG + FAME
%DG --r2--> MG + FAME
%MG --r3-->  G + FAME
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%dTG/dt = -r1
%dDG/dt = r1 - r2
%dMG/dt = r2 - r3
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%r1 = k1*TG
%r2 = k2*DG
%r3 = k3*MG
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%The catalyst is KOH
%Temperature = 40 C
%Speed = 600 RPM
function obj = Transesterification_40_psuedo1_order(k)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
obj = 0;
rho = [];
%Initial Condition
h = 0.01;
t(1) = 0;
t0 = 0; % Initial time (min)
tf = 90; % final time (min)
n = (tf-t0)/h; %number of loops
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Initial Value
MG(1) = 0.00; %0;
DG(1) = 0.00; %0;
TG(1) = 0.93; %100;
%FAME(1) = 0.00;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Experiment Data in (Mole)
ti  = [0 12 20 30 60 90];
MGi = [0 0.098317347 0.073377139 0.050922933 0.038733506 0.03480402 ];
DGi = [0 0.223003302 0.147610235 0.097210108 0.045245046
0.024486637 ];
TGi = [0.93 0.532507711 0.347271455 0.235298433 0.119045002
0.068424511 ];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Numerical Method:Ruang_Kutta_4
tic
for i = 1:n
    RK1TG = -k(1)*TG(i);
    RK1DG = k(1)*TG(i) - k(2)*DG(i);
    RK1MG = k(2)*DG(i) - k(3)*MG(i);
    %RK1FAME = k(1)*TG(i) + k(2)*DG(i) + k(3)*MG(i);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    fTG1 = TG(i)+ RK1TG*h/2;
    fDG1 = DG(i)+ RK1DG*h/2;
    fMG1 = MG(i)+ RK1MG*h/2;
    %fFAME1 = FAME(i) + RK1FAME*h/2;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    RK2TG = -k(1)*fTG1;
    RK2DG = k(1)*fTG1 - k(2)*fDG1;
    RK2MG = k(2)*fDG1 - k(3)*fMG1;
    %RK2FAME = k(1)*fTG1 + k(2)*fDG1 + k(3)*fMG1);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    fTG2 = TG(i)+ RK2TG*h/2;
    fDG2 = DG(i)+ RK2DG*h/2;
    fMG2 = MG(i)+ RK2MG*h/2;
    %fFAME2 = FAME(i) + RK2FAME*h/2;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    RK3TG = -k(1)*fTG2;
    RK3DG = k(1)*fTG2 - k(2)*fDG2;
    RK3MG = k(2)*fDG2 - k(3)*fMG2;
    %RK2FAME = k(1)*fTG1 + k(2)*fDG1 + k(3)*fMG1);
     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    fTG3 = TG(i)+ RK3TG*h;
    fDG3 = DG(i)+ RK3DG*h;
    fMG3 = MG(i)+ RK3MG*h;
    %fFAME2 = FAME(i) + RK2FAME*h/2;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    RK4TG = -k(1)*fTG3;
    RK4DG = k(1)*fTG3 - k(2)*fDG3;
    RK4MG = k(2)*fDG3 - k(3)*fMG3;
    %RK2FAME = k(1)*fTG1 + k(2)*fDG1 + k(3)*fMG1);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    TG(i+1) = TG(i) +  (RK1TG + 2*RK2TG + 2*RK3TG + RK4TG)*h/6;
    DG(i+1) = DG(i) +  (RK1DG + 2*RK2DG + 2*RK3DG + RK4DG)*h/6;
    MG(i+1) = MG(i) +  (RK1MG + 2*RK2MG + 2*RK3MG + RK4MG)*h/6;
    %FAME(i+1) = FAME(i) +  (RK1 + 2*RK2 + 2*RK3)*h/6;
    t(i+1) = t(i) + h;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end
%size(Gi);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
MGs = [MG(1), MG(1201), MG(2001), MG(3001), MG(6001), MG(9001)];
DGs = [DG(1), DG(1201), DG(2001), DG(3001), DG(6001), DG(9001)];
TGs = [TG(1), TG(1201), TG(2001), TG(3001), TG(6001), TG(9001)];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Least Square Error
eMG = MGi - MGs;
eDG = DGi - DGs;
eTG = TGi - TGs;
%eFAME = FAMEi - FAMEs;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
for i = 1:size(ti,2)
    rho = eMG(i)^2 +  eDG(i)^2 + eTG(i)^2 ;
    obj = obj + rho;
end
obj;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
toc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Plot
%plot(ti,TGi,'<r',ti,DGi,'sb',ti,MGi,'ok',ti,TGs,'-r',ti,DGs,'-
b',ti,MGs,'-k');%
%xlabel('Time (min)');
%ylabel('Concentration (mole/L)');
%legend('Experiment of TG','Experiment of DG','Experiment of MG',...
    %'Calculation of TG','Calculation of DG','Calculation of MG');
```

Code ของสมการเชิงอนุพันธ์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้ ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Transesterification of jatropha oil
%Irreversable reaction
%TG --r1--> DG + FAME
%DG --r2--> MG + FAME
%MG --r3-->  G + FAME
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%dTG/dt = -r1
%dDG/dt = r1 - r2
%dMG/dt = r2 - r3
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%r1 = k1*TG
%r2 = k2*DG
%r3 = k3*MG
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%The catalyst is KOH
%Temperature = 50 C
%Speed = 600 RPM
function obj = Transesterification_50_psuedo1_order(k)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
obj = 0;
rho = [];
%Initial Condition
h = 0.01;
t(1) = 0;
t0 = 0; % Initial time (min)
tf = 90; % final time (min)
n = (tf-t0)/h; %number of loops
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Initial Value
MG(1) = 0.00; %0;
DG(1) = 0.00; %0;
TG(1) = 0.93; %100;
%FAME(1) = 0.00;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Experiment Data in (Mole)
ti  = [0 7 12 20 30 60 90];
MGi = [0 0.111709678 0.066159716 0.046191511 0.04282338 0.038733506
0.038172151 ];
DGi = [0 0.186549512 0.090812284 0.046671899 0.027156233 0.008653173
0.005155082 ];
TGi = [0.93 0.392681013 0.184243698 0.103846448 0.065043609
0.026581961 0.018858614 ];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Numerical Method:Ruang_Kutta_4
tic
for i = 1:n
    RK1TG = -k(1)*TG(i);
    RK1DG = k(1)*TG(i) - k(2)*DG(i);
    RK1MG = k(2)*DG(i) - k(3)*MG(i);
    %RK1FAME = k(1)*TG(i) + k(2)*DG(i) + k(3)*MG(i);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    fTG1 = TG(i)+ RK1TG*h/2;
    fDG1 = DG(i)+ RK1DG*h/2;
    fMG1 = MG(i)+ RK1MG*h/2;
    %fFAME1 = FAME(i) + RK1FAME*h/2;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    RK2TG = -k(1)*fTG1;
    RK2DG = k(1)*fTG1 - k(2)*fDG1;
    RK2MG = k(2)*fDG1 - k(3)*fMG1;
    %RK2FAME = k(1)*fTG1 + k(2)*fDG1 + k(3)*fMG1);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    fTG2 = TG(i)+ RK2TG*h/2;
    fDG2 = DG(i)+ RK2DG*h/2;
    fMG2 = MG(i)+ RK2MG*h/2;
    %fFAME2 = FAME(i) + RK2FAME*h/2;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    RK3TG = -k(1)*fTG2;
    RK3DG = k(1)*fTG2 - k(2)*fDG2;
    RK3MG = k(2)*fDG2 - k(3)*fMG2;
    %RK2FAME = k(1)*fTG1 + k(2)*fDG1 + k(3)*fMG1);
     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    fTG3 = TG(i)+ RK3TG*h;
    fDG3 = DG(i)+ RK3DG*h;
    fMG3 = MG(i)+ RK3MG*h;
    %fFAME2 = FAME(i) + RK2FAME*h/2;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    RK4TG = -k(1)*fTG3;
    RK4DG = k(1)*fTG3 - k(2)*fDG3;
    RK4MG = k(2)*fDG3 - k(3)*fMG3;
    %RK2FAME = k(1)*fTG1 + k(2)*fDG1 + k(3)*fMG1);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    TG(i+1) = TG(i) +  (RK1TG + 2*RK2TG + 2*RK3TG + RK4TG)*h/6;
    DG(i+1) = DG(i) +  (RK1DG + 2*RK2DG + 2*RK3DG + RK4DG)*h/6;
    MG(i+1) = MG(i) +  (RK1MG + 2*RK2MG + 2*RK3MG + RK4MG)*h/6;
    %FAME(i+1) = FAME(i) +  (RK1 + 2*RK2 + 2*RK3)*h/6;
    t(i+1) = t(i) + h;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end
%size(Gi);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
MGs = [MG(1), MG(701), MG(1201), MG(2001), MG(3001), MG(6001),
MG(9001)];
DGs = [DG(1), DG(701), DG(1201), DG(2001), DG(3001), DG(6001),
DG(9001)];
TGs = [TG(1), TG(701), TG(1201), TG(2001), TG(3001), TG(6001),
TG(9001)];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Least Square Error
eMG = MGi - MGs;
eDG = DGi - DGs;
eTG = TGi - TGs;
%eFAME = FAMEi - FAMEs;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i = 1:size(ti,2)
    rho = eMG(i)^2 +  eDG(i)^2 + eTG(i)^2 ;
    obj = obj + rho;
end
obj;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
toc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Plot
%plot(ti,TGi,'<r',ti,DGi,'sb',ti,MGi,'ok',ti,TGs,'-r',ti,DGs,'-
b',ti,MGs,'-k');%
%xlabel('Time (min)');
%ylabel('Concentration (mole/L)');
%legend('Experiment of TG','Experiment of DG','Experiment of MG',...
    %'Calculation of TG','Calculation of DG','Calculation of MG');
```

Code ของสมการเชิงอนุพันธ์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่แท้ ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Transesterification of jatropha oil
%Irreversable reaction
%TG --r1--> DG + FAME
%DG --r2--> MG + FAME
%MG --r3-->  G + FAME
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%dTG/dt = -r1
%dDG/dt = r1 - r2
%dMG/dt = r2 - r3
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%r1 = k1*TG
%r2 = k2*DG
%r3 = k3*MG
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%The catalyst is KOH
%Temperature = 60 C
%Speed = 600 RPM
function obj = Transesterification_60_pseudo1_order(k)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
obj = 0;
rho = [];
```

```
%Initial Condition
h = 0.01;
t(1) = 0;
t0 = 0; % Initial time (min)
tf = 90; % final time (min)
n = (tf-t0)/h; %number of loops
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Initial Value
MG(1) = 0.00; %0;
DG(1) = 0.00; %0;
TG(1) = 0.93; %100;
%FAME(1) = 0.00;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Experiment Data in (Mole)
ti  = [0 7 12 20 30 60 90];
MGi = [0 0.093666119 0.057899775 0.05220603 0.046752866 0.045148994
0.045229187 ];
DGi = [0 0.105863281 0.041516817 0.021817041 0.011552906 0.005523302
0.004510696 ];
TGi = [0.93 0.26132208 0.082134228 0.04745671 0.029993881 0.018765562
0.016532305 ];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Numerical Method:Ruang_Kutta_4
tic
for i = 1:n
    RK1TG = -k(1)*TG(i);
    RK1DG = k(1)*TG(i) - k(2)*DG(i);
    RK1MG = k(2)*DG(i) - k(3)*MG(i);
    %RK1FAME = k(1)*TG(i) + k(2)*DG(i) + k(3)*MG(i);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    fTG1 = TG(i)+ RK1TG*h/2;
    fDG1 = DG(i)+ RK1DG*h/2;
    fMG1 = MG(i)+ RK1MG*h/2;
    %fFAME1 = FAME(i) + RK1FAME*h/2;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    RK2TG = -k(1)*fTG1;
    RK2DG = k(1)*fTG1 - k(2)*fDG1;
    RK2MG = k(2)*fDG1 - k(3)*fMG1;
    %RK2FAME = k(1)*fTG1 + k(2)*fDG1 + k(3)*fMG1);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    fTG2 = TG(i)+ RK2TG*h/2;
    fDG2 = DG(i)+ RK2DG*h/2;
    fMG2 = MG(i)+ RK2MG*h/2;
    %fFAME2 = FAME(i) + RK2FAME*h/2;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    RK3TG = -k(1)*fTG2;
    RK3DG = k(1)*fTG2 - k(2)*fDG2;
    RK3MG = k(2)*fDG2 - k(3)*fMG2;
    %RK2FAME = k(1)*fTG1 + k(2)*fDG1 + k(3)*fMG1);
     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    fTG3 = TG(i)+ RK3TG*h;
    fDG3 = DG(i)+ RK3DG*h;
    fMG3 = MG(i)+ RK3MG*h;
    %fFAME2 = FAME(i) + RK2FAME*h/2;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    RK4TG = -k(1)*fTG3;
    RK4DG = k(1)*fTG3 - k(2)*fDG3;
    RK4MG = k(2)*fDG3 - k(3)*fMG3;
    %RK2FAME = k(1)*fTG1 + k(2)*fDG1 + k(3)*fMG1);
```

```
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
 TG(i+1) = TG(i) +  (RK1TG + 2*RK2TG + 2*RK3TG + RK4TG)*h/6;
    DG(i+1) = DG(i) +  (RK1DG + 2*RK2DG + 2*RK3DG + RK4DG)*h/6;
    MG(i+1) = MG(i) +  (RK1MG + 2*RK2MG + 2*RK3MG + RK4MG)*h/6;
    %FAME(i+1) = FAME(i) +  (RK1 + 2*RK2 + 2*RK3)*h/6;
    t(i+1) = t(i) + h;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end
%size(Gi);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
MGs = [MG(1), MG(701), MG(1201), MG(2001), MG(3001), MG(6001),
MG(9001)];
DGs = [DG(1), DG(701), DG(1201), DG(2001), DG(3001), DG(6001),
DG(9001)];
TGs = [TG(1), TG(701), TG(1201), TG(2001), TG(3001), TG(6001),
TG(9001)];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Least Square Error
eMG = MGi - MGs;
eDG = DGi - DGs;
eTG = TGi - TGs;
%eFAME = FAMEi - FAMEs;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i = 1:size(ti,2)
    rho = eMG(i)^2 +  eDG(i)^2 + eTG(i)^2 ;
    obj = obj + rho;
end
obj;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
toc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Plot
%plot(ti,TGi,'<r',ti,DGi,'sb',ti,MGi,'ok',ti,TGs,'-r',ti,DGs,'-
b',ti,MGs,'-k');%
%xlabel('Time (min)');
%ylabel('Concentration (mole/L)');
%legend('Experiment of TG','Experiment of DG','Experiment of MG',...
     %'Calculation of TG','Calculation of DG','Calculation of MG');
```

Code ของสมการเชิงอนุพันธ์ปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Transesterification of jatropha oil
%Irreversable reaction
%TG --r1--> DG + FAME
%DG --r2--> MG + FAME
%MG --r3-->  G + FAME
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%dTG/dt = -r1
%dDG/dt = r1 - r2
%dMG/dt = r2 - r3
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%r1 = k1*TG^2
%r2 = k2*DG^2
%r3 = k3*MG^2
```

```
%%%
```

```
    fMG3 = MG(i)+ RK3MG*h;
    %fFAME2 = FAME(i) + RK2FAME*h/2;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    RK4TG = -k(1)*fTG3^2;
    RK4DG = k(1)*fTG3^2 - k(2)*fDG3^2;
    RK4MG = k(2)*fDG3^2 - k(3)*fMG3^2;
    %RK2FAME = k(1)*fTG1 + k(2)*fDG1 + k(3)*fMG1);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    TG(i+1) = TG(i) +  (RK1TG + 2*RK2TG + 2*RK3TG + RK4TG)*h/6;
    DG(i+1) = DG(i) +  (RK1DG + 2*RK2DG + 2*RK3DG + RK4DG)*h/6;
    MG(i+1) = MG(i) +  (RK1MG + 2*RK2MG + 2*RK3MG + RK4MG)*h/6;
    %FAME(i+1) = FAME(i) +  (RK1 + 2*RK2 + 2*RK3)*h/6;
    t(i+1) = t(i) + h;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end
%size(Gi);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
MGs = [MG(1), MG(1201), MG(2001), MG(3001), MG(6001), MG(9001)];
DGs = [DG(1), DG(1201), DG(2001), DG(3001), DG(6001), DG(9001)];
TGs = [TG(1), TG(1201), TG(2001), TG(3001), TG(6001), TG(9001)];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Least Square Error
eMG = MGi - MGs;
eDG = DGi - DGs;
eTG = TGi - TGs;
%eFAME = FAMEi - FAMEs;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i = 1:size(ti,2)
    rho = eMG(i)^2 +  eDG(i)^2 + eTG(i)^2 ;
    obj = obj + rho;
end
obj;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
toc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Plot
%plot(ti,TGi,'<r',ti,DGi,'sb',ti,MGi,'ok',ti,TGs,'-r',ti,DGs,'-
b',ti,MGs,'-k');%
%xlabel('Time (min)');
%ylabel('Concentration (mole/L)');
%legend('Experiment of TG','Experiment of DG','Experiment of MG',...
    %'Calculation of TG','Calculation of DG','Calculation of MG');
```

Code ของสมการเชิงอนุพันธ์ปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Transesterification of jatropha oil
%Irreversable reaction
%TG --r1--> DG + FAME
%DG --r2--> MG + FAME
%MG --r3-->  G + FAME
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%dTG/dt = -r1
%dDG/dt = r1 - r2
%dMG/dt = r2 - r3
```

```
%%%
```

```
    RK3MG = k(2)*fDG2^2 - k(3)*fMG2^2;
    %RK2FAME = k(1)*fTG1 + k(2)*fDG1 + k(3)*fMG1);
     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    fTG3 = TG(i)+ RK3TG*h;
    fDG3 = DG(i)+ RK3DG*h;
    fMG3 = MG(i)+ RK3MG*h;
    %fFAME2 = FAME(i) + RK2FAME*h/2;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    RK4TG = -k(1)*fTG3^2;
    RK4DG = k(1)*fTG3^2 - k(2)*fDG3^2;
    RK4MG = k(2)*fDG3^2 - k(3)*fMG3^2;
    %RK2FAME = k(1)*fTG1 + k(2)*fDG1 + k(3)*fMG1);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    TG(i+1) = TG(i) +  (RK1TG + 2*RK2TG + 2*RK3TG + RK4TG)*h/6;
    DG(i+1) = DG(i) +  (RK1DG + 2*RK2DG + 2*RK3DG + RK4DG)*h/6;
    MG(i+1) = MG(i) +  (RK1MG + 2*RK2MG + 2*RK3MG + RK4MG)*h/6;
    %FAME(i+1) = FAME(i) +  (RK1 + 2*RK2 + 2*RK3)*h/6;
    t(i+1) = t(i) + h;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end
%size(Gi);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
MGs = [MG(1), MG(701), MG(1201), MG(2001), MG(3001), MG(6001),
MG(9001)];
DGs = [DG(1), DG(701), DG(1201), DG(2001), DG(3001), DG(6001),
DG(9001)];
TGs = [TG(1), TG(701), TG(1201), TG(2001), TG(3001), TG(6001),
TG(9001)];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Least Square Error
eMG = MGi - MGs;
eDG = DGi - DGs;
eTG = TGi - TGs;
%eFAME = FAMEi - FAMEs;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i = 1:size(ti,2)
    rho = eMG(i)^2 +  eDG(i)^2 + eTG(i)^2 ;
    obj = obj + rho;
end
obj;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
toc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Plot
%plot(ti,TGi,'<r',ti,DGi,'sb',ti,MGi,'ok',ti,TGs,'-r',ti,DGs,'-
b',ti,MGs,'-k');%
%xlabel('Time (min)');
%ylabel('Concentration (mole/L)');
%legend('Experiment of TG','Experiment of DG','Experiment of MG',...
    %'Calculation of TG','Calculation of DG','Calculation of MG');
```

Code ของสมการเชิงอนุพันธ์ปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

```
%%%
```

```
    fMG1 = MG(i)+ RK1MG*h/2;
    %fFAME1 = FAME(i) + RK1FAME*h/2;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    RK2TG = -k(1)*fTG1^2;
    RK2DG = k(1)*fTG1^2 - k(2)*fDG1^2;
    RK2MG = k(2)*fDG1^2 - k(3)*fMG1^2;
    %RK2FAME = k(1)*fTG1 + k(2)*fDG1 + k(3)*fMG1);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    fTG2 = TG(i)+ RK2TG*h/2;
    fDG2 = DG(i)+ RK2DG*h/2;
    fMG2 = MG(i)+ RK2MG*h/2;
    %fFAME2 = FAME(i) + RK2FAME*h/2;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    RK3TG = -k(1)*fTG2^2;
    RK3DG = k(1)*fTG2^2 - k(2)*fDG2^2;
    RK3MG = k(2)*fDG2^2 - k(3)*fMG2^2;
    %RK2FAME = k(1)*fTG1 + k(2)*fDG1 + k(3)*fMG1);
     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    fTG3 = TG(i)+ RK3TG*h;
    fDG3 = DG(i)+ RK3DG*h;
    fMG3 = MG(i)+ RK3MG*h;
    %fFAME2 = FAME(i) + RK2FAME*h/2;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    RK4TG = -k(1)*fTG3^2;
    RK4DG = k(1)*fTG3^2 - k(2)*fDG3^2;
    RK4MG = k(2)*fDG3^2 - k(3)*fMG3^2;
    %RK2FAME = k(1)*fTG1 + k(2)*fDG1 + k(3)*fMG1);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    TG(i+1) = TG(i) + (RK1TG + 2*RK2TG + 2*RK3TG + RK4TG)*h/6;
    DG(i+1) = DG(i) + (RK1DG + 2*RK2DG + 2*RK3DG + RK4DG)*h/6;
    MG(i+1) = MG(i) + (RK1MG + 2*RK2MG + 2*RK3MG + RK4MG)*h/6;
    %FAME(i+1) = FAME(i) +  (RK1 + 2*RK2 + 2*RK3)*h/6;
    t(i+1) = t(i) + h;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end
%size(Gi);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
MGs = [MG(1), MG(701), MG(1201), MG(2001), MG(3001), MG(6001),
MG(9001)];
DGs = [DG(1), DG(701), DG(1201), DG(2001), DG(3001), DG(6001),
DG(9001)];
TGs = [TG(1), TG(701), TG(1201), TG(2001), TG(3001), TG(6001),
TG(9001)];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Least Square Error
eMG = MGi - MGs;
eDG = DGi - DGs;
eTG = TGi - TGs;
%eFAME = FAMEi - FAMEs;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i = 1:size(ti,2)
    rho = eMG(i)^2 +  eDG(i)^2 + eTG(i)^2 ;
    obj = obj + rho;
end
obj;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
toc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Plot
%plot(ti,TGi,'<r',ti,DGi,'sb',ti,MGi,'ok',ti,TGs,'-r',ti,DGs,'-
b',ti,MGs,'-k');%
%xlabel('Time (min)');
%ylabel('Concentration (mole/L)');
%legend('Experiment of TG','Experiment of DG','Experiment of MG',...
    %'Calculation of TG','Calculation of DG','Calculation of MG');
```

ภาคผนวก ฌ

ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ที่ได้จากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ โดยใช้โปรแกรม MATLAB Version 7.5.0.342 R2007b

ตารางผนวกที่ ฌ1 ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่แท้ (k_1 k_2 และ k_3) ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะอัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:12 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (ลิตร/โมล.นาที)		
	k_1	k_2	k_3
40	0.09008	0.6819	2.99681
50	0.2963	1.85033	4.29623
60	0.5576	4.28754	3.99836

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายวินัย โพธิ์สุวรรณวัฒนา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 7 กันยายน 2526
สถานที่เกิด	ชัยภูมิ
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิทยาศาสตร์บันฑิต (จุลชีววิทยา) มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง (ADB)