จลนศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอทิเลชันของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

นายณัฐพงศ์ แป้นทอง วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.ธนิต คูสำราญ)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.คณิต กฤษณังกูร)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร.เก้ากันยา สุดประเสริฐ)

..... กรรมการ

(ผศ. ดร.รัตนชัย ไพรินทร์)

..... กรรมการ

(ผศ. ดร.กรณ์กนก อายุสุข)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	จลนศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอทิเลชันของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายณัฐพงศ์ แป้นทอง
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร.คณิต กฤษณังกูร
	ดร.เก้ากันยา สุดประเสริฐ
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
สายวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการทดลองเพื่อศึกษาจลนศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอทิเลชันของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องชนิดท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ยาว 31 เมตร โดยมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พารามิเตอร์หลักที่ศึกษาคือ อุณหภูมิของปฏิกิริยา (T) ที่ 30, 40, 45, 50 และ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม (M_R)ที่ 3:1, 6:1, 9:1, 12:1 และ 15:1 และร้อยละปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (C) ที่ 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเอทานอล วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีไฮเพอร์ฟอร์มานซ์ลิควิดโครมาโตกราฟี จากผลการทดลองพบว่าผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อัตราส่วนสารตั้งต้นและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีอันตรกิริยากัน ผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปัจจัยทั้งสาม โดยภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาคืออุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 และร้อยละปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเอทานอล สำหรับการศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาที่ช่วงเริ่มต้นของปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นอันดับหนึ่งกับความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ และความสัมพันธ์ของค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (k) กับ T, M_R และ C มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\ln k = \left(-0.2388C + 0.79\right)M_R - 1.296C^2 + 1.0584C + 3.3915$$

$$- \frac{\left(-0.8377C + 1.7185\right)M_R - 6.9956C + 19.953}{RT}$$

คำสำคัญ : เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง/จลนศาสตร์/ทรานส์เอทิเลชัน/ไบโอดีเซล/เอทานอล

Thesis Title	Kinetics of Trans-ethylation of Palm Oil in a Continuous Reactor
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Nuttapong Pantong
Thesis Advisors	Assoc. Prof. Dr. Kanit Krisnangkura
	Dr. Kaokanya Sudaprasert
Program	Master of Engineering
Field of Study	Energy Technology
Department	Energy Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2555

Abstract

The aim of this study was to investigate the kinetics of the continuous process for trans-ethylation of palm oil using potassium hydroxide as a catalyst in a stainless steel tubular reactor, 31 meters (length) × 8 millimeters (i.d.). The process variables were temperature, T, (30, 40, 45, 50 and 60^{o}C), ethanol/oil molar ratio, M_R, (3:1, 6:1, 9:1, 12:1 and 15:1), catalyst concentration, C, (0.25, 0.5, 0.75 and 1%w/v based on ethanol). Analysis of reaction product was conducted by using High Performance Liquid Chromatography (HPLC). The results showed that the change in temperature, M_R and catalyst concentration affected the transethyalation rate. Percentage of conversions of triglyceride to biodiesel were increased as these three parameters were increased. The optimum conditions for trans-ethyaltion were temperature, 40 ^{o}C; M_R, 9:1 and KOH, 0.75% (w/v, based on ethanol). At the initial stage, the reaction was assumed to be irreversible. The reaction kinetics was in first order in triglyceride concentration. The relationship between reaction rate constant (k) and T, M_R and C can be expressed as

$$\ln k = \left(-0.2388C + 0.79\right)M_R - 1.296C^2 + 1.0584C + 3.3915 - \frac{\left(-0.8377C + 1.7185\right)M_R - 6.9956C + 19.953}{RT}$$

Keywords: Biodiesel/Continuous reactor/Ethanol/Kinetics/Trans-ethylation

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและกรุณาจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร.คณิต กฤษณังกูร และ ดร.เก้ากันยา สุดประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษา ให้แนวทางในการวิจัย เอื้อเฟื้อเอกสารทางวิชาการ ตลอดจนวิธีการแก้ปัญหาต่างๆ เพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณ รศ. ดร.ธนิต คูสำราญ ผศ. ดร.รัตนชัย ไพรินทร์ และ ผศ. ดร.กรณ์กนก อายุสุข ที่กรุณาให้คำแนะนำ รวมทั้งข้อเสนอแนะ เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องในงานวิจัย ตลอดจนร่วมเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ได้มอบทุนการศึกษา เพื่อสนับสนุนด้านค่าใช้จ่ายในการเรียนของผู้วิจัย

ขอขอบคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี รวมทั้งพี่ๆ เพื่อนๆ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยีทุกท่านที่ได้มีส่วนช่วยเหลือ ขอขอบคุณครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจและเป็นแรงผลักดันให้ผู้วิจัยทำงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ฌ
รายการรูปประกอบ	ฎ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฒ

บทที่

1.	**บทนำ**	**1**
1.1	ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3	ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2.	**ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**	**4**
2.1	ความหมายไบโอดีเซล	4
2.2	เทคโนโลยีผลิตไบโอดีเซล	5
2.3	กระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล	5
2.3.1	กระบวนการแบบกะ	5
2.3.2	กระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง	6
2.4	จลนศาสตร์เบื้องต้น	6
2.4.1	ค่าคงที่อัตรา	6
2.4.2	อันดับปฏิกิริยาและกฎอัตรา	7
2.5	เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ	8
2.5.1	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งผันกลับไม่ได้	9
2.5.2	ปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับไม่ได้	10
2.6	วัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซล	11
2.6.1	ไขมันและน้ำมัน	11
2.6.2	แอลกอฮอล์	13

หน้า

2.6.2.1 เมทานอล 13

2.6.2.2 เอทานอล 13

2.6.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา 14

2.7 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน 15

2.7.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอทิเลชัน 16

2.7.2 ขั้นตอนย่อยการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน 17

2.7.3 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน 17

2.7.4 แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน 18

2.8 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยา 24

2.8.1 อุณหภูมิ 24

2.8.2 เวลา 24

2.8.3 ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 25

2.8.4 อัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับไตรกลีเซอไรด์ 25

2.8.5 กรดไขมันอิสระ 26

2.8.6 ความชื้น 26

2.8.7 ความรุนแรงในการผสม 27

2.9 โครมาโตกราฟี 28

2.9.1 โครมาโตกราฟีแบบของเหลวสมรรถนะสูง 28

2.9.2 แก๊สโครมาโตกราฟี 29

3. การดำเนินการทดลอง 31

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี 31

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์ 31

3.1.2 สารเคมี 31

3.1.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง 32

3.2 วิธีการทดลอง 32

3.2.1 การออกแบบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ 33

3.2.2 ศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผล 34

3.2.2.1 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ 34

3.2.2.2 ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนเอทานอลต่อน้ำมัน 34

หน้า

3.2.2.3 ศึกษาผลกระทบความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเอทานอล 34
3.2.3 การหาอันดับการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม 36
3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ 37
3.3.1 ค่าสะปอนิฟิเคชัน 37
3.3.2 การคำนวณหาค่าไอโอดีน 38
3.3.3 วิเคราะห์ค่าซีเทน 38
3.3.4 วิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนในกระบวนการสันดาป 38

4. ผลการทดลอง 39
4.1 ผลการวิเคราะห์น้ำมันปาล์ม 39
4.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิ 40
4.2.1 อัตราส่วนโมลของเอทานอลต่อน้ำมันปาล์มคงที่ 40
4.2.2 ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์คงที่ 43
4.3 การศึกษาผลของอัตราส่วนโมลของเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 46
4.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 49
4.5 อันดับของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน 52
4.6 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา 56
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ปฏิกิริยากับสัดส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมัน 59
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ปฏิกิริยากับความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 59
4.9 แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ 60

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 61
5.1 สรุปผลการทดลอง 61
5.2 ข้อเสนอแนะ 62

เอกสารอ้างอิง 63

ภาคผนวก
ก. ตัวอย่างการคำนวณมวลโมเลกุลน้ำมันปาล์ม 66
ข. ตัวอย่างการคำนวณปริมาณสาร 68

หน้า

ค. ตัวอย่างโครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโตกราฟ ของเหลวสมรรถนะภาพสูง 71
ง. ผลการทดลอง (ข้อมูลดิบ) 73
จ. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยา 79
ฉ. ตัวอย่างการคำนวณพลังงานกระตุ้น 88
ช. การคำนวณสมบัติไบโอดีเซล 91
ซ. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 95

ประวัติผู้วิจัย **100**

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	เปรียบเทียบสมบัติของเอทิลเอสเทอร์กับเมทิลเอสเทอร์	4
2.2	องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช	12
2.3	พลังงานก่อกัมมันต์ (cal/mol) ที่ความเร็วของใบกวนต่างกันของ Noueddini และ Zhu	19
2.4	ค่าคงที่ปฏิกิริยาเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เรย์โนลด์นัมเบอร์ 6200 ของ Noueddini และ Zhu	19
2.5	ค่าคงที่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากการทดลองของ Kumar และคณะ	21
2.6	ค่าคงที่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของการเปลี่ยนแปลง Triglyceride, Diglyceride และMonoglycerideที่อุณหภูมิแตกต่างกัน Darnokoและ Cheryan	23
2.7	พลังงานก่อกัมมันต์ของการย่อย Triglyceride, Diglyceride และ Monoglyceride ในระหว่างปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม Darnoko และ Cheryan	23
3.1	ปริมาตรของแอลกอฮอล์และน้ำมันปาล์มที่ใช้ในอัตราส่วนต่างๆ	35
3.2	ปริมาณร้อยละความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเอทานอล	35
4.1	องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปาล์มและคุณสมบัติเชิงเชื้อเพลิง	40
4.2	เปรียบเทียบค่า R^2 ที่ได้จากการหาอันดับของปฏิกิริยา	55
4.3	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาที่สัดส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมัน 12:1 และร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร	56
4.4	ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาอันดับ 1	58
ก.1	องค์ประกอบของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์	67
ข.2	อัตราการป้อนน้ำมันปาล์มและเอทานอล ที่อัตราการไหล 0.5 ml/min	70
ง.3	ผลการทดลอง (ข้อมูลดิบ)	74
จ.1	ผลการทดลองที่สัดส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12:1, อุณหภูมิ 40°C ร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75	80
จ.2	ผลการคำนวณเพื่อหาค่า $ln(\frac{1}{1-x})$ กับ t ที่สัดส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12:1, อุณหภูมิ 40°C ร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75	81

ตาราง **หน้า**

จ.3 ผลการคำนวณเพื่อหาค่า $\frac{x}{[TG]_0 (1-x)}$ กับ t ที่สัดส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12:1, อุณหภูมิ 40°C ร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 82

จ.4 ผลการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา 83

ฉ.1 ผลการทดลองที่สัดส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12:1 ร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 89

ช.1 ผลการคำนวณค่าไอโอดีน 92

ช.2 ผลการคำนวณค่าสะปอนนิฟิเคชัน 93

ซ.1 ผลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln A กับ M_R 96

ซ.2 ผลของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Ea กับ M_R 98

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ	8
2.2	การเกิดไตรกลีเซอไรด์	11
2.3	น้ำมันปาล์ม	12
2.4	โครงสร้างโมเลกุลของเมทานอล	13
2.5	โครงสร้างโมเลกุลของเอทานอล	14
2.6	โครงสร้างโมเลกุลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	15
2.7	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	16
2.8	ปฏิกิริยาทรานส์เอทิเลชัน	17
2.9	ขั้นตอนย่อยของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	17
2.10	กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	18
2.11	เปรียบเทียบการทดลองกับแบบจำลองของ Noueddini และ Zhu	20
2.12	เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองของ Kumar และคณะ	21
2.13	เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองของ Darnoko และ Cheryan	23
2.14	หลักการแยกสารตัวอย่างด้วยโครมาโตกราฟีประเภทแยกขนาด	29
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	32
3.2	เครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ	33
3.3	แผนผังจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ	34
4.1	โครมาโตแกรมน้ำมันปาล์ม วิเคราะห์ด้วย HPLC โดยใช้คอลัมน์ Phenogel ต่อกับเครื่องตรวจวัดชนิด Evaporative Light Scattering Detector (ELSD) และใช้วัฏภาคเคลื่อนที่คือ ไอโซออกเทน 65%, โทลูอีน 35% และกรดอะซิติก 0.15% อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 30°C ที่ความดันแก๊สไนโตรเจน 2 bar	39
4.3	กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 15 : 1 และร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.25 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร	41
4.4	กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 15 : 1 และร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร	41

รูป **หน้า**

4.5 กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 15 : 1 และร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 42

4.6 กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 15 : 1 และร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 42

4.7 กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12 : 1 และร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 44

4.8 กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9 : 1 และร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 44

4.9 กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6 : 1 และร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 45

4.10 กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 3 : 1 และร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 45

4.11 กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียล และร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.25 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 47

4.12 กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียล และร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 47

4.13 กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียล และร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 48

4.14 กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียล และร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 48

รูป **หน้า**

4.15 กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียล และอัตราส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 3 : 1 49

4.16 กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียล และอัตราส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6 : 1 50

4.17 กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียล และอัตราส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9 : 1 50

4.18 กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียล และอัตราส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12 : 1 51

4.19 กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียล และอัตราส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 15 : 1 51

4.20 ผลการคำนวณค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาแบบปฏิกิริยาอันดับ 1 ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 40°C ร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สัดส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมัน 12:1 53

4.21 ผลการคำนวณค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาแบบปฏิกิริยาอันดับ 2 ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 40°C ร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สัดส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมัน 12:1 53

4.22 กลไกปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเกชันเสนอโดย Sridharan และ Mathai 54

4.23 เปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาแบบปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียบและปฏิกิริยาอันดับ 2 เทียม ตามลำดับ กับผลการทดลอง ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 40°C สัดส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 56

4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln k กับ 1/T ที่สัดส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมัน 12:1 และร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 57

4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง k กับอัตราส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม (M_R) ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส 59

รูป **หน้า**

4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln k กับร้อยละความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเอทานอล (C_{KOH}) ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส 60

ค.1 โครมาโตแกรมและตารางแสดงผลที่สัดส่วนโดยโมล (เอทานอล:น้ำมันปาล์ม) 15:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อุณหภูมิ 40 ^{O}C เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที 72

ฉ.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln k กับ 1/T ที่สัดส่วนโมลเอทานอลต่อน้ำมัน 12:1 และร้อยละความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 90

ซ.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln A กับ M_R 96

ซ.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความชันของรูปที่ ซ.1 (a) กับ C 97

ซ.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง จุดตัดแกน ln A ของรูปที่ ซ.1 (b) กับ C 97

ซ.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ea กับ M_R 98

ซ.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความชันของรูปที่ ซ.5 (c) กับ C 99

ซ.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง จุดตัดแกน Ea ของรูปที่ ซ.5 (d) กับ C 99

ประมวลศัพท์และคำย่อ

A	=	Frequency Factor
Ea	=	Activation Energy
CI	=	Cetane Index
C	=	Concentration of Potassium Hydroxide
^{o}C	=	Degree of Celsius
EtOH	=	Ethanol
M_R	=	Ethanol/Oil Molar Ratio
DG	=	Diglyceride
FFA	=	Fatty Acid
GC	=	Gas Chromatography
HG	=	Heat of Combustion
HPLC	=	High Performance Liquid Chromatography
IV	=	Iodine Value
F	=	Molar Flow Rate
MG	=	Monoglyceride
KOH	=	Potassium Hydroxide
r	=	Rate of Reaction
k	=	Reaction Rate Constant
τ	=	Reaction Time
SN	=	Saponification Number
T	=	Temperature (K)
TG	=	Triglyceride
x	=	Convertion of Triglyceride