



การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการผลิต  
น้ำมันไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง โดยการใช้ความร้อนจากไมโครเวฟ

โดย

นางสาวชนัญญา กล่อมเดช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการผลิต  
น้ำมันไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง โดยใช้การให้ความร้อนจากไมโครเวฟ

โดย

นางสาวชณัญญา กล่อมเดช



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

APPLICATION OF THE DESIGN OF EXPERIMENTS TO OPTIMIZE  
CONTINUOUS-FLOW PRODUCTION OF BIODIESEL  
BY USING MICROWAVE ASSISTED SYSTEM

BY

MISS CHANATDA KLOMDET



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING  
(ENERGY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY MANAGEMENT)  
DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
THAMMASAT UNIVERSITY  
ACADEMIC YEAR 2017  
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวชนัญญา กล่อมเดช

เรื่อง

การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล  
แบบต่อเนื่อง โดยใช้การให้ความร้อนจากไมโครเวฟ

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2561

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.มาลี สันติคุณากรณ์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ อัสวเทศานุกาพ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณี มังคละศิริ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สกรณ์ คล่องบุญจิต)

คณบดี

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีร เจียศิริพงษ์กุล)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง โดยการใช้ความร้อนจากไมโครเวฟ
ชื่อผู้เขียน	นางสาวชนัญญา กล่อมเดช
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	เทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญณรงค์ อัครเทศานุกภาพ
ปีการศึกษา	2560

### บทคัดย่อ

ในการศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล โดยการใช้การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่ได้รับพลังงานความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ และใช้กระบวนการให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ออกมามีคุณภาพคงที่ภายใต้ตัวแปรหลัก 2 ตัว คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้น และอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ซึ่งแต่ละปัจจัยแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ ที่อัตราการไหล 700 ml/min, 850 ml/min, 1000 ml/min และอัตราส่วนโมลที่ 6:1, 7.5:1, 9:1 โดยอาศัยการออกแบบการทดลองประเภทแฟคทอเรียลเต็มรูป 3 ระดับ 2 ปัจจัย และวิธีพื้นผิวสะท้อน ซึ่งเป็นวิธีทางสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์ ในทุกการทดลองจะตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส และใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้น 2%wt เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ค่า %FAME ในการวัดประสิทธิภาพของไบโอดีเซล

จากการศึกษาจะได้สมการถดถอย  $Y = -782.87 + 0.033X_1 + 1963.75X_2 + 8.52 \times 10^{-6}X_1^2 - 1083.33X_2^2 - 0.058X_1X_2$  (Y คือ ค่า %FAME,  $X_1$  คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้น,  $X_2$  คือ อัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน) โดยค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ได้จากสมการจะอยู่ที่อัตราการไหลของสารตั้งต้น 700 ml/min และอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันคือ 8:1 ซึ่งทำให้ได้ค่า %FAME เท่ากับ 97.91 %wt

**คำสำคัญ:** ไบโอดีเซล, ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากคลื่นไมโครเวฟ, การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป, วิธีพื้นผิวสะท้อน

Thesis Title	APPLICATION OF THE DESIGN OF EXPERIMENTS TO OPTIMIZE CONTINUOUS-FLOW PRODUCTION OF BIODIESEL BY USING MICROWAVE ASSISTED SYSTEM
Author	Miss Chanatda Klomdet
Degree	Master of Engineering
Department/Faculty/University	Energy and Environmental Technology Management Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Charnnarong Assavatesanupap, Ph.D.
Academic Years	2017

### ABSTRACT

The optimization of biodiesel using transesterification with microwave assisted system was aimed in this study and continuous-flow production was used to make constant quality of biodiesel. Flow rate of the reactants (700 ml/min, 850 ml/min, 1000 ml/min) and alcohol/oil molar ratio (6:1, 7.5:1, 9:1) were chosen as the variables. A  $3^2$  full factorial design of experiment and response surface method were used to analyze optimization of the biodiesel production. In all experiments, the temperature was set at 50 °C and potassium hydroxide (KOH) 2%wt was used for catalyst. %FAME was used to measure performance of biodiesel.

According to this study, regression equation was  $Y = -782.87 + 0.033X_1 + 1963.75X_2 + 8.52 \times 10^{-6}X_1^2 - 1083.33X_2^2 - 0.058X_1X_2$  ( $Y = \%FAME$ ,  $X_1 =$  flow rate of the reactants,  $X_2 =$  alcohol/oil molar ratio). From equation the optimum conditions were the flow rate at 700 ml/min and the alcohol/oil molar ratio 8:1. This results in %FAME value of 97.91 %wt.

**Keywords:** Biodiesel, Transesterification with microwave, Full factorial design, Response Surface Methodology

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ โดยได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ อัครเวศนุภาพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความกรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ มาโดยตลอด

ขอขอบคุณคณะกรรมการทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงคำแนะนำในเรื่องอื่นๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินชีวิต

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ สิ่งอำนวยความสะดวก และสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในเวลาที่ยากลำบากมาตลอด

สุดท้ายขอขอบคุณบิดา มารดา ผู้ที่คอยเป็นกำลังใจ และแรงผลักดันที่ดีเสมอมา และได้มอบโอกาสทางการศึกษานี้ให้แก่ข้าพเจ้า ได้สำเร็จการศึกษา

นางสาวชัญญา กล่อมเดช

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญภาพ	(9)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตในการศึกษา	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ไบโอดีเซล	4
2.1.1 คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันเชื้อเพลิง	5
2.1.1.1 ความหนาแน่น	5
2.1.1.2 ความหนืด	6
2.1.1.3 จุดวาบไฟ	6
2.1.1.4 กากถ่าน	6
2.1.1.5 จำนวนซีเทน	6
2.1.1.6 เถ้าซัลเฟต	7



	หน้า
2.1.1.7 ปริมาณน้ำและตะกอน	7
2.1.1.8 ค่าการกักกรองแผ่นทองแดง	7
2.1.1.9 ค่าความเป็นกรด	7
2.1.1.10 กลีเซอรินทั้งหมด	7
2.1.1.11 จุดขุ่น	7
2.1.1.12 จุดจุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ	7
2.1.2 วิธีผลิตไบโอดีเซล	12
2.1.2.1 การใช้โดยตรงและการผสม	12
2.1.2.2 การทำให้เป็นไมโครอิมัลชัน	12
2.1.2.3 การสลายโมเลกุลด้วยความร้อน	12
2.1.2.4 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	13
(1) ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยการแยกกลีเซอรอลแบบต่อเนื่อง	14
(2) ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เอนไซม์ไลเปส	14
(3) ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันภายใต้สภาวะเหนือวิกฤตยวดยิ่งของเมทานอล	14
(4) ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟ	14
2.1.3 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	14
2.1.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส	14
2.1.3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด	14
2.1.3.3 เอนไซม์ไลเปส	15
2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	15
2.1.4.1 ผลของน้ำและกรดไขมันอิสระ	15
2.1.4.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน	15
2.1.4.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา	15
2.1.4.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	16
2.1.4.5 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	16
2.1.4.6 ผลของอัตราการกวนผสม	16
2.2 ระบบการให้ความร้อน	16

	หน้า
2.2.1 ระบบการให้ความร้อนแบบทั่วไป	16
2.2.1.1 การนำความร้อน	16
2.2.1.2 การพาความร้อน	17
(1) การพาความร้อนแบบธรรมชาติ	17
(2) การพาความร้อนโดยอาศัยเครื่องมือ	17
2.2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน	17
2.2.2 การให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ	17
2.3 การออกแบบการทดลอง	20
2.3.1 การทดลองเดี่ยวหรือการทดลองเพียงครั้งเดียว	21
2.3.2 การทดลองอย่างต่อเนื่อง	21
2.3.2 การทดลองแบบค้ำตั้ง	21
2.3.2 การทดลองแบบเจาะจง	21
2.3.2 การทดลองเชิงลำดับ	21
2.4 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป	21
2.4.1 กรณีทดสอบปัจจัยหลัก	25
2.4.2 กรณีทดสอบปัจจัยร่วม	25
2.5 การวิเคราะห์วิธีพื้นผิวสะท้อน	26
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	33
3.1 วัตถุประสงค์	33
3.1.1 สารตั้งต้น	33
3.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา	33
3.1.3 แอลกอฮอล์	33
3.2 อุปกรณ์	34
3.2.1 เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง	34

	หน้า
3.2.2 แก๊สโครมาโตกราฟฟี	35
3.3 การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน	35
3.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ	36
3.4.1 การวิเคราะห์แฟคทอเรียลเต็มรูป	36
3.4.2 การหาสมการถดถอย และการวิเคราะห์พื้นผิวสะท้อน	37
 บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	 38
4.1 ผลการทดลองจากการผลิตไบโอดีเซล	38
4.2 การวิเคราะห์แฟคทอเรียลเต็มรูป	40
4.2.1 การสร้างกราฟผลกระทบร่วม	40
4.2.2 การสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน	41
4.3 การวิเคราะห์พื้นผิวสะท้อน	43
 บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	 45
5.1 สรุปผลการวิจัย	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
 รายการอ้างอิง	 48
 ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตาราง Percentage Point of the F Distribution	50
ภาคผนวก ข การใช้โปรแกรม Minitab 16 หาสมการถดถอย	54
ภาคผนวก ค การคำนวณค่าในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน	57
 ประวัติผู้เขียน	 59

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	ข้อดีและข้อเสียของไบโอดีเซล	1
2.1	ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ	5
2.2	กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549	8
2.3	กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2556	9
2.4	คุณสมบัติของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชต่างๆ เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล	11
2.5	การเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างตัวเร่งชนิดกรด ตัวเร่งชนิดเบส และเอนไซม์ไลเปส	15
2.6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับกรณีศึกษา 2 ปัจจัย ที่ a ระดับ และ b ระดับ ตามลำดับ โดยทำการทดลองซ้ำ n ครั้ง	24
3.1	องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์	33
4.1	ผลการทดลองในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ	39
4.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราการผลิตของสารตั้งต้นและอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน	41

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
2.1	กลไกการสลายตัวด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์	13
2.2	โครงสร้างของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน	13
2.3	สเปกตรัมของรังสีตามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	18
2.4	การตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุประเภทต่างๆ	18
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการ หรือระบบที่สนใจ	20
2.6	ตัวอย่างผลการทดลองของปัจจัย A และปัจจัย B จากระดับที่ 1 ไปสู่ระดับที่ 2	22
2.7	กราฟผลกระทบรวม กรณีไม่มีผลกระทบรวม	23
2.8	กราฟผลกระทบรวม กรณีมีผลกระทบรวม	23
2.9	กราฟความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติ	26
2.10	พื้นผิวสะท้อน	27
2.11	เส้นระดับของพื้นผิวสะท้อน	28
2.12	ขั้นตอนการหาพื้นผิวสะท้อน	29
3.1	แผนผังแสดงขั้นตอนในการทำวิจัย	32
3.2	ไดอะแกรมเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง	34
3.3	เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง	34
3.4	เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี	35
4.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตของสารตั้งต้น และ FAMEs ที่อัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 7.5:1	39
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมล และ FAMEs ที่อัตราการผลิตของสารตั้งต้น 1000 ml/min	40
4.3	กราฟผลกระทบรวมระหว่างอัตราการผลิตของสารตั้งต้น และอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมัน	41
4.4	กราฟความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติที่ได้จากการทดลอง	42
4.5	กราฟโครงสร้างความสัมพันธ์ของ %FAME ระหว่างอัตราการผลิตของสารตั้งต้น และอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน	43
4.6	กราฟพื้นผิวความสัมพันธ์ของ %FAME ระหว่างอัตราการผลิตของสารตั้งต้น และอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน	44

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากภาวะวิกฤติน้ำมันโลกที่ราคาน้ำมันพุ่งขึ้นสูงอย่างต่อเนื่อง ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ น้ำมันทั่วโลก ประเทศไทยก็ได้รับผลกระทบเช่นเดียวกัน เนื่องจากแหล่งพลังงานในประเทศไทยนั้น ไม่เพียงพอที่จะตอบสนองต่อความต้องการได้ทั้งหมด จึงจำเป็นต้องมีการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงมาจาก ต่างประเทศ ซึ่งถ้าคิดเป็นสัดส่วนแล้วอยู่ที่ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ของการบริโภคภายในประเทศ ทั้งหมด โดยเฉพาะน้ำมันดีเซลที่มีอัตราการนำเข้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ต้องสูญเสียเงินไปเป็น จำนวนมาก ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีความตื่นตัวและพยายามที่จะหาพลังงานมาทดแทน ซึ่ง พลังงานที่มีความเหมาะสมก็คือไบโอดีเซล[1,2]

ไบโอดีเซลเป็นพลังงานจากชีวมวลที่ผลิตขึ้นมาจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ สามารถ ย่อยสลายได้เองตามกระบวนการทางชีวภาพ สามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ต้อง ปรับแต่งเครื่องยนต์ และสามารถผลิตขึ้นได้เองภายในประเทศ ซึ่งวิธีการผลิตก็ไม่ได้ซับซ้อนเกินไป

ตารางที่ 1.1 ข้อดีและข้อเสียของไบโอดีเซล<sup>[3]</sup>

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ค่าซีเทนสูงกว่าน้ำมันดีเซล นั่นคือจุดติดไฟได้สมบูรณ์กว่า ทำให้การจุดระเบิดทำได้ดีขึ้น	1. ต้นทุนที่ใช้ในการผลิตค่อนข้างสูง
2. การสันดาปสมบูรณ์ จึงทำให้เกิด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้อยลง	2. เครื่องยนต์ให้กำลังต่ำกว่าการใช้ น้ำมันดีเซล
3. ไม่มีควันดำและ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	
4. ช่วยลดปริมาณมลพิษจากท่อไอเสีย	
5. ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการปรับแต่งเครื่องยนต์	
6. ช่วยเพิ่มการหล่อลื่นให้เครื่องยนต์	
7. ช่วยสร้างรายได้ให้เกษตรกร และลดการนำเข้าเชื้อเพลิง	

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นสามารถทำได้หลายวิธีแต่วิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายคือ การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Transesterification) เป็นวิธีที่นำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาทำการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการทางเคมีกับแอลกอฮอล์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งอาจเป็นกรดหรือเบส ร่วมกับการให้ความร้อน ทำให้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์เปลี่ยนไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวในรูปของเอสเทอร์ (Esters) หรือไบโอดีเซลนั่นเอง[3] ในการให้ความร้อนกับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยทั่วไปแล้วเป็นการให้ความร้อนแบบนำความร้อนหรือพาความร้อน ซึ่งต้องใช้เวลาในการผลิตค่อนข้างนาน และใช้พื้นที่มาก ดังนั้นจึงมีการค้นคว้าเพื่อนำความร้อนจากระบบไมโครเวฟมาใช้ เพื่อลดเวลาและพื้นที่ในการผลิตไบโอดีเซล

ในการผลิตไบโอดีเซลมีปัจจัยมากมายที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซล ซึ่งการที่จะได้ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆนั้นต้องมีการทดลองจำนวนมาก เพื่อที่จะลดเวลาและค่าใช้จ่ายต่างๆที่จะใช้ในการทดลองจึงได้มีการนำวิธีทางสถิติมาช่วยในการหาค่าเหมาะสมของปัจจัย โดยวิธีทางสถิตินี้เรียกว่า การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) ซึ่งการออกแบบการทดลองมีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการทดลอง ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการหาค่าเหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซลโดยใช้การให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจากไมโครเวฟ นอกจากนี้ยังใช้การออกแบบการทดลองมาช่วยวิเคราะห์เพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลองโดยปัจจัยที่นำมาศึกษาคืออัตราการใช้ของสารตั้งต้นและอัตราส่วนโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของอัตราการใช้ของสารตั้งต้น และอัตราส่วนโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง โดยใช้การให้ความร้อนจากไมโครเวฟ ซึ่งอาศัยการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ และวิธีพื้นผิวสะท้อนช่วยในการวิเคราะห์

### 1.3 ขอบเขตในการศึกษา

1.3.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน และปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตไบโอดีเซล

1.3.2 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง

1.3.3 ศึกษาปัจจัยที่จะนำมาวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราการไหลของสารตั้งต้น (700 ml/min - 1000 ml/min) และอัตราส่วนโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน (6:1 - 9:1)

1.3.4 ผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ แล้ววิเคราะห์หาค่าของเมทิลเอสเทอร์ (FAMES) โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี

1.3.5 ศึกษาผลกระทบร่วมของอัตราการไหลของสารตั้งต้น และอัตราส่วนโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน และผลกระทบของปัจจัยทั้งสองต่อค่าของเมทิลเอสเทอร์ (FAMES) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป

1.3.6 วิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย โดยใช้สมการถดถอยและวิธีพื้นผิวสะท้อน



## บทที่ 2

### วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล คือเชื้อเพลิงชีวภาพที่สามารถที่ย่อยสลายได้เองตามกระบวนการทางชีวภาพ โดยผลิตจากน้ำมันที่ได้จากพืช หรือไขมันสัตว์ มีคุณสมบัติทางกายภาพคล้ายกับน้ำมันดีเซล สามารถนำมาใช้แทนน้ำมันดีเซลได้ โดยไม่ต้องทำการเปลี่ยนแปลงระบบของเครื่องยนต์ ไบโอดีเซลจะให้การเผาไหม้ที่สะอาดกว่าน้ำมันดีเซล จึงมีคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่า จึงสามารถช่วยลดปริมาณมลพิษจากท่อไอเสียได้ และเนื่องจากในไบโอดีเซลมีกำมะถันน้อยกว่า เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล จึงช่วยลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก นอกจากนี้ไบโอดีเซลยังมีเขม่าคาร์บอนน้อย จึงไม่ทำให้เกิดการอุดตันของระบบไอเสีย และคุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ เป็นสารหล่อลื่นช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ได้[2]

น้ำมันพืชและไขมันสัตว์ที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล เป็นสารประกอบไม่ละลายน้ำ น้ำมันและไขมัน 1 โมล ประกอบด้วยกลีเซอรอล 1 โมล กับกรดไขมัน 3 โมล หรือที่เรียกว่าไตรกลีเซอไรด์ น้ำมันพืชและไขมันสัตว์มีกรดไขมันชนิดต่างๆ เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่ต่างกันไป โดยมีปริมาณของกรดไขมันอยู่ในโครงสร้างถึงร้อยละ 94-96 ของน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้คุณสมบัติทั้งทางเคมีและกายภาพของน้ำมันแต่ละชนิดแตกต่างกันออกไปตามคุณสมบัติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ น้ำมันพืชที่มีกรดไขมันอิ่มตัวในปริมาณสูง จะมีค่าไอโอดี้นต่ำ และเมื่อมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวลดลงหรือมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงขึ้น ค่าไอโอดี้นก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย น้ำมันชีวภาพเหล่านี้เป็นสารที่ไม่เสถียรอยู่ตัว เมื่อสัมผัสอากาศจะถูกออกซิไดส์ได้ง่าย และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ที่อุณหภูมิสูง เมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแล้ว น้ำมันจะมีสภาพเป็นสารเหนียวขึ้น โดยทั่วไปค่าไอโอดี้นของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์จะเป็นดัชนีชี้บอกถึงปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีอยู่ในน้ำมันนั้น ซึ่งบอกถึงความยากง่ายของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันด้วยเมื่อน้ำมันมีค่าไอโอดี้นสูง จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ง่าย ฉะนั้นการเลือกใช้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่มีค่าไอโอดี้นต่ำเป็นเชื้อเพลิง จะเป็นการป้องกันการเกิดสารเหนียวที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่องยนต์ได้เบื้องต้น[1]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ<sup>[1]</sup>

พืชวัตถุดิบ	ค่าไอโอดีน	องค์ประกอบกรดไขมันหลัก						
		C12:0	C14:0	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3
ปาล์ม	14.1 – 21.0	-	0.5	39.3	3.5	36.0	9.0	-
		-	2.0	47.5	6.0	44.0	12.0	-
มะพร้าว	6.3 – 10.6	45.1	16.8	7.5	2.0	5.0	1.0	-
		-	-	-	-	-	-	-
เมล็ดสบู่ดำ	101	53.2	21.0	10.2	4.0	10.0	2.5	-
		-	-	14.9	6.0	41.2	37.4	-
เมล็ดเรพ	94 – 120	-	-	1.5	0.5	8.0	11.0	5.0
		-	-	6.0	3.1	60.0	23.0	13.0
ถั่วเหลือง	124 – 139	-	-	8.0	2.0	17.7	49.8	5.0
		-	-	13.5	5.4	28.0	59.0	11.0

### 2.1.1 คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันเชื้อเพลิง

น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยความร้อนจากการอัดอากาศ เช่น เครื่องยนต์ดีเซล ต้องมีคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปเพื่อทำการเผาไหม้ คุณสมบัติสำคัญที่ควรคำนึงถึง คือ

#### 2.1.1.1 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นเป็นตัวบ่งชี้ประเภทของน้ำมันอย่างหยาบๆ นอกจากนั้น ยังบอกถึงปริมาณความร้อนที่จะได้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเชื้อเพลิง หากน้ำมันมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงแสดงว่ามีพวกออะโรมาติกมาก ทำให้การเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลไม่ดีนัก แต่ค่าความถ่วงจำเพาะของของเหลวจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดมาตรฐานไว้ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส การหาค่าความถ่วงจำเพาะมีประโยชน์ในการคำนวณหาน้ำหนักในการถ่ายเทหรือบรรจุน้ำมันลงในภาชนะต่างๆ<sup>[1]</sup>

### 2.1.1.2 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดหรือความข้นใสของน้ำมัน ในทางปฏิบัติขณะที่น้ำมันไหลออกจากช่องขนาดเล็กภายใต้แรงดึงดูดของโลก อุณหภูมิมีผลกระทบต่อความหนืดอย่างมาก การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยจะทำให้ความหนืดเปลี่ยนแปลงไปได้มาก ดังนั้นการวัดความหนืดจะต้องระบุอุณหภูมิที่วัดไว้ด้วย และขณะวัดจะต้องไม่ให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ความหนืดมีอิทธิพลต่อรูปร่างลักษณะของละอองฝอยน้ำมันที่ฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้อย่างมาก น้ำมันที่มีความหนืดสูงจะเกิดการแตกตัวเป็นละอองเล็กๆ ขึ้นได้ยาก แต่การวิ่งไปไกลหรือการทะลุทะลวงจะดีกว่า ในประเทศที่มีอากาศเย็นนั้นหากติดเครื่องครั้งแรกโดยใช้น้ำมันที่มีความหนืดสูง น้ำมันที่ฉีดเข้าไปอาจไม่เป็นละอองฝอยของเหลวที่ดีก็ได้ ทำให้เครื่องไม่ติดหรือติดยาก และมีควันไอเสียมาก แต่ถ้าน้ำมันมีความหนืดน้อยหรือใสเกินไป เมื่อฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้นอกจากจะแผ่กระจายในบริเวณใกล้ๆ หัวฉีดและทางเดินไม่ทั่วถึงแล้ว น้ำมันที่เหลือจากการเผาไหม้ยังผ่านแหวนลูกสูบและล้างน้ำมันเครื่องที่กระบอกสูบออกด้วย เช่นเดียวกับที่ปั๊มหัวฉีด ถ้าน้ำมันใสเกินไป จะทำให้การหล่อลื่นไม่ดี ส่งผลให้ลูกสูบบวม สึกหรือเร็ว[1]

### 2.1.1.3 จุดวาบไฟ (Flash point)

จุดวาบไฟคืออุณหภูมิที่ต่ำที่สุดของน้ำมันที่เมื่อได้รับความร้อนแล้วให้ไอระเหยออกมาผสมอย่างได้สัดส่วนพอเหมาะ และเมื่อสัมผัสกับเปลวไฟจะลุกติดไฟในขณะหนึ่ง แล้วดับไป ผลผลิตก้นน้ำมันเบาจะมีจุดวาบไฟต่ำ ส่วนผลผลิตก้นน้ำมันหนักนั้น ก็จะมีจุดวาบไฟสูง จุดวาบไฟจะแสดงให้เห็นว่าน้ำมันชนิดนั้นมีคุณสมบัติให้ไอระเหยไวไฟและระเบิดได้มากน้อยเพียงใด มีประโยชน์ในด้านความปลอดภัย การเก็บรักษา และการขนย้าย[1]

### 2.1.1.4 กากถ่าน (Carbon residue)

กากถ่านคือปริมาณคาร์บอนที่ตกค้างหลังการเผาไหม้ ซึ่งถ้าคาร์บอนดังกล่าวมีมากเกินไป จะทำให้เกิดผลเสียต่อการใช้งาน โดยทำให้เกิดการอุดตันที่หัวฉีด[1]

### 2.1.1.5 จำนวนซีเทน (Cetane number)

จำนวนซีเทนคือค่าความสามารถในการต้านการน็อกของน้ำมันดีเซล ซึ่งคุณสมบัตินี้จะวัดการติดไฟเร็วหรือช้าภายในกระบอกสูบ ค่าจำนวนซีเทนควรสูงพอเหมาะกับความเร็วยรอบของเครื่องยนต์ ซึ่งจะทำให้เครื่องยนต์ติดง่าย ไม่เกิดการน็อกของเครื่องยนต์ และเป็นการประหยัดเชื้อเพลิงด้วย น้ำมันเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลนั้น ต้องใช้เวลาเล็กน้อยในการระเหยและผสมกับอากาศในห้องเผาไหม้ เมื่อเกิดการลุกไหม้จึงมีการเผาไหม้อย่างรุนแรง ทำให้การเผาไหม้ไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงต้องหาวิธีลดช่วงเวลานี้ให้เหลือน้อยที่สุด โดยทั่วไปนั้นกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 0.003 วินาที ซึ่งค่าเวลานี้ยิ่งสั้นเท่าใดยิ่งดี น้ำมันที่มีค่าดัชนีซีเทนสูงจะมีช่วงเวลานี้สั้น และน้ำมันที่มีค่าดัชนีซีเทนต่ำจะมีช่วงเวลาที่นาน[1]

#### 2.1.1.6 เถ้าซัลเฟต (Sulfated ash)

เถ้าซัลเฟตคือดัชนีที่บ่งบอกถึงปริมาณโลหะตกค้างในไบโอดีเซล ซึ่งได้มาจากสารเร่งปฏิกิริยาที่เป็นต่าง[1]

#### 2.1.1.7 ปริมาณน้ำและตะกอน (Water and sediment)

เป็นการวัดปริมาตรน้ำและตะกอนของส่วนกลางของไบโอดีเซลที่มีความหนืดระหว่าง 1.0 – 4.1 มิลลิเมตรต่อวินาที ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และความหนาแน่นระหว่าง 700 – 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผลการวิเคราะห์นี้เป็นการแสดงถึงความสะอาดของเชื้อเพลิง โดยเฉพาะไบโอดีเซล ค่านี้มีความสำคัญมากเนื่องจากน้ำที่มีอยู่สามารถทำปฏิกิริยากับเอสเทอร์ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระได้ และทำให้มีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ภายในถังเก็บ สำหรับตะกอนจะมีผลต่อการกรองเชื้อเพลิง ทำให้อุดตัน ส่งผลกระทบถึงหัวฉีดเชื้อเพลิงและชิ้นส่วนต่างๆ ในเครื่องยนต์เสียหายได้[1]

#### 2.1.1.8 ค่าการกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper strip corrosion)

ค่าการกัดกร่อนแผ่นทองแดงเป็นการทดสอบการกัดกร่อนอุปกรณ์ที่ผลิตจากทองแดงของกรดในไบโอดีเซล[1]

#### 2.1.1.9 ค่าความเป็นกรด (Acid value)

ค่าความเป็นกรดคือปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีจะทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ และทำให้เกิดน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลเสียต่อคุณภาพของไบโอดีเซล และการทำงานของเครื่องยนต์[1]

#### 2.1.1.10 กลีเซอรินทั้งหมด (Total glycerine)

กลีเซอรินทั้งหมด เป็นดัชนีที่แสดงให้เห็นถึงความไม่สมบูรณ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และมีผลต่อการใช้งานในเครื่องยนต์เนื่องจากจะมีคาร์บอนตกค้างในห้องเครื่อง[1]

#### 2.1.1.11 จุดขุ่น (Cold point)

จุดขุ่นคืออุณหภูมิที่เชื้อเพลิงเริ่มเกิดความขุ่น เมื่อเชื้อเพลิงถูกทำให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิที่เป็นไขหรือของแข็งเริ่มตกผลึกแยกตัวออกจากเชื้อเพลิง วิธีนี้ใช้ตรวจสอบน้ำมันเชื้อเพลิงที่โปร่งแสงได้ในความหนา 40 มิลลิเมตร จุดขุ่นจะบอกให้ทราบถึงอุณหภูมิต่ำที่สุดที่สามารถจะนำผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมไปใช้งานได้[1]

#### 2.1.1.12 จุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (Cold flow plugging point)

จุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำหรือจุดไหลเท คือจุดที่อุณหภูมิต่ำที่สุดที่น้ำมันยังคงไหลได้ การทำให้เชื้อเพลิงเย็นตัวลงเรื่อยๆ จนถึงอุณหภูมิหนึ่ง เชื้อเพลิงจะเริ่มแข็งตัวและถ้าทำให้เย็นตัวลงไปอีก จะจับตัวเป็นก้อนและหยุดไหล[1]

เนื่องจากไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้วัตถุดิบมาจากพืชน้ำมันหรือไขมันสัตว์ชนิดต่าง ๆ กัน ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของไบโอดีเซล และปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการผลิตล้วนมีผลต่อคุณภาพของไบโอดีเซลทั้งสิ้น ซึ่งในการผลิตไบโอดีเซลแต่ละครั้งก็อาจจะทำให้คุณภาพที่ได้มีผลแตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องมีมาตรฐานที่จะกำหนดคุณภาพของไบโอดีเซล เพื่อให้สามารถใช้ได้อย่างมั่นใจ และปลอดภัยต่อชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ ภายในเครื่องยนต์ ซึ่งในแต่ละประเทศผู้ผลิตก็จะมีการกำหนดมาตรฐานของตนเอง และมาตรฐานของในแต่ละประเทศนั้นค่อนข้างจะใกล้เคียงกัน สำหรับในประเทศไทยได้มีการกำหนดมาตรฐานไบโอดีเซลโดยกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ มาตรฐานไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์เกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) และมาตรฐานไบโอดีเซลเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน เพื่อให้ผู้บริโภคสามารถเลือกใช้งานได้ตามความเหมาะสมของเครื่องยนต์ ดังตารางที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.2 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549<sup>[4]</sup>

รายการ	ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูงต่ำ		วิธีทดสอบ <sup>1/</sup>
1	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	860 900	ASTM D 1298
2	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C	เซนติสโตกส์ (cSt)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	1.9 8.0	ASTM D 445
3	จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
4	กำมะถัน	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.0015	ASTM D 2622
5	จำนวนซีเทน		ไม่ต่ำกว่า	47	ASTM D 613
6	เถ้าซิลิเกต	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
7	น้ำและตะกอน	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.2	ASTM D 2709
8	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง		ไม่สูงกว่า	หมายเลข 3	ASTM D 130

ตารางที่ 2.2 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซล ชุมชน) พ.ศ. 2549<sup>[4]</sup> (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูงสุด		วิธีทดสอบ <sup>1/</sup>
9	ค่าความเป็นกรด	mg KOH/g	ไม่สูงกว่า	0.80	ASTM D 664
10	กลีเซอรินอิสระ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 6584
11	กลีเซอรินทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	1.5	ASTM D 6584
12	สี			ม่วง <sup>2/</sup>	ตรวจพินิจ ด้วยสายตา
13	สารเติมแต่ง (ถ้ามี)		ให้เป็นไปตามที่ได้รับเห็นชอบ จากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน		

หมายเหตุ 1/ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนด

2/ ใช้สารประเภท 1,4-dialkylamino anthracene และ alkyl derivatives of azobenzene-4-azo-2-naphthol

ตารางที่ 2.3 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2556<sup>[5]</sup>

รายการ	ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูงสุด		วิธีทดสอบ <sup>1/</sup>
1	เมทิลเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C	กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	860 900	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C	เซนติสโตกส์ (cSt)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	3.5 5.0	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
5	กำมะถัน	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 2622

ตารางที่ 2.3 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2556<sup>[5]</sup> (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูงต่ำ		วิธีทดสอบ <sup>1/</sup>
6	กากถ่าน จากร้อยละ 10 ของ ส่วนที่เหลือจากการกลั่น	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.30	ASTM D 4530
7	จำนวนซีเทน		ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D 613
8	เถ้าซัลเฟต	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
9	น้ำ	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	500	EN ISO 12937
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	24	EN 12662
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง		ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 ° C	ชั่วโมง	ไม่ต่ำกว่า	10	EN 15751
13	ค่าความเป็นกรด	mg KOH/g	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน	g Iodine/100g	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิล เอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
16	เมทานอล	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
17	โมนอกลิเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.70	EN 14105
18	ไดกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
19	ไตรกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105

ตารางที่ 2.3 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2556<sup>[5]</sup> (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูงสุด		วิธีทดสอบ <sup>1/</sup>
21	กลีเซอรินทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14538
	โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14538
23	ฟอสฟอรัส	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.0010	EN 14107
24	จุดขุ่น	องศาเซลเซียส	รายงาน <sup>2/</sup>		
25	จุดจุดตันการไหล ที่อุณหภูมิต่ำ	องศาเซลเซียส	รายงาน <sup>2/</sup>		
26	สารเติมแต่ง (ถ้ามี)		ให้เป็นไปตามที่ได้รับเห็นชอบ จากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน		

หมายเหตุ 1/ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนด

2/ ให้ผู้ค้าน้ำมันรายงานต่ออธิบดีเป็นรายไตรมาส ภายในวันที่ 15 ของเดือนถัดจากเดือนสุดท้ายของไตรมาสนั้น

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชต่างๆ เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล<sup>[3]</sup>

เมทิลเอสเทอร์ จากน้ำมัน	ความหนืด ที่ 40 °C, (cSt)	ค่า ซีเทน	ค่าความร้อน ต่ำสุด (MJ/T)	จุดขุ่น (°C)	จุด ไหลเท (°C)	จุด วาบไฟ (°C)	ความ หนาแน่น (g/ml)	กากถ่าน (%wt)
ถั่วเหลือง	4.5	45	33.5	1	-7	178	0.885	1.74
ปาล์ม	5.7	62	33.5	13	-	164	0.880	-
ทานตะวัน	4.6	49	33.5	1	-	183	0.860	-
ไซวีว	-	-	-	12	9	96	-	1.83
น้ำมันดีเซล	3	49	38.6	-12	-23	74	0.850	0.16



## 2.1.2 วิธีผลิตไบโอดีเซล

ก่อนที่จะมีการนำไบโอดีเซลมาใช้แทนน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์จริง ได้มีการทดลองผลิตไบโอดีเซลในหลายๆ วิธี เพื่อศึกษาว่าวิธีใดจะเหมาะสมกับการนำไปใช้จริง ซึ่งไบโอดีเซลมีวิธีการผลิตหลักๆ อยู่ด้วยกัน 4 วิธี คือ

### 2.1.2.1 การใช้โดยตรงและการผสม (Direct Use and Blending)

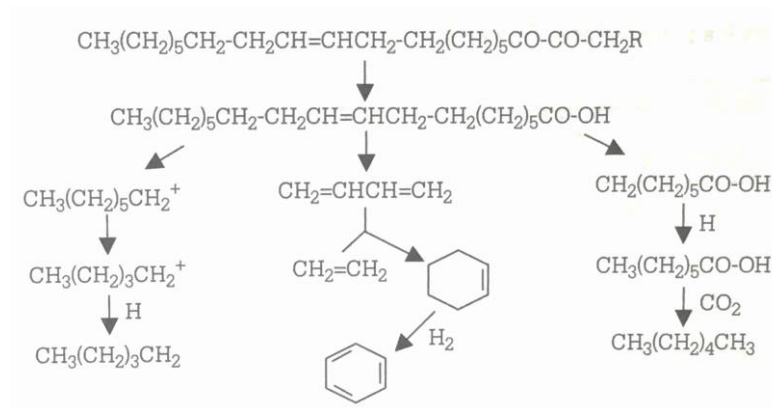
เป็นการนำน้ำมันพืชไปใช้แทนน้ำมันดีเซล หรือใช้ผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ โดยไม่ได้ผ่านกระบวนการใดๆ เนื่องจากน้ำมันพืชมีค่าความหนืดสูงมากเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล จึงส่งผลให้ปั๊มหัวฉีด ตลอดจนระบบส่งน้ำมันสึกหรอ และอุดตันง่าย เกิดการปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่น ทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีลักษณะเป็นเจลเหนียวและหนืดขึ้น หมดสภาพเร็วกว่าปกติ[1]

### 2.1.2.2 การทำให้เป็นไมโครอิมัลชัน (Micro Emulsion)

เป็นการลดความหนืดของน้ำมันพืชซึ่งเป็นปัญหาหลักในการที่จะนำมาใช้แทนน้ำมันดีเซล โดยการทำให้สารประเภทอิมัลชันเป็นสารแขวนลอยอนุภาคเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วของเหลวซึ่งไม่ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งมีขนาดอนุภาคประมาณ 1-50 นาโนเมตร โดยใช้ตัวทำละลายพวกแอลกอฮอล์ ได้แก่ เอทานอลหรือบิวทานอล และผสมสารเติมพิเศษพวกประจุไอออนิก และพวกไม่ใช่ไอออนิกเข้าไป เพื่อให้สารทั้งสองสามารถแทรกเข้าไปอยู่ด้วยกันได้ แต่ก็ยังมีปัญหาเกิดขึ้นคือ ไตรกลีเซอไรด์ซึ่งมีคาร์บอนอะตอมอยู่มาก ส่งผลให้มีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จึงเกิดเป็นเศษกากถ่านติดหัวฉีดและเครื่องยนต์[1]

### 2.1.2.3 การสลายโมเลกุลด้วยความร้อน (Thermal Cracking or Pyrolysis)

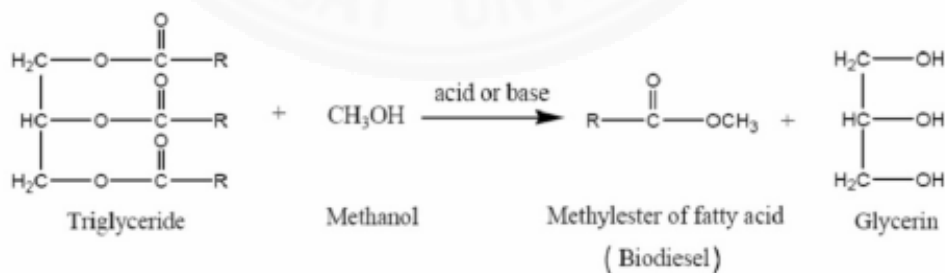
วิธีการนี้เป็นการสลายโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงด้วยความร้อนภายใต้สภาพไร้ออกซิเจน จนสามารถฉีดเป็นฝอยเข้าไปในห้องเผาไหม้ได้ดี ซึ่งนิยมทำกับไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ โดยกลไกการสลายตัวด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์จะแสดงอยู่ในภาพที่ 2.1 แต่ปัญหาที่พบบ่อยคือ การเกิดปฏิกิริยาหลากหลายปฏิกิริยาจึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย ยากต่อการควบคุมคุณภาพ และในกระบวนการแตกโมเลกุลด้วยความร้อน ต้องใช้อุปกรณ์ที่ราคาแพง ทำให้ต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูง[1]



ภาพที่ 2.1 กลไกการสลายตัวด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์<sup>[1]</sup>

#### 2.1.2.4 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)

เป็นวิธีที่นิยมอย่างแพร่หลาย เพราะสามารถทำได้ที่อุณหภูมิไม่สูงมาก และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน คือการนำน้ำมันจากพืชหรือไขมันจากสัตว์มาทำการสังเคราะห์ ผ่านกระบวนการทางเคมีกับแอลกอฮอล์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งอาจเป็นกรดหรือเบส ร่วมกับการให้ความร้อน ทำให้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ เปลี่ยนไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวในรูปของเอสเทอร์ (Esters) และมีผลิตภัณฑ์อื่น ซึ่งก็คือกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นผลพลอยได้จากการผลิต ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านอื่นๆ ได้ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ จึงต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าช่วยเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า[1]



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน<sup>[1]</sup>

การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบ่งย่อยได้อีก 4 ประเภท คือ[3]

(1) **ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยการแยกกลีเซอรอลแบบต่อเนื่อง (Continuous Deglycerolization Process)** คือการให้ความร้อนแบบต่อเนื่องเพื่อแยกกลีเซอรอลออกมา ทำให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณภาพค่อนข้างคงที่ แต่การผลิตโดยใช้วิธีนี้ต้องใช้เวลาานาน และใช้พื้นที่มาก วิธีนี้ไม่เหมาะที่จะใช้กับวัตถุดิบที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูงกว่า 2%

(2) **ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เอนไซม์ไลเปส** คือการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทนกรดหรือเบส ทำให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดที่อุณหภูมิต่ำลงได้ และง่ายต่อการแยกกลีเซอรอลออกมา แต่การผลิตวิธีนี้มีต้นทุนค่อนข้างสูง

(3) **ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันภายใต้สภาวะเหนือวิกฤตยวดยิ่งของเมทานอล (Supercritical Methanol)** วิธีนี้จะไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่จะมีการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยาร่วมเพื่อลดเวลา ความดัน และอัตราส่วนระหว่างเมทานอลกับน้ำมันวัตถุดิบ แต่ในการผลิตแต่ละครั้งนั้น คุณภาพของไบโอดีเซลที่ได้อาจแตกต่างกันออกไป

(4) **ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟ** เป็นการผลิตโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน โดยทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เป็นสาเหตุให้โมเลกุลเกิดการหมุนอย่างรวดเร็ว และเกิดความร้อนจากการเสียดทานการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นการเพิ่มความเร็วในการทำปฏิกิริยา ทำให้ใช้เวลาในการผลิตน้อยลง

### 2.1.3 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

#### 2.1.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (Base Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่ใช้โดยทั่วไป คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งควรใช้ทำปฏิกิริยากับเมทานอล หรือเอทานอล สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสนี้จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็ว เมื่อเทียบกับการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังให้ผลิตภัณฑ์ (ไบโอดีเซล) ในปริมาณที่สูงด้วย ส่วนข้อจำกัดของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส คือ น้ำ และปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันดิบ ซึ่งถ้ามีทั้งสองอย่างนี้ในปริมาณที่มาก จะทำให้มีสบูเกิดขึ้น[6]

#### 2.1.3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด (Acid Catalyst)

กรดที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะทำให้ได้ผลผลิต ซึ่งก็คือไบโอดีเซลในปริมาณที่มาก แต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ามาก อาจใช้เวลามากกว่า 1 วัน กว่าปฏิกิริยาจะเกิดอย่างสมบูรณ์ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดสามารถใช้ได้ดีกับน้ำมันดิบที่มีส่วนประกอบของกรดไขมันอิ่มตัวและน้ำในปริมาณสูง[6]

### 2.1.3.3 เอนไซม์ไลเปส (Lipase)

เอนไซม์ไลเปสสามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ในหลายๆ กระบวนการ ข้อดีคือสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ไม่มีของเสียออกมาจากกระบวนการ แต่ข้อเสียคือมีราคาค่อนข้างแพง[6]

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างตัวเร่งชนิดกรด ตัวเร่งชนิดเบส และเอนไซม์ไลเปส<sup>[6]</sup>

ตัวแปร	ตัวเร่งชนิดเบส	ตัวเร่งชนิดกรด	เอนไซม์ไลเปส
อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	60 – 70	55 – 80	30 – 40
ผลของน้ำและกรดไขมันอิสระ ใน น้ำมัน	ถ้ามีมากจะทำให้เกิดสบู่	ไม่มีผลกระทบต่อ การเกิดปฏิกิริยา	ไม่มีผลกระทบต่อ การเกิดปฏิกิริยา
ปริมาณเมทิลเอสเทอร์	ปกติ	ปกติ	สูง
การแยกกลีเซอรอล	ยาก	ยาก	ง่าย
การทำให้เมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์	ทำการล้างซ้ำ	ทำการล้างซ้ำ	ไม่ต้องล้าง
ราคา	ถูก	ถูก	ค่อนข้างแพง

### 2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

#### 2.1.4.1 ผลของน้ำและกรดไขมันอิสระ

สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส กลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์ที่ใช้จะต้องไม่มีน้ำเป็นส่วนผสม เพราะน้ำเป็นสาเหตุทำให้เกิดสบู่ขึ้นใน ระหว่างการทำปฏิกิริยา สบู่ที่เกิดขึ้นจะไปลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนั้นยังส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซล คือทำให้มีค่าความหนืดสูงขึ้น มีลักษณะคล้ายเจล และยากต่อการแยก ไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลด้วย[7]

#### 2.1.4.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ ดังนั้นแอลกอฮอล์ที่ใช้ต้องมีปริมาณมากพอ เพื่อที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดเป็นไบโอดีเซลมากขึ้น[7]

#### 2.1.4.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีหลายประเภท ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อข้างต้น ซึ่งก็มีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป การจะเลือกใช้ก็จะต้องคำนึงถึงน้ำมันที่นำมาเป็นสารตั้งต้นด้วย

นอกจากนี้ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน เพราะถ้าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นมากขึ้น ปฏิกิริยาก็จะเกิดเร็วขึ้น แต่การใช้ในปริมาณที่มากเกินไป ก็อาจทำให้เกิดความสิ้นเปลืองเมื่อเทียบกับผลของผลิตภัณฑ์ที่ได้[7]

#### 2.1.4.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าสูงในระยะแรกของปฏิกิริยา และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมจึงจำเป็นในการผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์[7]

#### 2.1.4.5 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

อุณหภูมิมีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้แอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิที่ใช้เกินจุดเดือดของแอลกอฮอล์ จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากมีการสูญเสียแอลกอฮอล์ในระหว่างที่ทำปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามถ้าเพิ่มเวลาให้เพียงพอ ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยทั่วไปจะนิยมใช้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่นำมาใช้ทำปฏิกิริยา[7]

#### 2.1.4.6 ผลของอัตราการกวนผสม

การกวนผสมเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากน้ำมันที่นำมาใช้ผลิตไบโอดีเซลนั้นไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นการกวนผสมให้เนื้อสารสัมผัสกัน จะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น[7]

## 2.2 ระบบการให้ความร้อน

ในการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน จำเป็นต้องมีการให้ความร้อนเข้าไปในระบบ เพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ ซึ่งระบบการให้ความร้อนนั้นจะแยกออกเป็น 2 แบบ คือ ระบบการให้ความร้อนแบบทั่วไป และระบบการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

### 2.2.1 ระบบการให้ความร้อนแบบทั่วไป (Conventional heating)

ระบบการให้ความร้อนแบบทั่วไป คือ การถ่ายเทความร้อนขึ้นพื้นฐาน โดยกลไกการถ่ายเทความร้อนจะมีด้วยกัน 3 แบบ คือ

#### 2.2.1.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อนเป็นกลไกการแลกเปลี่ยนพลังงานภายในจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่ง หรือจากส่วนหนึ่งของวัตถุไปยังส่วนอื่นๆ ของวัตถุ โดยการแลกเปลี่ยนพลังงานนั้น จะเกิดจากการสั่นของโมเลกุลที่อยู่ติดกัน หรือเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระจากบริเวณ

ที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่วัตถุนั้นไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีในวัสดุที่เป็นของแข็ง ตัวอย่างเช่น แท่งโลหะถูกเผาให้ร้อนด้านหนึ่ง เมื่อเวลาผ่านไป ที่ปลายอีกข้างหนึ่งจะร้อนขึ้น[8]

### 2.2.1.2 การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นของไหล ซึ่งก็คือ ของเหลวและก๊าซ โดยตัวกลางจะเคลื่อนที่ไปกับอุณหภูมิด้วย ซึ่งการพาความร้อนแบ่งได้เป็น 2 ประเภท จากการเคลื่อนที่ของของไหล คือ

(1) การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free Convection or Natural Convection) คือการพาความร้อน โดยที่ของไหลซึ่งเป็นตัวกลางเคลื่อนที่ได้เองโดยอิสระ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของของไหลอันเนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่มีอยู่ในมวลของของไหล[8]

(2) การพาความร้อนโดยอาศัยเครื่องมือ (Forced Convection) คือการพาความร้อนโดยที่ของไหลต้องอาศัยแรงกระทำจากภายนอก เช่น แรงจากพัดลม หรือปั๊ม เพื่อช่วยในการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นตัวกลาง[8]

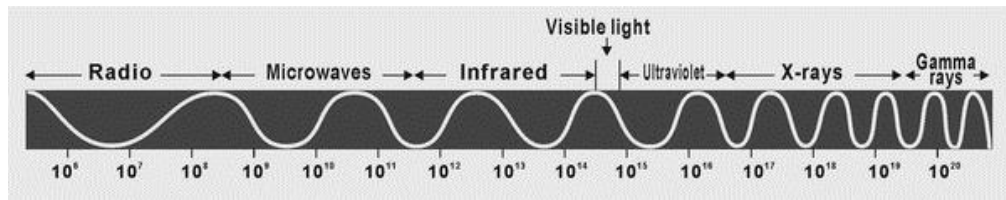
### 2.2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

รังสีความร้อนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกจากสาร กลไกของการแผ่รังสีจึงแตกต่างจากกลไกของการนำความร้อน และการพาความร้อน กล่าวคือความร้อนสามารถเคลื่อนที่จากวัตถุ(สาร)หนึ่ง ไปยังอีกวัตถุ(สาร)หนึ่งได้โดยไม่ต้องมีตัวกลางระหว่างวัตถุ(สาร)ทั้งสอง รังสีความร้อนเคลื่อนที่โดยอาศัยกลไกของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากวัตถุหนึ่งมาตกลงบนอีกวัตถุหนึ่ง

รังสีความร้อนที่ปล่อยออกมาจากวัตถุจะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเคลื่อนที่ออกไปทั่วทุกทิศทาง และเมื่อมาตกลงบนวัตถุอื่น ส่วนหนึ่งของรังสีจะสะท้อนกลับออกไป ส่วนหนึ่งอาจทะลุผ่านออกไปได้ และอีกส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนไว้ในวัตถุนั้นกลายเป็นความร้อนที่สะสมไว้ภายในวัตถุที่ได้รับรังสี ตัวอย่างเช่น รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์[8]

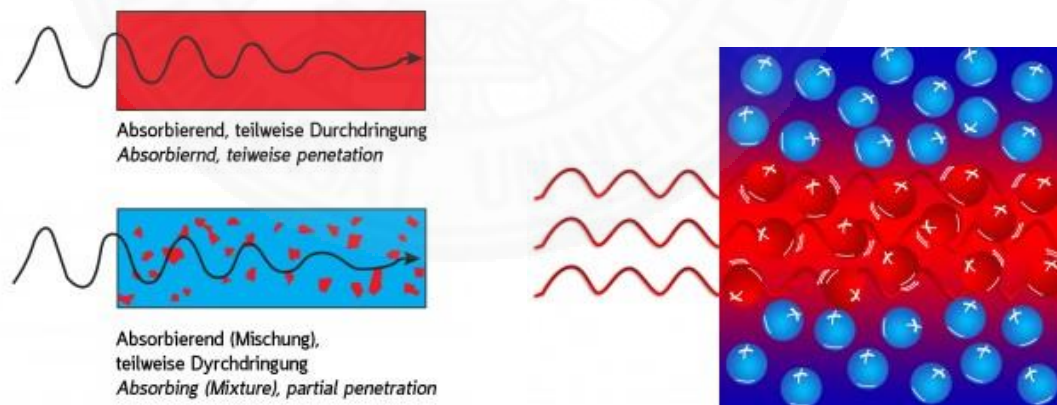
## 2.2.2 การให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave Heating)

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่างคลื่นวิทยุ (Radio Wave) กับอินฟราเรด (Infrared) มีความถี่ระหว่าง 300 - 30000 MHz หลักการทำงานคือ คลื่นไมโครเวฟจะผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ โดยความถี่ของคลื่นจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของโมเลกุลจนเกิดเป็นความร้อนภายในเนื้อวัสดุโดยตรง [9,10]



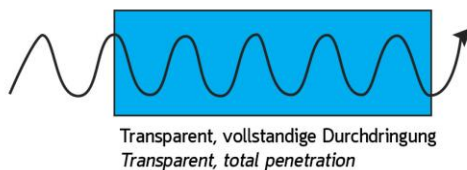
ภาพที่ 2.3 สเปกตรัมของรังสีตามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า<sup>[10]</sup>

วัสดุหรือชิ้นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟ จะต้องมีความสมบัติที่ตอบสนองต่อคลื่นเพื่อแปลงพลังงานของคลื่นไปเป็นความร้อนในเนื้อวัสดุได้ ซึ่งวัสดุที่มีความเหมาะสมก็คือ วัสดุที่มีโมเลกุลที่มีขั้ว ตัวอย่างเช่น โมเลกุลของน้ำ ซึ่งมีออกซิเจนเป็นขั้วลบ และไฮโดรเจนเป็นขั้วบวก โมเลกุลของน้ำจะพยายามเรียงตัวภายใต้สนามไฟฟ้า เมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟซึ่งมีความถี่ที่สูงมาก เหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำเปลี่ยนทิศกลับไปมาอย่างรวดเร็วตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการเสียดสีกันระหว่างโมเลกุลของน้ำที่สั่นสะเทือน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นมา วัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว เช่น อากาศ เทฟลอน หรือแก้ว จะไม่สามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นได้ โดยคลื่นจะผ่านทะลุเขาไปในเนื้อวัสดุโดยไม่เกิดความร้อนหรือการเปลี่ยนแปลงใดๆ ส่วนวัสดุที่เป็นโลหะจะมี คุณสมบัติสะท้อนคลื่นจึงไม่สามารถเกิดความร้อนได้ เหมาะสำหรับทำโครงสร้างเตาและตัวสะท้อนคลื่น[11] ดังภาพที่ 2.4

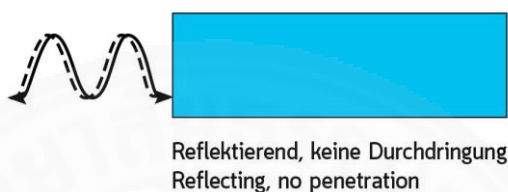


(ก) การให้ความร้อนกับวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้ว

ภาพที่ 2.4 แสดงการตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุประเภทต่างๆ<sup>[11]</sup>



(ข) การให้ความร้อนกับวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว



(ค) การให้ความร้อนกับวัสดุที่เป็นโลหะ

ภาพที่ 2.4 แสดงการตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุประเภทต่างๆ<sup>[11]</sup> (ต่อ)

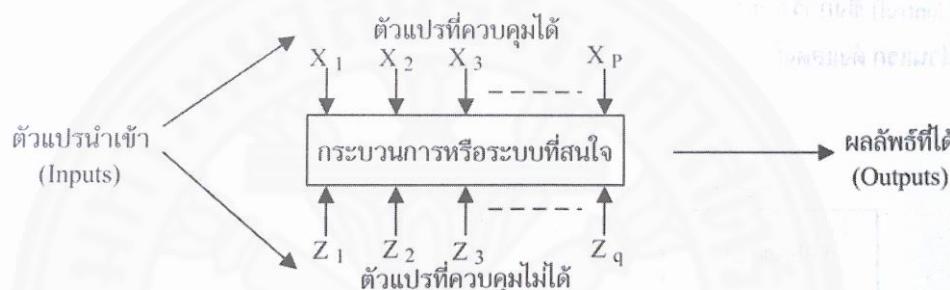
กระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟเป็นวิธีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานเป็นความร้อน เกิดภายในเนื้อวัสดุโดยตรง ซึ่งแตกต่างจากการให้ความร้อนแบบเดิมที่ใช้เชื้อเพลิงหรือขดลวดไฟฟ้า โดยการถ่ายเทความร้อนจะอาศัยการพาของอากาศร้อน หรือการแผ่รังสีจากแหล่งความร้อนเป็นหลัก ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปที่ผิวของวัสดุก่อน จากนั้นจึงจะค่อยเกิดการนำความร้อนจากผิวนอกของวัสดุเขาไปสู่ภายใน

ข้อดีของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟคือ ใช้เวลาน้อย ประหยัดเนื้อที่ และเป็นการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง ทำให้ประหยัดพลังงานได้มาก เป็นเทคโนโลยีสะอาด ไม่สร้างมลภาวะ ซึ่งต่างจากกระบวนการการให้ความร้อนแบบอื่นที่ใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ทำให้มีก๊าซไอเสียออกมา การควบคุมระบบสามารถกระทำได้ดีและรวดเร็วกว่า โดยไม่จำเป็นต้องอุ่นเตาให้ร้อนล่วงหน้า ผลิตภัณฑ์ร้อนเร็วและทั่วถึง คุณภาพผลิตภัณฑ์นั้นดีขึ้นเมื่อเทียบกับการทำความร้อนแบบดั้งเดิม



## 2.3 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจจะศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ควบคุมได้ และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้[12]



ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ<sup>[12]</sup>

การออกแบบการทดลองมีส่วนสำคัญมาก โดยเฉพาะในส่วนของ การออกแบบกระบวนการ ในด้านการกำหนดค่าพารามิเตอร์ หรือค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในระบบหรือกระบวนการ ซึ่งรูปแบบแผนการทดลองจะขึ้นอยู่กับรายละเอียดของจำนวนปัจจัยที่ใช้ หรือตัวแปรนำเข้าที่ใช้ ตัวอย่างเช่น กรณีสนใจศึกษาปัจจัยเดียว แบบแผนการทดลองที่ใช้คือ การจำแนกทางเดียว (One-Way ANOVA) กรณีศึกษาสองปัจจัย โดยไม่สนใจผลกระทบร่วม แบบแผนการทดลองที่ใช้คือ การจำแนกสองทาง (Two-Way ANOVA) หรือการออกแบบแบบสมบูรณ์ในแต่ละกลุ่ม (Complete Randomized Block Design) กรณีศึกษาสองปัจจัยหรือมากกว่า และสนใจผลกระทบร่วม แบบแผนการทดลองที่ใช้คือ การทดลองแฟคทอเรียล (Factorial Experiment) เป็นต้น ในการออกแบบการทดลอง สามารถจำแนกประเภทของการทดลองได้เป็น 5 ประเภทหลักๆ ตามข้อมูลที่ทราบเกี่ยวกับระบบ และวัตถุประสงค์ของการทดลอง ดังนี้[12]

### 2.3.1 การทดลองเดี่ยว หรือการทดลองเพียงครั้งเดียว (Single Experiment)

เป็นการทดลองในกรณีที่ผู้ทดลองมีความรู้ ความเข้าใจ ในระบบหรือกระบวนการที่ต้องการศึกษาเป็นอย่างดี ทราบถึงปัจจัยที่มีความสำคัญในกระบวนการเบื้องต้น แต่ต้องการทราบและชี้บ่งถึงสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย

### 2.3.2 การทดลองอย่างต่อเนื่อง (Continuous Experiment)

เป็นการทำการทดลองเพื่อที่จะลดค่าการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการ โดยมีเป้าหมายในการปรับปรุงกระบวนการอย่างชัดเจน

### 2.3.3 การทดลองแบบคัดทิ้ง (Screening Experiment)

เป็นการทดลองที่ทำขึ้นสำหรับศึกษาระบบหรือกระบวนการใหม่ที่เพิ่งติดตั้ง หรือพัฒนาขึ้นใหม่ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใหญ่หรือซับซ้อน และผู้ทดลองมีความเข้าใจในกระบวนการน้อย วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้คือ พยายามปรับลดรายละเอียดของตัวแปรหรือปัจจัยในระบบหรือกระบวนการ เพื่อที่จะได้จำนวนปัจจัยที่เหมาะสม และทำการทดลองได้จริงในการทดลอง

### 2.3.4 การทดลองแบบเจาะจง (Focusing Experiment)

เป็นการทดลองที่ทำขึ้นโดยมีเป้าหมายกำหนดจากความต้องการในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น โดยการกำหนดค่าที่เหมาะสมให้กับปัจจัยที่เลือกศึกษานั้นๆ

### 2.3.5 การทดลองเชิงลำดับ (Sequential Experiment)

เป็นการทดลองที่ทำขึ้นเนื่องจากกระบวนการที่สนใจศึกษาสามารถแบ่งเป็นขั้นตอน หรือกระบวนการย่อยๆ ได้เป็นจำนวนมาก ทำให้มีปัจจัยที่ศึกษาในภาพรวมในแต่ละขั้นตอนมาก จึงจำเป็นต้องแบ่งกระบวนการออกเป็นส่วนๆ และทำการทดลองกำหนดปัจจัย จากนั้นจึงนำมา รวมเป็นข้อกำหนดของกระบวนการในภาพรวม เพื่อให้สามารถทำการศึกษาระบบหรือระบบที่มีขนาดใหญ่่มากได้จริงในทางปฏิบัติ

## 2.4 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiment)

การทดลองแฟคทอเรียล คือ การทดลองที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการออกแบบแผนการทดลอง เนื่องจากสามารถศึกษาวิจัยได้หลายปัจจัยพร้อมกัน โดยมีจุดประสงค์หลักคือ ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย หรือที่เรียกว่า อัตรกิริยา (Interactions) ซึ่งก็คือความล้มเหลวของผลต่างของค่าตอบสนอง (y) ที่จะมีค่าต่างเท่ากัน เมื่อผู้ทดลองทำการเปลี่ยนค่าระดับของปัจจัยที่ 1 (จากระดับที่ 1 ไปสู่ระดับที่ 2 เป็นต้น) ภายใต้อัตราแต่ละระดับของปัจจัยที่ 2 แต่จำนวนการทดลอง (N) ที่ต้องมีค่าน้อยเท่ากับ ผลคูณระหว่างค่าระดับปัจจัย (A) ของทุกปัจจัย (k) หรือ  $N = A^k$  [12,13]

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>
B <sub>1</sub>	10	12
B <sub>2</sub>	13	15

(ก)

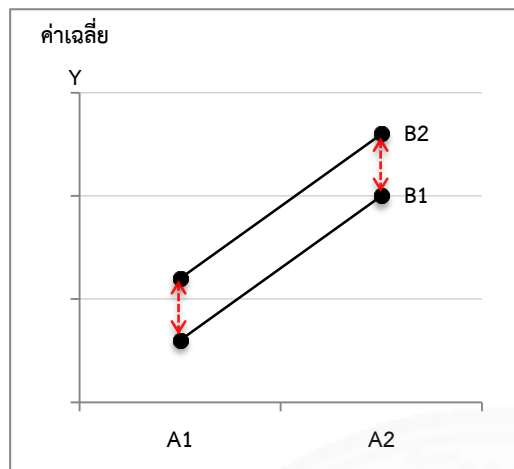
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>
B <sub>1</sub>	10	15
B <sub>2</sub>	13	20

(ข)

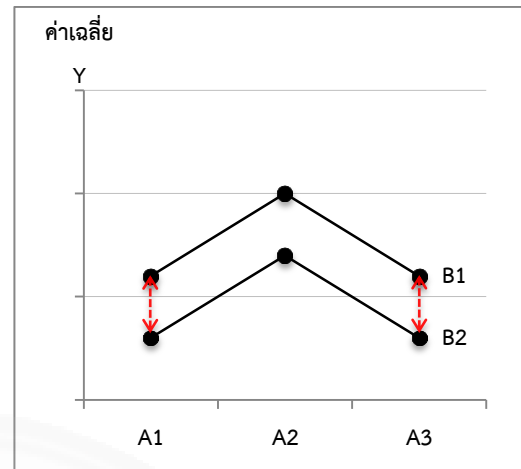
ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างผลการทดลองของปัจจัย A และปัจจัย B จากระดับที่ 1 ไปสู่ระดับที่ 2

จากภาพที่ 2.6 กรณี (ก) การเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนองภายใต้ระดับที่ 1 และระดับที่ 2 ของปัจจัย A เมื่อเปลี่ยนค่าสภาวะของปัจจัย B จากระดับที่ 1 ไปสู่ระดับที่ 2 มีค่าคงที่ (เท่ากัน) แสดงให้เห็นว่าทั้งสองปัจจัยไม่มีผลกระทบร่วมกัน แต่สำหรับกรณี (ข) การเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนองภายใต้ระดับที่ 1 และระดับที่ 2 ของปัจจัย A เมื่อเปลี่ยนค่าสภาวะของปัจจัย B จากระดับที่ 1 ไปสู่ระดับที่ 2 มีค่าไม่เท่ากัน นั่นคือ ปัจจัย A และปัจจัย B มีผลกระทบร่วมกัน[12]

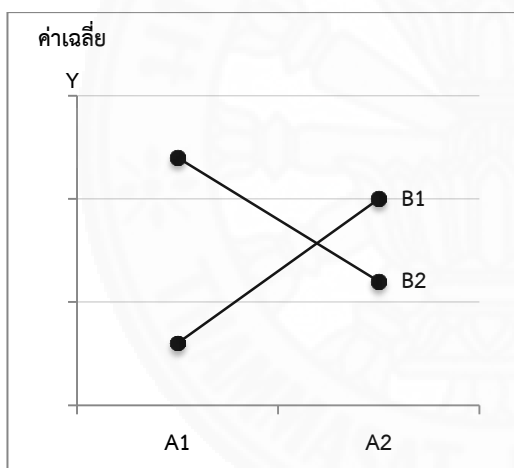
การพิจารณาผลกระทบร่วมนั้น สามารถพิจารณาได้จากการคำนวณผลต่างจากระดับที่ 1 ไปสู่ระดับที่ 2 ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.6 หรืออาจจะพิจารณาได้โดยการใช้กราฟที่เรียกว่า กราฟผลกระทบร่วม (Interactions Plot) นั่นคือ ถ้าเส้นกราฟขนานกัน แสดงว่า ค่าต่างระหว่างเส้นมีค่าเท่ากันหรือคงที่ หมายถึงกรณีที่ไม่พบผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.7 แต่ถ้าเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตัดกัน หรือมีแนวโน้มที่จะตัดกัน ก็จะหมายถึงกรณีที่ปัจจัยนั้นมีผลกระทบร่วมต่อกัน[12] ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.8



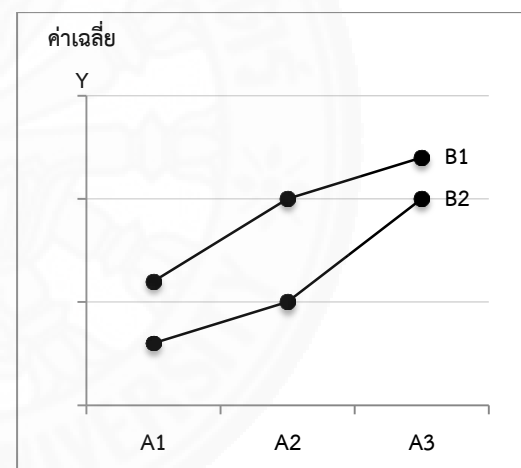
(ก) ปัจจัย A ศึกษาที่ 2 ระดับ



(ข) ปัจจัย A ศึกษาที่ 3 ระดับ

ภาพที่ 2.7 กราฟผลกระทบร่วม กรณีไม่มีผลกระทบร่วม<sup>[12]</sup>

(ก) ปัจจัย A ศึกษาที่ 2 ระดับ



(ข) ปัจจัย A ศึกษาที่ 3 ระดับ

ภาพที่ 2.8 กราฟผลกระทบร่วม กรณีมีผลกระทบร่วม<sup>[12]</sup>

อย่างไรก็ตามการใช้กราฟเป็นเพียงการวิเคราะห์เบื้องต้น ไม่สามารถยืนยันได้ 100% ว่าปัจจัยนั้นๆ มีผลกระทบร่วมต่อกันหรือไม่ เนื่องจากอาจมีการคลาดเคลื่อนในเรื่องของอัตราส่วนหรือเรื่องอื่นๆ อีก ดังนั้นเพื่อความแน่ใจจึงต้องทำการทดสอบนัยสำคัญสำหรับอิทธิพลของการกระทำร่วมเสียก่อน ซึ่งก็คือการสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน<sup>[12]</sup> ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับกรณีศึกษา 2 ปัจจัย ที่ a ระดับ และ b ระดับ ตามลำดับ โดยทำการทดลอง n ครั้ง<sup>[12]</sup>

แหล่งที่มา (Source)	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ย SS MS=SS/d.f.	ค่าสถิติ $F_0$
A	a - 1	$SS_A$	$MS_A$	$F_A = MS_A/MS_E$
B	b - 1	$SS_B$	$MS_B$	$F_B = MS_B/MS_E$
AB	(a - 1)(b - 1)	$SS_{AB}$	$MS_{AB}$	$F_{AB} = MS_{AB}/MS_E$
ค่าความคลาดเคลื่อน (Error)	$n - [(a-1)+(b-1)+(a-1)(b-1)]$	$SS_E$	$MS_E$	
ผลรวม (Total)	n - 1	$SS_T$		

$$\text{โดยที่ } SS_T = \sum \sum \sum (y_{ijk} - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i...}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{j...}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_{subtotal} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij...}^2}{n} - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_{AB} = SS_{subtotal} - SS_A - SS_B$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$$

$$\text{หรือ } SS_E = SS_T - SS_{subtotal}$$

และกำหนดให้  $y_{i...}$  แทน ผลรวมของข้อมูลการทดลองที่ระดับ i ของปัจจัย A

$y_{j...}$  แทน ผลรวมของข้อมูลการทดลองที่ระดับ j ของปัจจัย B

$y_{ij...}$  แทน ผลรวมของข้อมูลทดลองใน ij ใดๆ

$y_{...}$  แทน ผลรวมของข้อมูลการทดลองทุกๆ ข้อมูล

$\bar{y}_{...}$  แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลองทุกๆ ข้อมูล

การวิเคราะห์โดยใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน สามารถทำได้โดยการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับปัจจัยที่ต้องการทดสอบ ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ จากตารางที่ 2.1 สามารถนำมาวิเคราะห์สมมติฐานได้ดังนี้

#### 2.4.1 กรณีทดสอบปัจจัยหลัก

รูปแบบของสมมติฐาน คือ

$$(1) H_0 : \tau_i = 0 ; \forall_i \quad (\text{ปัจจัย A ไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง})$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 ; \exists_i \quad (\text{ปัจจัย A มีผลต่อค่าตอบสนอง})$$

$$(2) H_0 : \beta_j = 0 ; \forall_i \quad (\text{ปัจจัย B ไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง})$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 ; \exists_i \quad (\text{ปัจจัย B มีผลต่อค่าตอบสนอง})$$

โดย  $\tau_i$  คือ ผลกระทบของปัจจัย A

$\beta_j$  คือ ผลกระทบของปัจจัย B

#### 2.4.2 กรณีทดสอบปัจจัยร่วม

รูปแบบของสมมติฐาน คือ

$$H_0 : \tau\beta_{ij} = 0 ; \forall_i \quad (\text{ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง})$$

$$H_1 : \tau\beta_{ij} \neq 0 ; \exists_i \quad (\text{ปัจจัยร่วมมีผลต่อค่าตอบสนอง})$$

โดย  $\tau\beta_{ij}$  คือ ผลกระทบของปัจจัยร่วม

ซึ่งตัวสถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐานของทั้ง 2 กรณี คือ ค่าสถิติ  $F_0$  หรือค่า p-value โดยจะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อ  $F_0 > F_{\alpha, v_b}$  หรือ  $p\text{-value} < \alpha$  ซึ่งค่าของ  $F_{\alpha, v_b}$  สามารถหาได้จากตาราง Percentage Points of the F Distribution

โดย  $\alpha$  คือค่านัยสำคัญ ซึ่งค่าที่สามารถใช้ได้จะอยู่ในช่วง 1% ถึง 10% หรือมีความเชื่อมั่นไม่ต่ำกว่า 90% แต่โดยทั่วไปนิยมใช้ที่ 5% หรือ  $\alpha = 0.05$

$$v_b = (a-1, n-b)$$

ก่อนที่จะนำข้อสรุปจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้ได้ จะต้องมีการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลองทางสถิติที่นำมาใช้เสียก่อน เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบก็คือการวิเคราะห์ค่าผิดพลาด (Residual Analysis) โดยค่าผิดพลาดสำหรับการทดลองแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย คือ

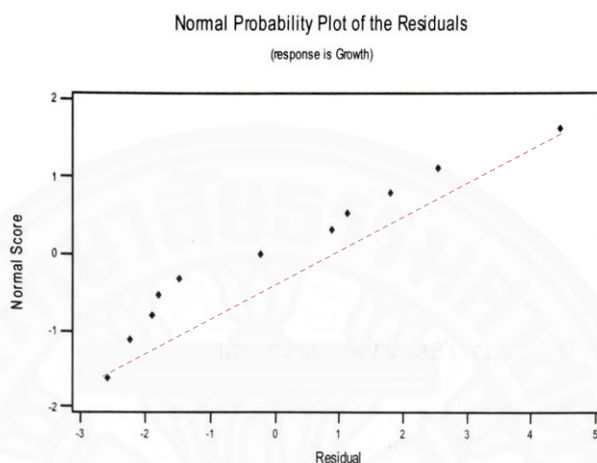
$$\varepsilon_{ij\dots} = y_{ij\dots} - \bar{y}_{ij}$$

โดย  $\varepsilon_{ij\dots}$  คือ ค่าผิดพลาดของข้อมูลการทดลอง

$y_{ij\dots}$  คือ ข้อมูลการทดลอง

$\bar{y}_{ij}$  คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลอง

ซึ่งสามารถตรวจสอบความถูกต้องได้โดย การนำค่าผิดพลาดไปสร้างกราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot) โดยถ้ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง สามารถสรุปได้ว่า ค่าผิดพลาด (Residuals) มีการแจกแจงปกติ สามารถนำข้อสรุปจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้ได้[12] ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 กราฟความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติ<sup>[12]</sup>

ข้อดีของการทดลองแฟคทอเรียลคือ ผู้ทดลองสามารถศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมของปัจจัยหรืออันตรกิริยาระหว่างปัจจัย (Interactions) ได้พร้อมกันในการทดลอง ในกรณีที่ไม่มีพบผลกระทบร่วม ผู้ทดลองสามารถใช้ผลยืนยันได้ว่าการทดลองมีแต่ปัจจัยหลัก หรือผลกระทบหลักเท่านั้นที่มีผล เมื่อทดลองครั้งต่อไปจะสามารถลดจำนวนการทดลองลง โดยใช้วิธีการทดลองเปลี่ยนค่าปัจจัยครั้งละ 1 ปัจจัยได้ กรณีที่พบผลกระทบร่วมก็จะทำให้ผู้ทดลองสามารถทราบถึงรูปแบบและอิทธิพลของผลกระทบนั้นเพื่อจะได้แนวทางในการควบคุมให้ได้จุดที่เหมาะสม[12]

## 2.5 การวิเคราะห์วิธีพื้นผิวสะท้อน (Response Surface Methodology)

การหาพื้นผิวสะท้อนเป็นวิธีการที่ใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Condition) ของระบบหรือกระบวนการผลิต ผลตอบสนอง (Response) ของปัญหาเป็นความสัมพันธ์ หรือฟังก์ชันของหลายปัจจัย หรือตัวแปรอิสระ โดยมีเป้าหมายเพื่อหาระดับของปัจจัย

ต่างๆ ที่ทำให้ผลตอบสนองมีค่าเหมาะสมที่สุด เช่นผลตอบสนอง  $y$  เป็นฟังก์ชันของปัจจัย  $x_1$  และ  $x_2$  ดังนั้นจะสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้[12,13]

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon$$

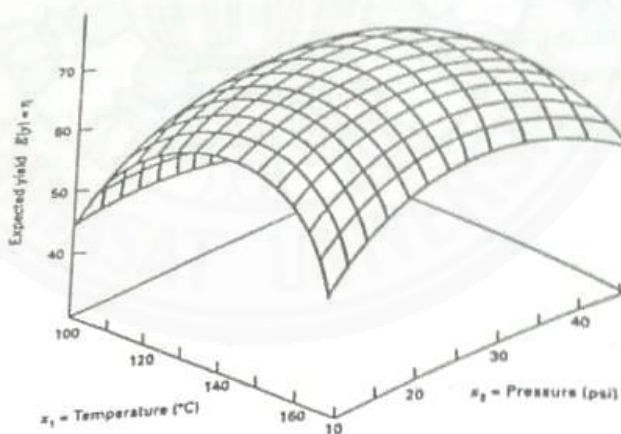
เมื่อ  $\varepsilon$  คือสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการและมีผลกระทบต่อผลตอบสนอง  $y$

$$f(x_1, x_2) = E(y) \text{ คือ ค่าคาดหวังของผลตอบสนอง } y \text{ (Expected Response)}$$

ดังนั้นพื้นผิวสะท้อนสำหรับระบบที่มีจำนวน 2 ปัจจัย สามารถแทนด้วย

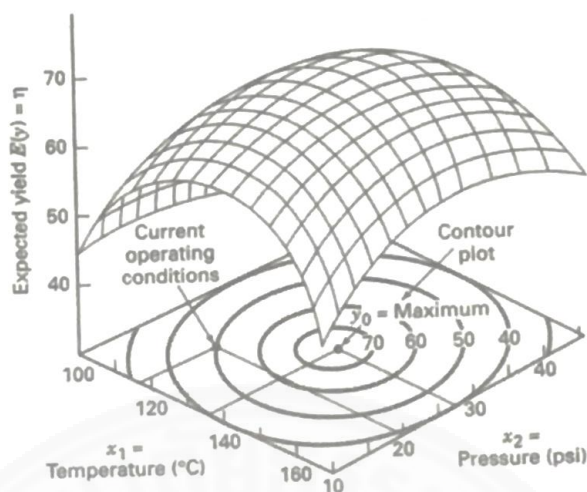
$$\eta = f(x_1, x_2)$$

และพื้นผิวสะท้อน (Response Surface) สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.10 โดยเป็นการพล็อต  $\eta$  กับระดับของปัจจัย  $x_1$  และ  $x_2$  และจะพล็อตเส้นระดับ (Contour) ของพื้นผิวสะท้อนดังภาพที่ 2.11 โดยเส้นระดับที่มีค่าของผลตอบสนองคงที่จะถูกพล็อตลงในระนาบ  $x_1$ - $x_2$  โดยแต่ละเส้นระดับจะสอดคล้องกับความสูงของพื้นผิวสะท้อน[12]



ภาพที่ 2.10 พื้นผิวสะท้อน<sup>[12]</sup>





ภาพที่ 2.11 เส้นระดับของพื้นผิวสะท้อน<sup>[12]</sup>

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวสะท้อน มักจะไม่ทราบรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับปัจจัยต่าง ๆ ดังนั้นขั้นตอนแรกในการหาพื้นผิวตอบสนองคือ การประมาณความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและปัจจัยต่าง ๆ โดยทั่วไปจะใช้รูปแบบของสมการลำดับที่ 1 (First Order Model) ในการประมาณความสัมพันธ์ โดยมีรูปแบบคือ

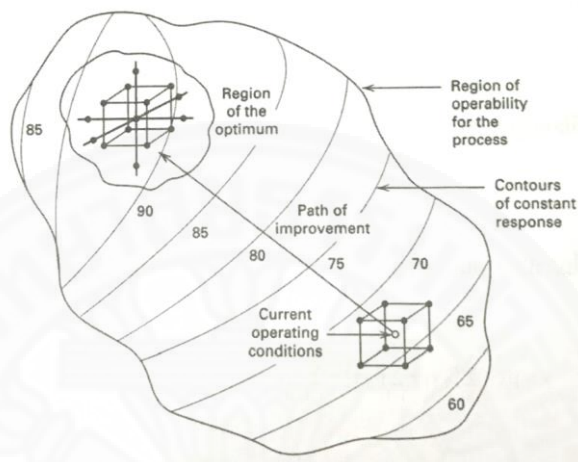
$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon$$

แต่ในกรณีที่พื้นผิวมีความโค้ง (Curvature) จะทำการประมาณโดยใช้รูปแบบของสมการลำดับที่ 2 (Second Order Model) โดยมีรูปแบบคือ

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

วิธีการหาพื้นผิวสะท้อนเป็นวิธีการที่เป็นลำดับขั้นตอน กล่าวคือจากสภาวะการทำงานในปัจจุบัน ซึ่งเป็นจุดที่อยู่ไกลจากจุดที่เหมาะสมที่สุดในพื้นผิวตอบสนอง ดังนั้นเพื่อความรวดเร็วในการเคลื่อนที่เพื่อเข้าไปยังบริเวณที่เหมาะสมที่สุดของพื้นผิวสะท้อนจะสามารถใช้รูปแบบของสมการลำดับที่ 1 ในการประมาณได้ โดยเมื่อพบบริเวณที่เหมาะสมที่สุดแล้วสามารถใช้รูปแบบของ

สมการที่มีลำดับที่สูงกว่า เข้ามาช่วยในการประมาณ และพบว่าส่วนใหญ่นิยมใช้รูปแบบของสมการลำดับที่ 2 เนื่องจากมีความยุ่งยากไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่นๆ ดังนั้นจะใช้รูปแบบของสมการลำดับที่ 2 ในการประมาณและการวิเคราะห์เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุด[12] โดยขั้นตอนในการหาพื้นผิวสะท้อนสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 ขั้นตอนของการหาพื้นผิวสะท้อน<sup>[12]</sup>

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M.Berrios และคณะ[14] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันหมู โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป 3 ระดับ 2 ปัจจัย (Full Factorial Design  $3^2$ ) ซึ่งปัจจัย 2 อย่างที่นำมาวิเคราะห์ในการศึกษาครั้งนี้คือความเร็วในการทำปฏิกิริยา [rpm] (400 rpm, 600 rpm, 800 rpm) และความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือความเข้มข้นของ KOH [wt.%] (0.6%, 0.9%, 1.2%) ในการทดลองทุกครั้งจะถูกตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันหมูคือ 6:1 จากการศึกษาครั้งนี้ สภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ ที่ความเร็วในการทำปฏิกิริยา 600 rpm และความเข้มข้นของ KOH 0.9 wt.%

Kok Tat Tan และคณะ[15] ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) และ เมทิลอะซิเตท (Methyl Acetate) ที่นำมาใช้แทนแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นเทคโนโลยี Supercritical Methyl Acetate (SCMA) ในการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้การวิเคราะห์วิธีพื้นผิวสะท้อน (Response Surface) และได้

ทดลองถึง 20 การทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้ตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา, อัตราส่วนโมลระหว่างเมทิลอะซิเตรทกับน้ำมัน และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา จากผลการวิเคราะห์ เงื่อนไขของตัวแปรที่เหมาะสมคือ ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 399 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลระหว่างเมทิลอะซิเตรทกับน้ำมันคือ 30 mol/mol และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 59 นาที ซึ่งจากเงื่อนไขของตัวแปรเหล่านี้ให้ค่า Yield อยู่ที่ 97.6%

G.Vicente และคณะ[16] ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวันบริสุทธิ์และเมทานอลเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอดีเซล โดยในการทดลองได้กำหนดปัจจัยที่ต่างกันในแต่ละการทดลอง 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ซึ่งทดลองที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิของจุดเดือดของเมทานอล) และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) และอีกหนึ่งปัจจัยคือ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในการทดลองนี้ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ค่าความเข้มข้น 2 ค่า คือ 0.5% และ 1.5% ในแต่ละการทดลองจะกำหนดความเร็วในการทำปฏิกิริยาไว้ที่ 600 rpm และอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันดอกทานตะวัน คือ 6:1 ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีแฟคทอเรียลดีไซน์ 2 ระดับ 2 ปัจจัย (Factorial Design 2<sup>2</sup>) มาวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ของทั้งสองปัจจัยนั้นไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นขึ้น และทดลองในอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะทำให้ได้ไบโอดีเซลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยในการทดลองนี้ใช้ค่า Yield ในการวัดประสิทธิภาพ เมื่อได้แนวโน้มจากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียลดีไซด์แล้ว นำผลที่ได้มาวิเคราะห์แบบพื้นผิวสะท้อน (Response Surface) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจากกราฟของพื้นผิวสะท้อนค่าที่เหมาะสมคือ ค่าอุณหภูมิในช่วง 20-50 องศาเซลเซียส และค่าความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 1.3%

Yasin Yucel[17] ได้ทำการศึกษาการทำไบโอดีเซลจากกากน้ำมันและเมทานอล โดยใช้การวิเคราะห์วิธีพื้นผิวสะท้อน (Response Surface) ควบคู่ไปกับวิธี Central Composite Design เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล ในการทดลองครั้งนี้ตัวแปรที่นำมาศึกษาคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนระหว่างเมทานอลกับกากน้ำมัน ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวแปรสุดท้าย คือระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา จากการทดลองทั้งหมด 30 การทดลอง ร่วมกับการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองทั้งสองแบบ ค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างเมทานอลและกากน้ำมัน คือ 5.3:1 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 5.8% w/w และเวลาในการทำปฏิกิริยาคือ 24 ชั่วโมง โดยจากค่าของตัวแปรเหล่านี้ ให้ค่า Yield อยู่ที่ 92.87%

Kang-Shin Chen และคณะ[18] ได้ทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงปริมาณผลผลิตของไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้วิธีการผลิตแบบการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ด้วยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ ในการทดลองได้มีการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลในการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ ชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา รวมไปถึงกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำความร้อน ผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าตัวแปรที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 โดยใช้โซเดียมเมทอกไซด์ปริมาณ 0.75 %wt เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กำลังไฟฟ้าที่ใช้เป็น 750 W ใช้ระยะเวลา 3 นาที ให้ค่า Yield อยู่ที่ 97.9%

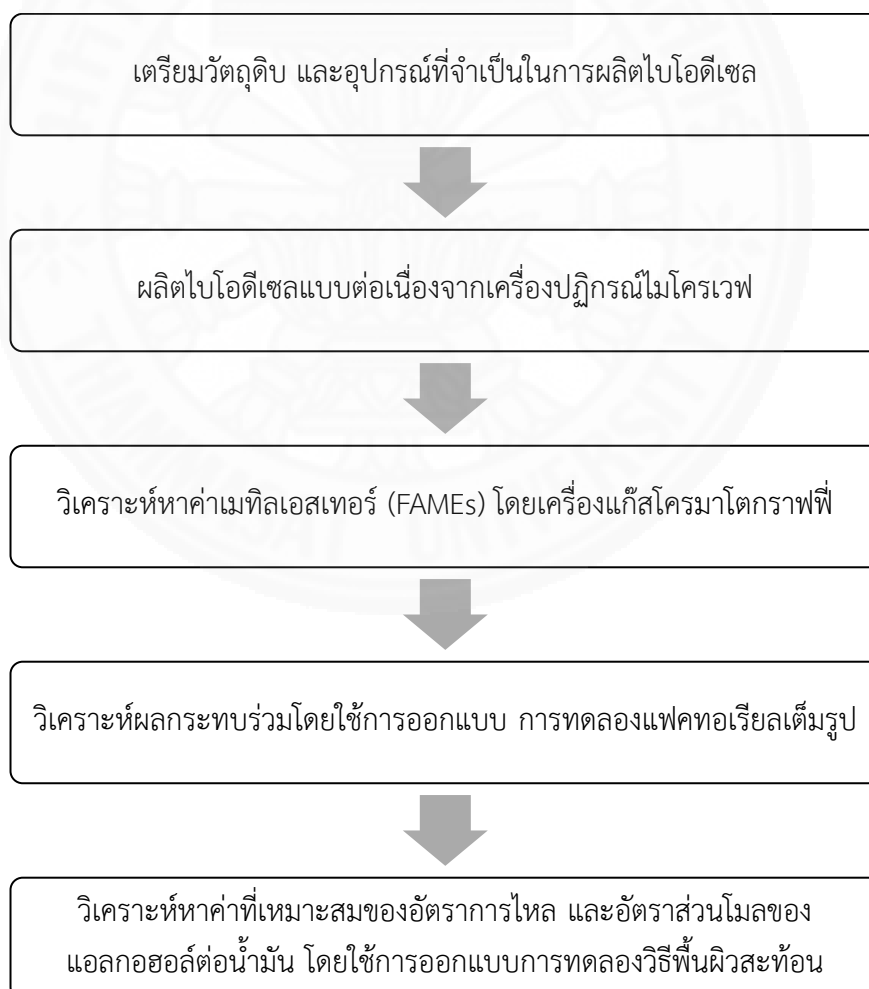
Shakinaz A.El Sherbiny และคณะ[19] ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากสบู่ดำ โดยใช้กระบวนการทำปฏิกิริยาแบบทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และใช้การให้ความร้อนจากไมโครเวฟ โดยตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมัน และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดคือ ใช้การให้ความร้อนโดยไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้า 1,200 W เป็นระยะเวลา 2 นาที ใช้ KOH 1.5%wt เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีอัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 ซึ่งให้ค่า Yield สูงสุดอยู่ที่ 97.4%

ศิริพรรณ กลั่นศิริ[20] ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โดยใช้การให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง ด้วยการให้ความร้อนจากไมโครเวฟ และศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ในการทดลองได้มีการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้สำหรับผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง โดยใช้ความร้อนจากไมโครเวฟ จากการทดลองพบว่า เครื่องปฏิกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลได้ โดยมีความสามารถในการผลิตไบโอดีเซลสูงสุดอยู่ที่ 760 mL/min ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตไบโอดีเซลพบว่า  $\text{CH}_3\text{ONa}$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่า NaOH กับ KOH เล็กน้อยแต่การใช้ในปริมาณที่มากไปจะทำให้กลีเซอรอลแข็งตัว อัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่เหมาะสมคือ 7.5:1 เนื่องจากเกิดปัญหาการระเหย จึงต้องมีการเพิ่มปริมาณของแอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยา การใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียสเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ ส่วนระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจะส่งผลกระทบต่อเพียงเล็กน้อย

### บทที่ 3

#### วิธีการวิจัย

การทำวิจัยครั้งนี้ เป็นการทำให้วิจัยเพื่อหาค่าเหมาะสมของอัตราการใช้ ไทล และอัตราส่วน โมล ของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง โดยในการทำ วิจัย จะทำการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ และวิเคราะห์ หาค่าของเมทิลเอสเทอร์ (FAMES) โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี จากนั้นนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ ผลกระทบร่วมของปัจจัย และผลกระทบของปัจจัยต่อค่าของเมทิลเอสเทอร์ (FAMES) โดยการ ออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ และหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยทั้งสอง โดยใช้วิธีพื้นผิว สะท้อน ซึ่งขั้นตอนในการวิจัยจะแสดงได้ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนในการทำวิจัย

### 3.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

#### 3.1.1 สารตั้งต้น

ในการทำปฏิกิริยาจะใช้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Refine Palm Oil) ซึ่งมีองค์ประกอบของกรดไขมัน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และมีปริมาณของกรดไขมันอิสระ 0.15 %

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%wt.)
Myristic acid (C <sub>14:0</sub> )	1.0
Palmitic acid (C <sub>16:0</sub> )	40.1
Stearic acid (C <sub>18:0</sub> )	4.4
Oleic acid (C <sub>18:1</sub> )	40.7
Linoleic acid (C <sub>18:2</sub> )	12.1
Other	1.7

#### 3.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง คือ โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH) ความเข้มข้น 85.0%, Q-Rec ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด

#### 3.1.3 แอลกอฮอล์

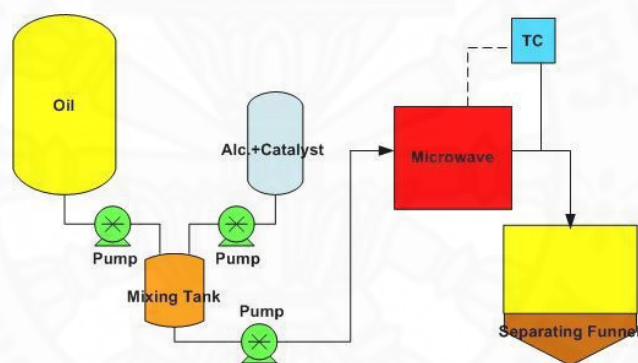
แอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทดลอง คือ เมทานอล (Methanol, CH<sub>3</sub>OH) ความเข้มข้น 99.8%, Q-Rec ซึ่งเหมาะกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส

## 3.2 อุปกรณ์

ในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องโดยใช้การให้ความร้อนจากไมโครเวฟ มีอุปกรณ์ที่จำเป็น ดังต่อไปนี้

### 3.2.1 เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง

เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟแบบต่อเนื่องที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 2,000 วัตต์ มีชุดควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติสำหรับควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยา โดยหลักการการทำงานก็คือเครื่องสูบน้ำมันและแอลกอฮอล์เข้ามาผสมกันในถังผสมก่อน จากนั้นจึงเข้าไปรับความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ โดยเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟมีคุณสมบัติและส่วนประกอบ ดังภาพที่ 3.2 และภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.2 ไดอะแกรมเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง<sup>[21]</sup>



ข้อมูลทั่วไป	
ปริมาตร	100 L
กำลังไฟฟ้า	0 - 2,000 W
ความเร็วการกวน	10 - 400 rpm
การควบคุมอุณหภูมิ	PID Controller
การตั้งเวลา	00.00-99.59 hr.
อัตราการไหล	Max. 11 L/min
ความดัน	2 bar
ความเร็วรอบของปั๊ม	0 - 165 rpm

ภาพที่ 3.3 เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง

### 3.2.2 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี (Gas chromatography)

เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี ใช้สำหรับวิเคราะห์หาค่าของเมทิลเอสเทอร์ (Fatty Acid Methyl Ester ,FAMES) หรือค่าความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล มีลักษณะและคุณสมบัติ ดังภาพที่ 3.4



ข้อมูลทั่วไป	
ยี่ห้อ, รุ่น	Hewlett Packard, GC-HP6890
Column	DB-1

ภาพที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี

### 3.3 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะใช้เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง และในกระบวนการให้ความร้อนจะควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้ดังต่อไปนี้

3.3.1. เตรียมน้ำมันปาล์ม

3.3.2. เตรียมสารละลายที่เป็นส่วนผสมของแอลกอฮอล์กับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้น 2 %wt เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3.3.3 ใช้เครื่องสูบเพื่อสูบน้ำมันและสารละลายที่เตรียมไว้ในอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 6:1 เข้ามารวมกันในถังผสม

3.3.4 ใช้เครื่องสูบเพื่อสูบของผสมระหว่างน้ำมันและแอลกอฮอล์เข้าไปรับความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ โดยปรับอัตราการไหลไว้ที่ 700 ml/min

3.3.5 เตรียมถังเก็บไบโอดีเซลหลังจากรับความร้อนมาแล้ว



3.3.6 นำไบโอดีเซลที่ได้มาเทใส่กรวยแยกเพื่อให้เกิดการแยกตัวระหว่างชั้นของไบโอดีเซล และกลีเซอรอล แล้วแยกเอากลีเซอรอลออก

3.3.7 ล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำอุ่นเพื่อเอาตัวเร่งปฏิกิริยา และแอลกอฮอล์ส่วนที่เหลือออก

3.3.8 อุ่นไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการล้างแล้วด้วยอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยน้ำส่วนที่ยังตกค้างอยู่ออก

3.3.9 ชั่งน้ำหนัก และนำไบโอดีเซลไปวิเคราะห์หาค่าเมทิลเอสเทอร์ (FAMES) โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนค่าของอัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็น 7.5:1 และ 9:1 และเปลี่ยนค่าของอัตราการไหลเป็น 850 ml/min และ 1000 ml/min รวมเป็นการทดลองจำนวน 9 ชุดการทดลอง ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ในแต่ละชุดการทดลอง เพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดการทดลอง รวมเป็นทั้งหมด 18 ชุดการทดลอง บันทึกผลการทดลองทั้งหมด แล้วนำไปวิเคราะห์ทางสถิติต่อไป

### 3.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ทางสถิติ จะใช้การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 3 ระดับ 2 ปัจจัย (Full Factorial Design  $3^2$ ) ช่วยในการวิเคราะห์ผลกระทบร่วมของปัจจัยที่นำมาทดลอง และผลกระทบของปัจจัยต่อค่าตอบสนอง ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ใช้ค่าของเมทิลเอสเทอร์ (FAMES) เป็นค่าตอบสนอง หลังจากนั้นจะหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย โดยการหาสมการถดถอย และใช้วิธีพื้นผิวสะท้อน (Response Surface)

#### 3.4.1 การวิเคราะห์แฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

การวิเคราะห์แฟคทอเรียลเต็มรูปแบบจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การสร้างกราฟผลกระทบร่วม และการสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยการสร้างกราฟผลกระทบร่วมจะเป็นการวิเคราะห์เบื้องต้นว่า ปัจจัยที่นำมาศึกษานั้นมีผลกระทบร่วมกันหรือไม่ หลังจากนั้นจะสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อวิเคราะห์หาผลกระทบของปัจจัยต่อค่าตอบสนอง

### 3.4.2 การหาสมการถดถอย และการวิเคราะห์พื้นผิวสะท้อน

ในการหาสมการถดถอย และค่าที่เหมาะสม จะใช้โปรแกรม MINITAB 16 ช่วยในการวิเคราะห์ โดยรูปแบบของสมการถดถอย จะใช้เป็นสมการลำดับที่ 2 เนื่องจากในการศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ ทำให้เส้นกราฟที่เกิดขึ้นมีจุดวกกลับ จึงไม่สามารถใช้สมการลำดับที่ 1 ซึ่งเป็นสมการเส้นตรงได้ และสมการลำดับที่ 2 เป็นรูปแบบที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป โดยรูปแบบของสมการที่ใช้จะแสดงอยู่ในสมการที่ 3.1

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{12}X_1X_2 \quad (3.1)$$

โดยที่

Y	คือ	%FAME
X <sub>1</sub>	คือ	ค่าอัตราการไหลของสารตั้งต้น
X <sub>2</sub>	คือ	อัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน
b <sub>0</sub>	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง
b <sub>1</sub>	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรไม่ทราบค่า X <sub>1</sub>
b <sub>2</sub>	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรไม่ทราบค่า X <sub>2</sub>
b <sub>11</sub>	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรไม่ทราบค่า X <sub>1</sub> ยกกำลังสอง
b <sub>12</sub>	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรไม่ทราบค่า X <sub>2</sub> ยกกำลังสอง
b <sub>22</sub>	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรไม่ทราบค่า X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในการผลิตไบโอดีเซล มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิต โดยในการศึกษาครั้งนี้ ได้เลือกอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน และอัตราการไหลของสารตั้งต้นมาเป็นปัจจัยในการทำการวิเคราะห์ เนื่องจากในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องโดยใช้ความร้อนจากไมโครเวฟ ซึ่งต้องมีการไหลของสารตั้งต้นเข้าไปเข้าไปผ่านความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟตลอดเวลาที่ทำการทดลอง อัตราการไหลของสารตั้งต้นจึงมีผลอย่างมากกับการศึกษาครั้งนี้ และในการทดลอง การให้ความร้อนกับปฏิกิริยา เป็นการให้ความร้อนจากระบบไมโครเวฟ ซึ่งการให้ความร้อนจากระบบไมโครเวฟ จะใช้หลักการการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าในการให้ความร้อน ซึ่งแอลกอฮอล์ก็เป็นโมเลกุลที่มีขั้ว จึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ดังนั้นอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน จึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ปฏิกิริยาจะได้รับ ทำให้ประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้รับ เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยผลที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ จะแสดงในหัวข้อถัดไป

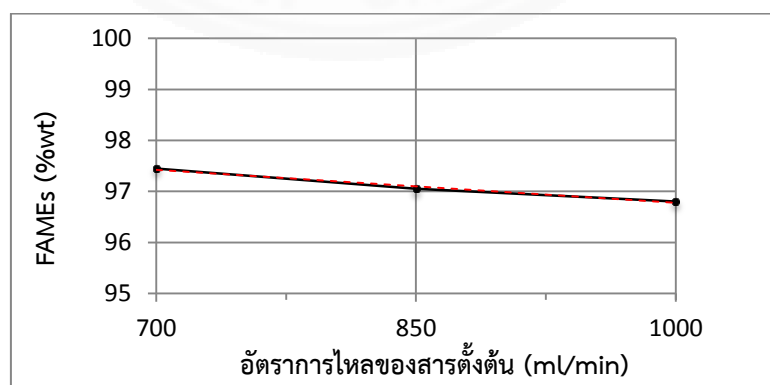
#### 4.1 ผลการทดลองจากการผลิตไบโอดีเซล

ผลการทดลองที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ จะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะทำการทดลองชุดละ 2 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยของการทดลองในแต่ละชุดการทดลอง ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยทั้งสอง

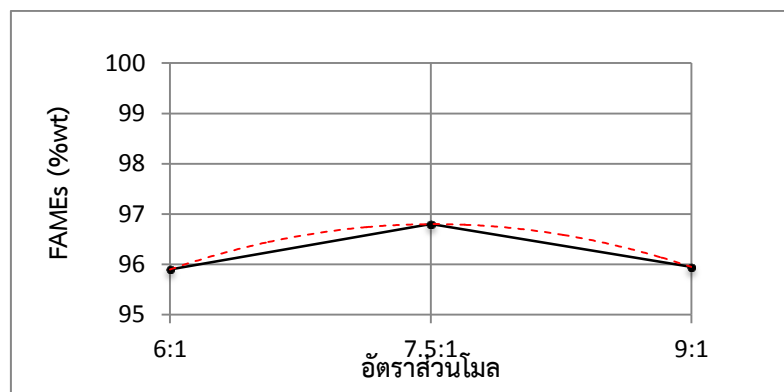
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ

ชุดการทดลอง	อัตราการไหลของสารตั้งต้น (mL/min)	อัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน	FAMEs (%wt)		
			การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
1	700	6:1	97.0	96.9	96.95
2	700	7.5:1	97.4	97.5	97.45
3	700	9:1	97.6	97.8	97.70
4	850	6:1	96.7	96.2	96.45
5	850	7.5:1	97.0	97.1	97.05
6	850	9:1	96.3	96.8	96.55
7	1000	6:1	95.8	96.0	95.90
8	1000	7.5:1	96.6	97.0	96.80
9	1000	9:1	96.5	95.4	95.95

เมื่อนำผลจากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ค่า FAMEs และอัตราการไหลของสารตั้งต้น และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า FAMEs และอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน จะได้ดังภาพที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารตั้งต้นกับค่า FAMEs มีลักษณะเป็นเส้นตรง คือ เมื่อลดอัตราการไหลลง ค่า FAMEs จะเพิ่มขึ้น ส่วนความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโมลกับค่า FAMEs มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง โดยค่าอัตราส่วนที่ทำให้ได้ค่า FAMEs สูงสุดคือ ที่อัตราส่วนโมล 7.5:1



ภาพที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารตั้งต้น และ FAMEs ที่อัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 7.5:1



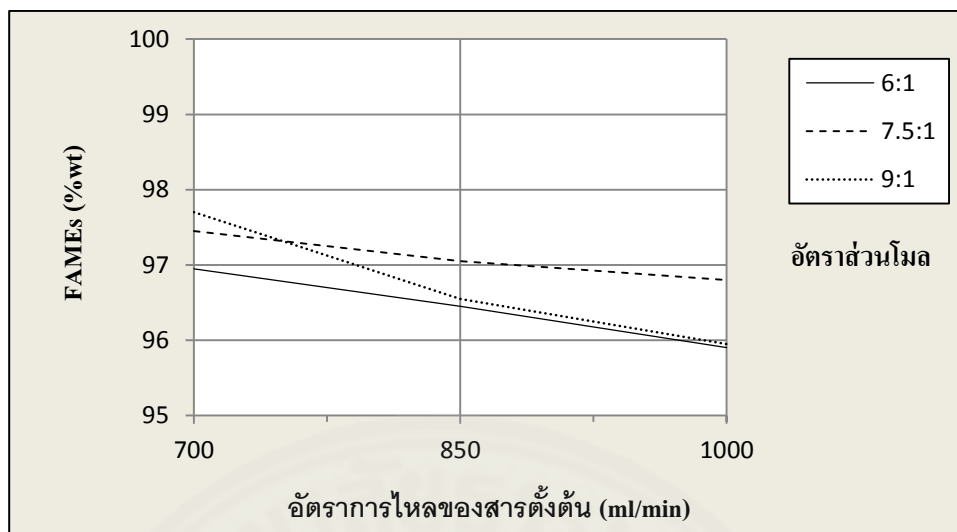
ภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมล และ FAMES ที่อัตราการไหลของสารตั้งต้น 1000 ml/min

#### 4.2 การวิเคราะห์แฟคทอเรียลเต็มรูป

การวิเคราะห์แฟคทอเรียลเต็มรูปเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้น และอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมัน ว่าทั้ง 2 ปัจจัย มีผลกระทบร่วมกันหรือไม่ และเป็นการวิเคราะห์ว่าปัจจัยทั้ง 2 มีผลต่อค่าตอบสนองหรือไม่ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้คือ ค่าของเมทิลเอสเทอร์ (FAMES)

##### 4.2.1 การสร้างกราฟผลกระทบร่วม

จากการสร้างกราฟผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยทั้ง 2 คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้น และอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมัน กับค่าเฉลี่ยของ FAMES ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.3 โดยจากกราฟแสดงให้เห็นว่าเส้นกราฟทั้ง 3 ไม่มีลักษณะเป็นเส้นขนานกัน หรืออีกนัยหนึ่งก็คือมีแนวโน้มที่อาจจะตัดกัน ทำให้สรุปได้ว่ามีผลกระทบร่วมกัน อย่างไรก็ตามการใช้กราฟเป็นเพียงการวิเคราะห์เบื้องต้น ไม่สามารถยืนยันได้ 100% ว่าปัจจัยนั้นๆ มีผลกระทบร่วมต่อกันหรือไม่ เนื่องจากอาจมีการคลาดเคลื่อนในเรื่องของอัตราส่วนหรือ เรื่องอื่นๆ อีก ดังนั้นเพื่อความแน่ใจจึงต้องทำการทดสอบนัยสำคัญสำหรับอิทธิพลของการกระทำร่วมเสียก่อน ซึ่งก็คือการสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน นอกจากนี้การสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนยังสามารถศึกษาผลกระทบร่วมของปัจจัยต่อค่าตอบสนองได้อีกด้วย



ภาพที่ 4.3 กราฟผลกระทบร่วมระหว่างอัตราการไหลของสารตั้งต้น และอัตราส่วนโมลระหว่าง แอลกอฮอล์กับน้ำมัน

#### 4.2.2 การสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

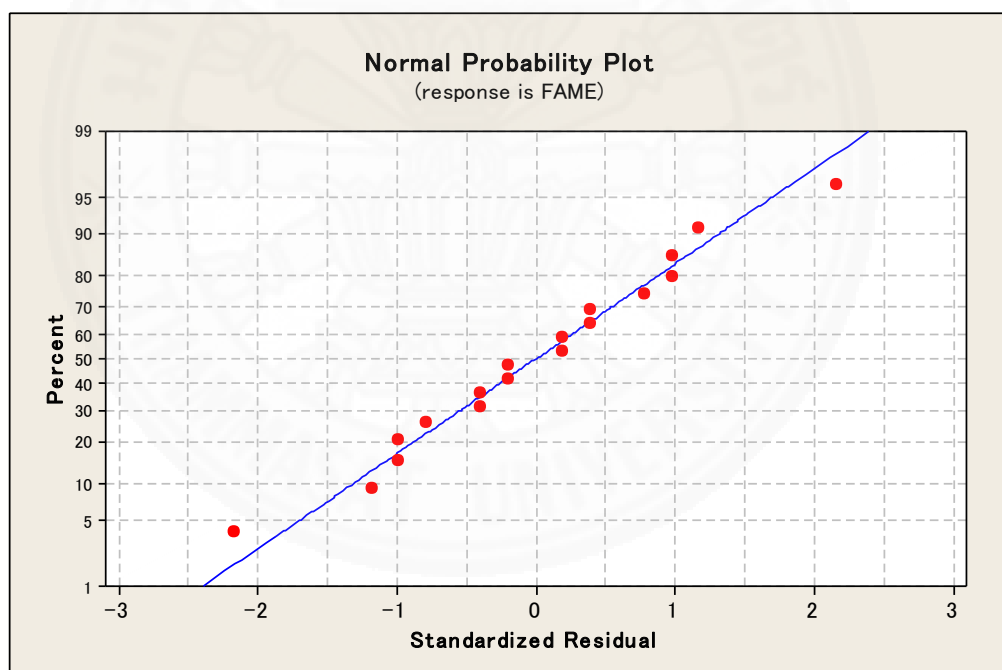
ในการสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจะตั้งสมมติฐานไว้ว่า ปัจจัยจะมีผลกระทบต่อค่าตอบสนอง ก็ต่อเมื่อค่าสถิติ  $F_0 > F_{ระดับนัยสำคัญ, (a-1, N-a)}$  ซึ่ง  $a$  คือ ระดับของปัจจัย และ  $N$  คือ จำนวนการทดลอง โดยในการศึกษาครั้งนี้ กำหนดให้ค่านัยสำคัญเท่ากับ 0.05 หรือ 5% จากตาราง Percentage Points of the F Distribution จะได้ค่า  $F_{0.05, (2, 15)} = 3.68$  ซึ่งตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิจัยครั้งนี้ จะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราการไหลของสารตั้งต้น และอัตราส่วนโมลระหว่าง แอลกอฮอล์กับน้ำมัน

แหล่งที่มา (Source)	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ย SS (MS)	ค่าสถิติ $F_0$
$X_1$ (Flowrate)	2	4.01	2.01	18.25
$X_2$ (Molar ratio)	2	1.34	0.67	6.08
$X_1X_2$	4	0.68	0.17	1.55
ค่าความคลาดเคลื่อน (Error)	9	0.99	0.11	
ผลรวม (Total)	17	7.02		

จากตารางที่ 4.2 สามารถสรุปได้ว่าตัวแปรทั้ง 2 ซึ่งได้แก่ อัตราการไหลของสารตั้งต้น ( $X_1$ ) และอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมัน ( $X_2$ ) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า %FAME เนื่องจากค่าสถิติ  $F_0$  ของ  $X_1$  มีค่าเท่ากับ 18.25 และค่าสถิติ  $F_0$  ของ  $X_2$  มีค่าเท่ากับ 6.08 ซึ่งมากกว่าค่า  $F$  ที่ได้จากราย Percentage Points of the F Distribution ที่มีค่าเท่ากับ 3.68 แต่ค่าสถิติ  $F_0$  ของ  $X_1X_2$  มีค่าเท่ากับ 1.55 ซึ่งน้อยกว่าค่า  $F$  ที่ได้จากราย จึงสรุปได้ว่าอัตราการไหลของสารตั้งต้น และอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมัน ไม่มีผลกระทบร่วมกัน

ในการตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐาน ได้มีการใช้กราฟความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติ (Normal Probability Port) ตรวจสอบค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น ถ้ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงก็สามารถสรุปได้ว่าค่าผิดพลาด (Residual) มีการแจกแจงปกติ จากภาพที่ 4.4 กราฟความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติ มีลักษณะเป็นเส้นตรง จึงสามารถนำข้อมูลที่สรุปได้จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนข้างต้นมาใช้ได้



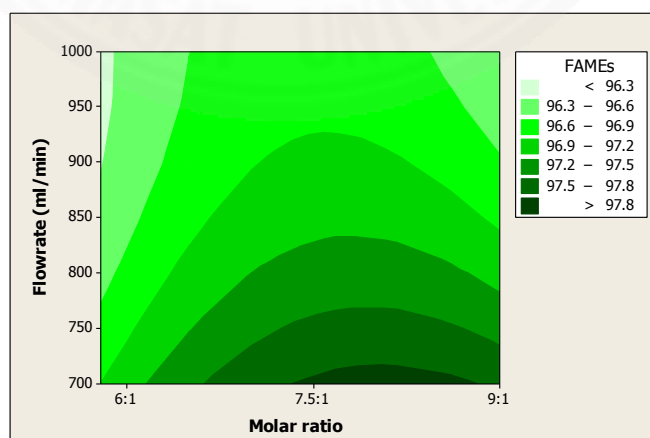
ภาพที่ 4.4 กราฟความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติที่ได้จากการทดลอง

### 4.3 การวิเคราะห์พื้นผิวสะท้อน

จากโปรแกรม MINITAB 16 จะได้สมการถดถอย ดังแสดงในสมการที่ 4.1 เพื่อใช้ในการ คาดเดาค่าของ %FAME และสามารถแสดงแนวโน้มของค่า %FAME ได้ โดยใช้กราฟโครงร่าง (Contour plot) และกราฟพื้นผิว (Surface plot) ดังแสดงในภาพที่ 4.5 และภาพที่ 4.6

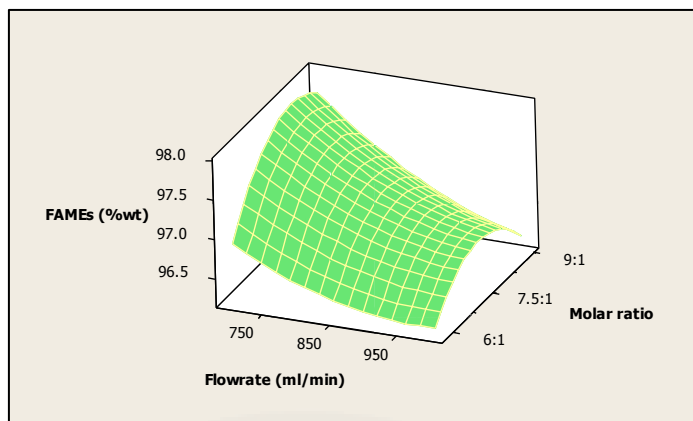
$$Y = -782.87 + 0.033(X_1) + 1963.75(X_2) + 8.52 \times 10^{-6}(X_1^2) - 1083.33(X_2^2) - 0.058(X_1X_2) \quad (4.1)$$

จากสมการที่ 4.1 ถ้าพิจารณาในเทอมของอัตราการไหลของสารตั้งต้น ( $X_1$ ) จะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร  $X_1^2$  มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์ตัวอื่น จึงทำให้มีผลน้อยมาก กับสมการ ทำให้สมการในเทอมของ  $X_1$  มีลักษณะเป็นสมการเส้นตรง กล่าวคือเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า อัตราการไหล จะทำให้ค่าของเมทิลเอสเทอร์เปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลแบบเชิงเส้น ส่วนในเทอม ของอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ( $X_2$ ) มีลักษณะเป็นสมการลำดับที่ 2 ซึ่งเป็นสมการ เส้นโค้ง กล่าวคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโมล ค่าของเมทิลเอสเทอร์จะเปลี่ยนแปลงไปแบบ กำลังสอง และในเทอมของ  $X_1X_2$  ซึ่งเป็นเทอมที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสาร ตั้งต้น และอัตราส่วนโมล สัมประสิทธิ์หน้าเทอมนี้มีค่าค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์ตัวอื่นๆ ในสมการ ทำให้มีผลน้อยมากกับค่าของเมทิลเอสเทอร์ โดยสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากสมการ คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้นที่ 700 ml/min และอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่ 8:1 ซึ่งให้ค่าเมทิลเอสเทอร์ 97.91 %wt



ภาพที่ 4.5 กราฟโครงร่างความสัมพันธ์ของ %FAME ระหว่างอัตราการไหลของสารตั้งต้น และ อัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมัน





ภาพที่ 4.6 กราฟพื้นผิวความสัมพันธ์ของ %FAME ระหว่างอัตราการไหลของสารตั้งต้น และ อัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมัน

จากภาพที่ 4.5 และภาพที่ 4.6 ค่า %FAME จะมีค่ามากที่สุดเมื่ออัตราส่วนโมลระหว่าง แอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน มีค่ามากกว่า 7.5:1 และอัตราการไหลมีค่าน้อยกว่า 720 ml/min ซึ่งจะให้ค่า ของ %FAME มากกว่า 97.5% จะเห็นได้ว่าค่าของ %FAME จะมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนโมล ระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน มีค่าเพิ่มขึ้น แต่กลับกันคือ ค่า %FAME จะลดลง เมื่ออัตราการไหลมีค่า สูงขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง โดยใช้ความร้อนจากไมโครเวฟ และได้ใช้การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป 3 ระดับ 2 ปัจจัย (Full Factorial Design  $3^2$ ) และวิธีพื้นผิวสะท้อน (Response Surface Method) มาช่วยวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของอัตราการไหลของสารตั้งต้น และอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน โดยใช้ค่าของเมทิลเอสเทอร์ (FAMES) ที่วัดได้จากเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี เป็นตัววัดประสิทธิภาพของไบโอดีเซล โดยอัตราการไหลของสารตั้งต้นที่นำมาวิเคราะห์ จะอยู่ในช่วง 700 – 1000 ml/min และอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่นำมาวิเคราะห์ จะอยู่ในช่วง 6:1 ถึง 9:1 เมื่อนำไบโอดีเซลที่ได้จากการผลิตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ ไปวัดค่าของเมทิลเอสเทอร์ โดยค่าที่สูงสุดอยู่ที่ 97.7 %wt ซึ่งเป็นค่าที่สภาวะอัตราการไหลของสารตั้งต้นที่ 700 ml/min และอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่ 9:1 ซึ่งค่าของอัตราส่วนโมลจะแตกต่างจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ได้ศึกษามา ที่ใช้การให้ความร้อนแบบทั่วไป โดยค่าอัตราส่วนโมลจะอยู่ที่ประมาณ 6:1 ทั้งนี้ เนื่องจากการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟใช้หลักการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้น ซึ่งแอลกอฮอล์เป็นโมเลกุลที่มีขั้ว ดังนั้นเมื่อใช้แอลกอฮอล์ในอัตราส่วนที่มากขึ้น ก็จะทำให้เกิดความร้อนมากขึ้น ปฏิริยาที่ได้ก็จะสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ทำให้ค่าของเมทิลเอสเทอร์ที่ออกมา มีค่าสูงกว่าการใช้อัตราส่วนที่น้อยกว่า และเนื่องจากอาจเกิดการสูญเสียแอลกอฮอล์ขึ้นในการทำปฏิริยา ทำให้ต้องใช้แอลกอฮอล์ในปริมาณเพิ่มขึ้น เพื่อที่จะทำให้ปฏิริยานั้นสมบูรณ์ ในเรื่องของอัตราการไหล จะเห็นว่าค่าที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 700 ml/min ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดในช่วงที่นำมาวิเคราะห์ เนื่องจากเมื่อค่าอัตราการไหลสูงขึ้น จะทำให้เวลาในการทำปฏิริยานั้นลดน้อยลง การสัมผัสกันของเนื้อสารก็ลดลง อาจเป็นผลให้ปฏิริยานั้นไม่สมบูรณ์ ทำให้ค่าค่าของเมทิลเอสเทอร์มีค่าน้อยกว่าการทำปฏิริยาในช่วงอัตราการไหลที่ต่ำกว่า แต่หากคำนึงถึงเรื่องของเวลา ถ้าต้องการผลิตไบโอดีเซลภายในเวลาที่สั้นลง ก็ไม่ควรใช้ค่าอัตราการไหลที่ต่ำจนเกินไป

เมื่อนำค่าของเมทิลเอสเทอร์ที่วัดได้จากเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี มาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้สมการถดถอย และวิธีพหุคูณอิสระ ซึ่งสมการที่ได้จากผลการทดลอง คือ

$$Y = -782.87 + 0.033(X_1) + 1963.75(X_2) + 8.52 \times 10^{-6}(X_1^2) - 1083.33(X_2^2) - 0.058(X_1X_2)$$

โดย Y คือค่าของเมทิลเอสเทอร์ (FAMES)  $X_1$  คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้น และ  $X_2$  คือ อัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน จากสมการถดถอยในเทอมของอัตราการไหลของสารตั้งต้น ( $X_1$ ) จะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร  $X_1^2$  มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์ตัวอื่น จึงทำให้มีผลน้อยมากกับสมการ ทำให้สมการในเทอมของ  $X_1$  มีลักษณะเป็นสมการเส้นตรง กล่าวคือเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหล จะทำให้ค่าของเมทิลเอสเทอร์เปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลแบบเชิงเส้น ส่วนในเทอมของอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ( $X_2$ ) มีลักษณะเป็นสมการลำดับที่ 2 ซึ่งเป็นสมการเส้นโค้ง กล่าวคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโมล ค่าของเมทิลเอสเทอร์จะเปลี่ยนแปลงไปแบบกำลังสอง และในเทอมของ  $X_1X_2$  ซึ่งเป็นเทอมที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารตั้งต้น และอัตราส่วนโมล สัมประสิทธิ์หน้าเทอมนี้มีค่าค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์ตัวอื่นๆ ในสมการ ทำให้มีผลน้อยมากกับค่าของเมทิลเอสเทอร์ โดยสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากสมการ คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้นที่ 700 ml/min และอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่ 8:1 ซึ่งให้ค่าเมทิลเอสเทอร์ 97.91 %wt ในส่วนของอัตราส่วนโมล ค่าที่ได้จากสมการจะแตกต่างกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงอยู่เล็กน้อย โดยการทดลองจริงจะอยู่ที่ 9:1 แต่จากสมการจะอยู่ที่ 8:1 ซึ่งค่าของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีค่าไม่ต่างกันมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองจริงเป็นการเลือกค่าบางตำแหน่ง เพื่อจะนำมาวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งค่า ณ ตำแหน่งอื่นๆ อาจจะไม่ใช่ค่าที่สูงสุดก็ได้ แต่เมื่อได้สมการจากการวิเคราะห์แล้ว เราสามารถนำสมการมาหาค่าที่ตำแหน่งที่ให้ค่า FAMES ที่สูงขึ้นได้ ซึ่งจากช่วงที่นำมาทดลอง ค่าอัตราส่วนโมลที่ให้ค่า FAMES สูงสุดคือ 8:1 จากค่าของเมทิลเอสเทอร์ 97.91 %wt เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานไบโอดีเซลของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่กำหนดไว้ว่า ค่าของเมทิลเอสเทอร์ต้องไม่ต่ำกว่า 96.5 %wt ซึ่งไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการศึกษาครั้งนี้ สามารถนำไปใช้งานได้จริงตามมาตรฐานของไบโอดีเซล

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง โดยใช้ความร้อนจากระบบไมโครเวฟ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของอัตราการไหลของสารตั้งต้น และอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมัน ซึ่งจากการศึกษาในหลายๆ งานวิจัย ช่วงที่ทำให้ไบโอดีเซลมีประสิทธิภาพสูงสุดคือที่อัตราการไหล 700 – 1000 ml/min และ อัตราส่วนโมล 6:1 – 9:1 แต่จากผลการทดลอง ถ้าดูจากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าที่ทำให้ไบโอดีเซลมีประสิทธิภาพสูงสุดจะอยู่ที่อัตราการไหลของสารตั้งต้น 700 ml/min ซึ่งเป็นช่วงปลายสุดของกราฟ แต่ยังไม่ใช่ว่าจุดสูงสุดของกราฟ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในช่วงของปัจจัยที่เพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

และจากงานวิจัยในครั้งนี้ ทำให้ทราบว่า อัตราส่วนโมลที่มีความเหมาะสมที่สุด คือ 8:1 ซึ่งมีค่าสูงกว่างานวิจัยอื่นๆ ที่ใช้การให้ความร้อนแบบทั่วไป โดยใช้อัตราส่วนโมลที่ 6:1 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแอลกอฮอล์เป็นโมเลกุลมีขั้ว เมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟ จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ยิ่งอัตราส่วนยิ่งมาก ปฏิกิริยาที่เกิดก็จะสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น แต่อีกเหตุผลหนึ่งที่ต้องใช้อัตราส่วนที่มากกว่า ก็อาจจะเกิดจากการสูญเสียแอลกอฮอล์ในระหว่างที่ทำปฏิกิริยา ถ้ามีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อลดการสูญเสียแอลกอฮอล์ระหว่างทำปฏิกิริยา ก็น่าจะทำให้ลดอัตราส่วนลดลงได้

ในการผลิตไบโอดีเซลนั้น ยังมีปัจจัยอีกหลายปัจจัย ที่มีผลต่อการผลิต เช่น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น ซึ่งสามารถนำไปศึกษาเพิ่มเติม โดยใช้วิธีการเดียวกันกับการวิจัยครั้งนี้ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ได้

## รายการอ้างอิง

1. นคร ทิพย์วงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. [กรุงเทพฯ]: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น); 2553.
2. ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล. ชีวมวล Biomass. [กรุงเทพฯ]: บริษัท คิว พรีนซ์ แมเนจเม้นท์ จำกัด; 2549.
3. สุพรชัย มั่งมีสิทธิ์. ไบโอดีเซลชุมชนรากแก้ว วิธีการอยู่อย่างพอเพียง. [นครปฐม]: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2550.
4. กรมธุรกิจพลังงาน. กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549 [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: [ม.ป.ท.]; 2549; [สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ก.ค. 2559] จาก: [http://www.dede.go.th/ewt\\_dl\\_link.php?nid=371](http://www.dede.go.th/ewt_dl_link.php?nid=371)
5. กรมธุรกิจพลังงาน. กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2556 [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: [ม.ป.ท.]; 2556 [สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ก.ค. 2559]. จาก: <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2556/E/158/15.PDF>
6. โครงการ เคยู-ไบโอดีเซล. ความรู้เกี่ยวกับไบโอดีเซล [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: [ม.ป.ท.]; 2550 [สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ก.ค. 2559]. จาก: [biodiesel.rdi.ku.ac.th](http://biodiesel.rdi.ku.ac.th)
7. พิศมัย เจนวนิชปัญจกุล. แนวทางการพัฒนามาตรฐานไบโอดีเซลในภูมิภาคเอเปค [อินเทอร์เน็ต]. ปทุมธานี: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย; 2552 [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 มิ.ย. 2559]. จาก: [http://www.tistr.or.th/APEC\\_website/Document/APEC%20BDF%20Guidelines\\_Thai.pdf](http://www.tistr.or.th/APEC_website/Document/APEC%20BDF%20Guidelines_Thai.pdf)
8. สมศรี จรุงเรือง. ระเบียบวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2542.
9. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ. ปทุมธานี: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2551.
10. พิมพ์ัญ พรเฉลิมพงศ์, นิธิยา รัตนานนท์. ไมโครเวฟ [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: [ม.ป.ท.]; 2550 [สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ก.ค. 2559]. จาก: [www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0401/microwave-ไมโครเวฟ](http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0401/microwave-ไมโครเวฟ)
11. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ข้อมูลเทคโนโลยีเชิงลึก การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: [ม.ป.ท.]; 2555 [สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ก.ค. 2559]. จาก: <http://dede-at3.bright-ce.com/Vol2/04Sample/PDF/08dielectric.pdf>

12. ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. การออกแบบและวิเคราะห์ การทดลอง Design and Analysis of Experiments. กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด; 2551.
13. ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2545.
14. M.Berrios, M.C.Gutierrez, M.A.Martin, A.Martin. Application of the factorial design of experiments to biodiesel production from lard. Fuel Processing Technology. 2009; 90: 1447-1451.
15. Kok Tat Tan, Keat Teong Lee, Abdul Rahman Mohamed. A glycerol-free process to produce biodiesel by supercritical methyl acetate technology : An optimization study via Response Surface Methodology. Bioresource Technology. 2010; 101: 965-969.
16. G.Vicente, A.Coteron, M.Matinez, J.Aracil. Application of the factorial design of experiments and response surface methodology to optimize biodiesel production. Industrial Crops and Products. 1998; 8: 29-35
17. Yasin Yucel. Optimization of biocatalytic biodiesel production from pomace oil using response surface methodology. Fuel Processing Technology. 2012; 99: 97-102.
18. Kang-Shin Chen, Yuan-Chung Lin, Kuo-Hsiang Hsu, Hsin-Kai Wang. Improving biodiesel yields from waste cooking oil by using sodium methoxide and a microwave heating system. Energy. 2012; 38: 151-156.
19. Shakinaz A. El Sherbiny, Ahmed A. Refaat, Shakinaz T. El Sheltawy. Production of biodiesel using the microwave technique. Journal of Advanced Research. 2010; 1: 309-314.
20. ศิริพรรณ กลั่นศิริ, ชาญณรงค์ อัสวเทศานุกภาพ. การผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการให้ความร้อนจากไมโครเวฟ และการไหลต่อเนื่องและการทดสอบสมรรถนะของไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยว. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2557; 22(3): 436-446.
21. ศิริพรรณ กลั่นศิริ. การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง โดยใช้การให้ความร้อนจากไมโครเวฟ [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2556.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตาราง Percentage Point of the F Distribution

(a) 5% points

$\nu_2$	$\nu_1 = \text{df for the numerator}$																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$
1	161.448	199.500	215.707	224.583	230.162	233.986	236.768	238.883	240.543	241.882	243.906	245.950	248.013	249.052	250.095	251.143	252.196	253.253	254.314
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385	19.396	19.413	19.429	19.446	19.454	19.462	19.471	19.479	19.487	19.496
3	10.1280	9.5521	9.2766	9.1172	9.0135	8.9406	8.8867	8.8452	8.8123	8.7855	8.7446	8.7029	8.6602	8.6385	8.6166	8.5944	8.5720	8.5493	8.5265
4	7.7086	6.9443	6.5914	6.3882	6.2561	6.1631	6.0942	6.0410	5.9988	5.9644	5.9117	5.8578	5.8025	5.7744	5.7459	5.7170	5.6877	5.6581	5.6281
5	6.6079	5.7861	5.4095	5.1922	5.0503	4.9503	4.8759	4.8183	4.7725	4.7351	4.6777	4.6188	4.5581	4.5272	4.4957	4.4638	4.4314	4.3985	4.3650
6	5.9874	5.1433	4.7571	4.5337	4.3874	4.2839	4.2067	4.1468	4.0990	4.0600	3.9999	3.9381	3.8742	3.8415	3.8082	3.7743	3.7398	3.7047	3.6689
7	5.5914	4.7374	4.3468	4.1203	3.9715	3.8660	3.7870	3.7257	3.6767	3.6365	3.5747	3.5107	3.4445	3.4105	3.3758	3.3404	3.3043	3.2674	3.2298
8	5.3177	4.4590	4.0662	3.8379	3.6875	3.5806	3.5005	3.4381	3.3881	3.3472	3.2839	3.2184	3.1503	3.1152	3.0794	3.0428	3.0053	2.9669	2.9276
9	5.1174	4.2565	3.8625	3.6331	3.4817	3.3738	3.2927	3.2296	3.1789	3.1373	3.0729	3.0061	2.9365	2.9005	2.8637	2.8259	2.7872	2.7475	2.7067
10	4.9646	4.1028	3.7083	3.4780	3.3258	3.2172	3.1355	3.0717	3.0204	2.9782	2.9130	2.8450	2.7740	2.7372	2.6996	2.6609	2.6211	2.5801	2.5379
11	4.8443	3.9823	3.5874	3.3567	3.2039	3.0946	3.0123	2.9480	2.8962	2.8536	2.7876	2.7186	2.6464	2.6090	2.5705	2.5309	2.4901	2.4480	2.4045
12	4.7472	3.8853	3.4903	3.2592	3.1059	2.9961	2.9134	2.8486	2.7964	2.7534	2.6866	2.6169	2.5436	2.5055	2.4663	2.4259	2.3842	2.3410	2.2962
13	4.6672	3.8056	3.4105	3.1791	3.0254	2.9153	2.8321	2.7669	2.7144	2.6710	2.6037	2.5331	2.4589	2.4202	2.3803	2.3392	2.2966	2.2524	2.2064
14	4.6001	3.7389	3.3439	3.1122	2.9582	2.8477	2.7642	2.6987	2.6458	2.6022	2.5342	2.4630	2.3879	2.3487	2.3082	2.2664	2.2229	2.1778	2.1307
15	4.5431	3.6823	3.2874	3.0556	2.9013	2.7905	2.7066	2.6408	2.5876	2.5437	2.4753	2.4034	2.3275	2.2878	2.2468	2.2043	2.1601	2.1141	2.0659
16	4.4940	3.6337	3.2389	3.0069	2.8524	2.7413	2.6572	2.5911	2.5377	2.4935	2.4247	2.3522	2.2756	2.2354	2.1938	2.1507	2.1058	2.0589	2.0096
17	4.4513	3.5915	3.1968	2.9647	2.8100	2.6987	2.6143	2.5480	2.4943	2.4499	2.3807	2.3077	2.2304	2.1898	2.1477	2.1040	2.0584	2.0107	1.9604
18	4.4139	3.5546	3.1599	2.9277	2.7729	2.6613	2.5767	2.5102	2.4563	2.4117	2.3421	2.2686	2.1906	2.1497	2.1071	2.0629	2.0166	1.9681	1.9168
19	4.3807	3.5219	3.1273	2.8951	2.7401	2.6283	2.5435	2.4768	2.4227	2.3779	2.3080	2.2341	2.1555	2.1141	2.0712	2.0264	1.9795	1.9302	1.8780
20	4.3512	3.4928	3.0984	2.8661	2.7109	2.5990	2.5140	2.4471	2.3928	2.3479	2.2776	2.2033	2.1242	2.0825	2.0391	1.9938	1.9464	1.8963	1.8432
21	4.3248	3.4668	3.0725	2.8401	2.6848	2.5727	2.4876	2.4205	2.3660	2.3210	2.2504	2.1757	2.0960	2.0540	2.0102	1.9645	1.9165	1.8657	1.8117
22	4.3009	3.4434	3.0491	2.8167	2.6613	2.5491	2.4638	2.3965	2.3419	2.2967	2.2258	2.1508	2.0707	2.0283	1.9842	1.9380	1.8894	1.8380	1.7831
23	4.2793	3.4221	3.0280	2.7955	2.6400	2.5277	2.4422	2.3748	2.3201	2.2747	2.2036	2.1282	2.0476	2.0050	1.9605	1.9139	1.8648	1.8128	1.7570
24	4.2597	3.4028	3.0088	2.7763	2.6207	2.5082	2.4226	2.3551	2.3002	2.2547	2.1834	2.1077	2.0267	1.9838	1.9390	1.8920	1.8424	1.7896	1.7331
25	4.2417	3.3852	2.9912	2.7587	2.6030	2.4904	2.4047	2.3371	2.2821	2.2365	2.1649	2.0889	2.0075	1.9643	1.9192	1.8718	1.8217	1.7684	1.7110
26	4.2252	3.3690	2.9752	2.7426	2.5868	2.4741	2.3883	2.3205	2.2655	2.2197	2.1479	2.0716	1.9898	1.9464	1.9010	1.8533	1.8027	1.7488	1.6906
27	4.2100	3.3541	2.9604	2.7278	2.5719	2.4591	2.3732	2.3053	2.2501	2.2043	2.1323	2.0558	1.9736	1.9299	1.8842	1.8361	1.7851	1.7306	1.6717
28	4.1960	3.3404	2.9467	2.7141	2.5581	2.4453	2.3593	2.2913	2.2360	2.1900	2.1179	2.0411	1.9586	1.9147	1.8687	1.8203	1.7689	1.7138	1.6541
29	4.1830	3.3277	2.9340	2.7014	2.5454	2.4324	2.3463	2.2783	2.2229	2.1768	2.1045	2.0275	1.9446	1.9005	1.8543	1.8055	1.7537	1.6981	1.6377
30	4.1709	3.3158	2.9223	2.6896	2.5336	2.4205	2.3343	2.2662	2.2107	2.1646	2.0921	2.0148	1.9317	1.8874	1.8409	1.7918	1.7396	1.6835	1.6223
40	4.0847	3.2317	2.8387	2.6060	2.4495	2.3359	2.2490	2.1802	2.1240	2.0772	2.0035	1.9245	1.8389	1.7929	1.7444	1.6928	1.6373	1.5766	1.5089
60	4.0012	3.1504	2.7581	2.5252	2.3683	2.2541	2.1665	2.0970	2.0401	1.9926	1.9174	1.8364	1.7480	1.7001	1.6491	1.5943	1.5343	1.4673	1.3893
120	3.9201	3.0718	2.6802	2.4472	2.2899	2.1750	2.0868	2.0164	1.9588	1.9105	1.8337	1.7505	1.6587	1.6084	1.5543	1.4952	1.4290	1.3519	1.2539
$\infty$	3.8415	2.9957	2.6049	2.3719	2.2141	2.0986	2.0096	1.9384	1.8799	1.8307	1.7522	1.6664	1.5705	1.5173	1.4591	1.3940	1.3180	1.2214	1.0033





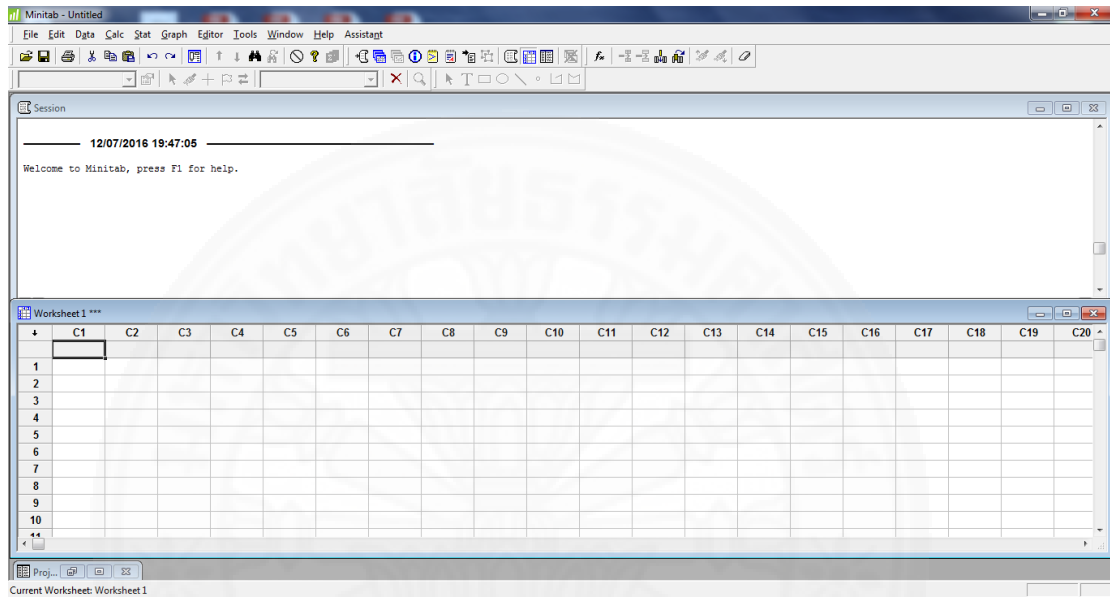




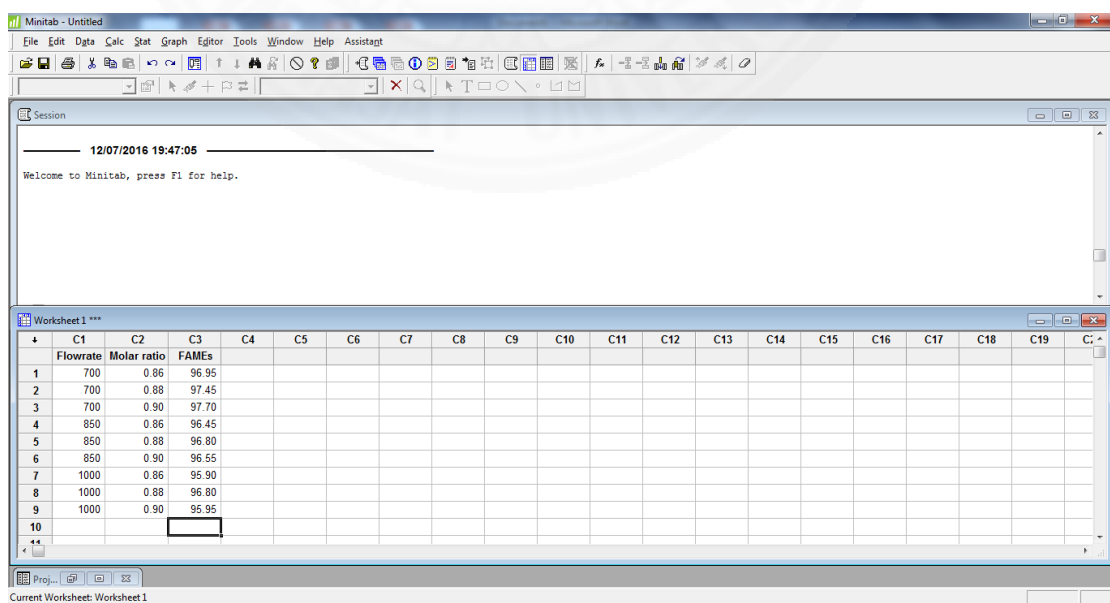
## ภาคผนวก ข

### การใช้โปรแกรม Minitab 16 หาสถกการถดถอย

#### 1. เปิดโปรแกรม Minitab

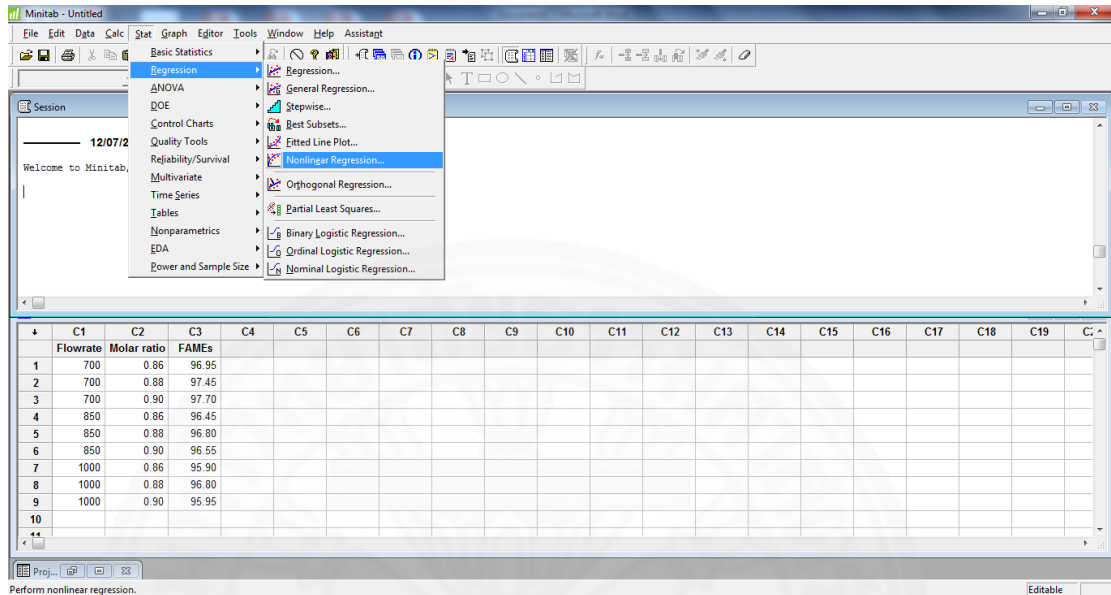


#### 2. ใส่ข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์

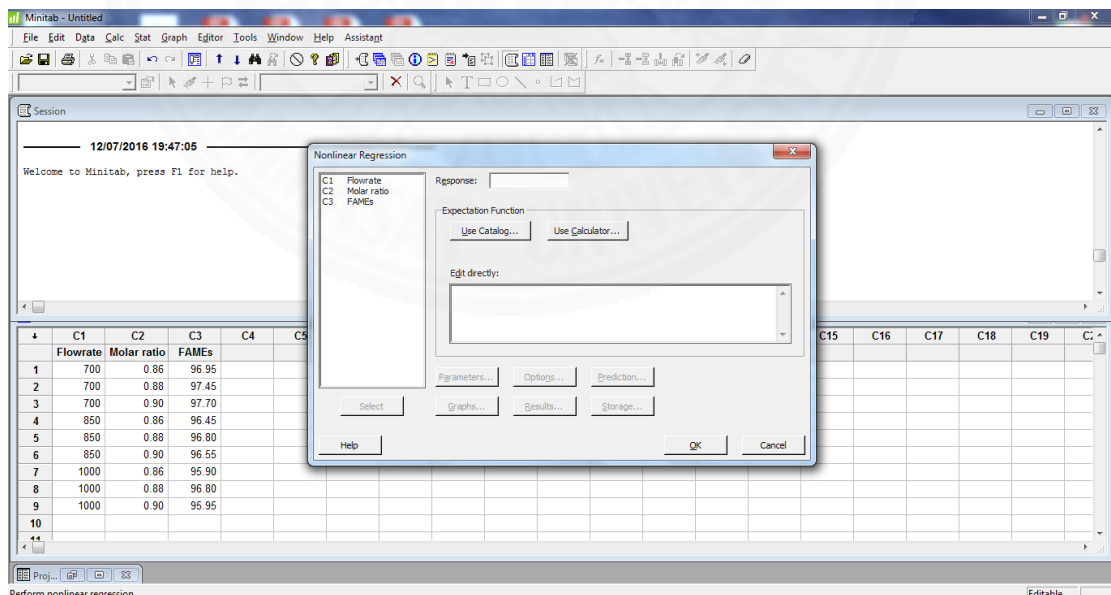


3. เลือกโปรแกรมที่ใช้ในการหาสมการถดถอย ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

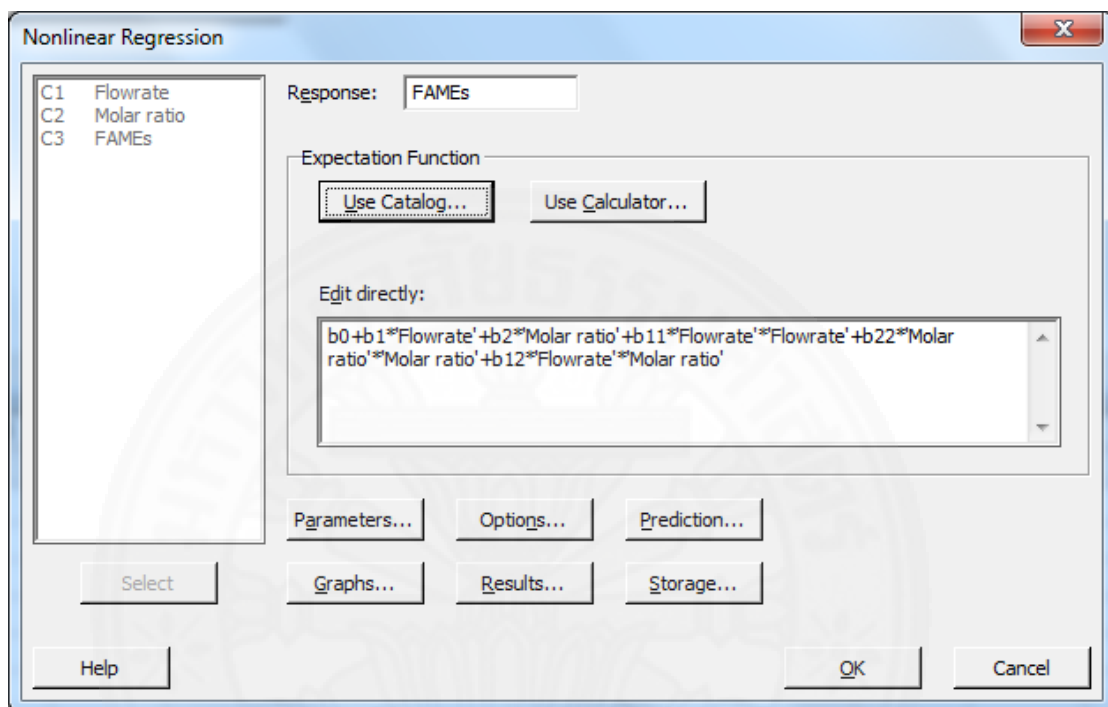
Start → Regression → Nonlinear Regress



4. เมื่อเลือกโปรแกรมแล้วจะปรากฏกล่องข้อความ “Nonlinear Regression”



5. คลิกที่ช่อง “Response” แล้วเลือกตัวแปรที่ต้องการให้เป็นค่าตอบสนองใส่ลงไป โดยการคลิก 2 ครั้งที่ตัวแปรที่ต้องการจากช่องทางด้านซ้าย โดยในงานวิจัยครั้งนี้ ให้คลิกที่ C3 หลังจากนั้นใส่รูปแบบของสมการในช่อง “Edit directly” แล้วกด OK



6. โปรแกรมจะวิเคราะห์สมการ หาสัมประสิทธิ์หน้าสมการ และแสดงออกมา

Equation

$$\text{FAMEs} = -782.865 + 0.0330185 * \text{Flowrate} + 1963.75 * \text{'Molar ratio'} + 2.51852e-006 * \text{Flowrate} * \text{Flowrate} - 1083.33 * \text{'Molar ratio'} * \text{'Molar ratio'} - 0.0583333 * \text{Flowrate} * \text{'Molar ratio'}$$

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	SE Estimate
b0	-782.86	384.911
b1	0.03	0.044
b2	1963.75	872.221
b11	0.00	0.000
b22	-1083.33	495.057
b12	-0.06	0.047

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
	Flowrate	Molar ratio	FAMEs																	
1	700	0.86	96.95																	
2	700	0.88	97.45																	
3	700	0.90	97.70																	
4	850	0.86	96.45																	
5	850	0.88	96.80																	
6	850	0.90	96.55																	
7	1000	0.86	95.90																	
8	1000	0.88	96.80																	
9	1000	0.90	96.55																	

## ภาคผนวก ค

## การคำนวณค่าในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน

$$SS_T = \sum \sum \sum (y_{ijk} - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^N y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_T = [(97)^2 + (96.9)^2 + (96.7)^2 + (96.2)^2 + \dots + (96.5)^2 + (95.4)^2] - [(1741.6)^2 / 18]$$

$$SS_T = 7.02$$

$$SS_{x_1(\text{Flowrate})} = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i...}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_{x_1(\text{Flowrate})} = [(584.2)^2 + (580.1)^2 + (577.3)^2] / 6 - [(1741.6)^2 / 18]$$

$$SS_{x_1(\text{Flowrate})} = 4.01$$

$$SS_{x_2(\text{Molar ratio})} = \sum_{j=1}^b \frac{y_{j...}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_{x_2(\text{Molar ratio})} = [(578.6)^2 + (582.6)^2 + (580.4)^2] / 6 - [(1741.6)^2 / 18]$$

$$SS_{x_2(\text{Molar ratio})} = 1.34$$

$$SS_{\text{subtotal}} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij...}^2}{n} - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_{\text{subtotal}} = [(193.9)^2 + (194.9)^2 + (195.4)^2 + (192.9)^2 + (194.1)^2 + (193.1)^2 + (191.8)^2 + (193.6)^2 + (191.9)^2] / 2 - [(1741.6)^2 / 18]$$

$$SS_{\text{subtotal}} = 6.03$$

$$SS_{x_1x_2} = SS_{\text{subtotal}} - SS_{x_1} - SS_{x_2}$$

$$SS_{x_1x_2} = 6.03 - 4.01 - 1.34$$

$$SS_{x_1x_2} = 0.68$$

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{subtotal}}$$

$$SS_E = 7.02 - 6.03$$

$$SS_E = 0.99$$

$$MS_{x_1} = \frac{SS_{x_1}}{d.f.}$$

$$MS_{x_1} = \frac{4.01}{2} = 2.01$$

$$MS_{x_2} = \frac{SS_{x_2}}{d.f.}$$

$$MS_{x_2} = \frac{1.34}{2} = 0.67$$

$$MS_{x_1x_2} = \frac{SS_{x_1x_2}}{d.f.}$$

$$MS_{x_1x_2} = \frac{0.68}{4} = 0.17$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{d.f.}$$

$$MS_E = \frac{0.99}{9} = 0.11$$

$$F_{x_1} = \frac{MS_{x_1}}{MS_E}$$

$$F_{x_1} = \frac{2.01}{0.11} = 18.25$$

$$F_{x_2} = \frac{MS_{x_2}}{MS_E}$$

$$F_{x_2} = \frac{0.67}{0.11} = 6.08$$

$$F_{x_1x_2} = \frac{MS_{x_1x_2}}{MS_E}$$

$$F_{x_1x_2} = \frac{0.17}{0.11} = 1.55$$



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาว ชณัญญา กล่อมเดช  
 วันเดือนปีเกิด 20 เมษายน 2532  
 วุฒิกการศึกษา ปีการศึกษา 2553: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
 ตำแหน่ง วิศวกรออกแบบ  
 บริษัท สยาม เทค โพร จำกัด

## ผลงานทางวิชาการ

ชณัญญา กล่อมเดช, ชาญณรงค์ อัสวเทศานุภาพ. การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องโดยใช้การให้ความร้อนจากไมโครเวฟ. ใน: จักรกฤษณ์ เจริญย์, บรรณาธิการ. รายงานสืบเนื่องจากการประชุม. การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7 “ราชมงคลกับการวิจัยอย่างยั่งยืน”; 1-3 ก.ย. 2558; มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน. นครราชสีมา: [ม.ป.ท.]; 2558. น. 28-37.

ประสบการณ์ทำงาน 2559 - ปัจจุบัน: วิศวกรออกแบบ  
 บริษัท สยาม เทค โพร จำกัด  
 2554 - 2559: วิศวกรออกแบบ  
 บริษัทโอจีเอ็น (ไทยแลนด์)