

การหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติสำหรับการสังเคราะห์
ไบโอดีเซลโดยใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่
เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

STATISTICAL OPTIMIZATION FOR BIODIESEL SYNTHESIS
CATALYZED BY CALCIUM OXIDE DERIVED FROM
WASTE EGG SHELL



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2559

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STATISTICAL OPTIMIZATION FOR BIODIESEL SYNTHESIS
CATALYZED BY CALCIUM OXIDE DERIVED FROM
WASTE EGG SHELL



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN ENVIRONMENTAL RESOURCE CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่พิมพ์ขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนและเป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นโดย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารนี้ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
ACADEMIC YEAR 2016

หัวข้อโครงการพิเศษ

การหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติสำหรับการสังเคราะห์ไบโอดีเซล
โดยใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
STATISTICAL OPTIMIZATION FOR BIODIESEL SYNTHESIS
CATALYZED BY CALCIUM OXIDE DERIVED FROM WASTE
EGG SHELL

ชื่อนักศึกษา

นางสาว มณีไพลิน เวทศิลป์ รหัสนักศึกษา 56050741
นางสาว รุ่งฤดี สุขประสิทธิ์ รหัสนักศึกษา 56050748
นางสาว รุ่งอรุณ พิมพ์ทรัพย์ รหัสนักศึกษา 56050749

ปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา

เคมี

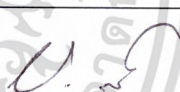


ปีการศึกษา

2559

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
สิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อ.ปัทมา ลีหาวงศ์ ประธานกรรมการ	
ดร.สามารถ คงทวีเลิศ กรรมการ	
ผศ.ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติสำหรับการสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา		
ชื่อนักศึกษา	นางสาว มณีไพลิน	เวชศิลป์	รหัสนักศึกษา 56050741
	นางสาว รุ่งฤดี	สุขประสิทธิ์	รหัสนักศึกษา 56050748
	นางสาว รุ่งอรุณ	พิมพ์ทรัพย์	รหัสนักศึกษา 56050749
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2559		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์และหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติสำหรับการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน โดยใช้แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ เวลาในการทำปฏิกิริยา (t) ร้อยละโดยน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ (C) และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน (M) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละเมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระที่ศึกษา โดยใช้วิธีการออกแบบทางสถิติด้วย Box-Behnken กับการวิเคราะห์พื้นที่ผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) พบว่าแบบจำลองแบบ full Quadratic มีความเหมาะสมในการอธิบายผลการทดลอง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard error; SE) เท่ากับ 3.275 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.94 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับเทียบ (adj R^2) เท่ากับ 0.84 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปร พบว่าตัวแปรอิสระ (M) จัดเป็นปัจจัยหลักในส่วนของ Linear term ที่มีผลต่อ %FAME และเทอมยกกำลังสองของ M และ C จัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อ %FAME อย่างมีนัยสำคัญ สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากเทคนิค Simultaneous Optimization Technique ของ RSM คือ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ร้อยละของแคลเซียมออกไซด์เท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 10:1

คำสำคัญ : ทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน, สภาวะที่เหมาะสม, แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่, ไบโอดีเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	STATISTICAL OPTIMIZAION FOR BIODIESEL SYNTHESIS CATALYZED BY CALCIUM OXIDE DERIVED FROM WASTE EGG SHELL
Students	Miss Maneepailin Wettasin Student ID 56050741 Miss Rungrudee Sukprasit Student ID 56050748 Miss Rungarun Pimsup Student ID 56050749
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Asst.Prof.Dr.Usarat Thawornchaisit

Abstract

The aim in this special project is to investigate factors affecting %FAME and to find an optimum condition for biodiesel production from palm oil by transesterification process using CaO that was derived from waste egg shell as catalyst. Effects of three independent variables including reaction time (t), % weight of Calcium Oxide (C) and molar ratio between methanol and oil (M) to %FAME were investigated. Analysis relationship between %FAME and independent variables was analyzed using a Box-Behnken design with Response Surface Methodology (RSM). Results showed that the full quadratic model was best described the experimental results with standard error (SE) of 3.275, coefficient of determination of $R^2 = 0.94$ and adjusted $R^2 = 0.84$. Analysis of variance on individual regression coefficients found that molar ratio of methanol to oil is only significant linear term, and the square terms of M and C are statistically significant factors affecting %FAME. The optimal conditions for biodiesel production when simultaneous optimization technique in RSM was applied were found to be reaction time of 60 min, % weight of CaO at 2% and molar ratio of methanol to oil of 10:1

Keywords : Transesterification, Optimum Condition, Calcium Oxide from waste Egg shell, Biodiesel

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องการหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติสำหรับการสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยใช้ แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำเร็จได้ เนื่องจากบุคคลหลายท่านได้กรุณาช่วยเหลือให้ข้อมูล ข้อเสนอแนะ คำปรึกษา แนะนำ ความคิดเห็นและกำลังใจ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ เป็นอย่างสูง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆด้วยความเอาใจใส่ในทุกขั้นตอน เพื่อให้การจัดทำโครงการพิเศษฉบับนี้สมบูรณ์ที่สุด

ขอขอบพระคุณดร.สามารถ คงทวีเลิศ และอาจารย์ปัทมา ลีฬหาวงศ์ เป็นอย่างสูงที่กรุณา เป็นกรรมการในการสอบโครงการพิเศษ และให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องที่เป็น ประโยชน์ต่อโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณผศ.ดร.อัชฌา อระวีพร อาจารย์ประจำสาขาวิชาสถิติเป็นอย่างสูงที่กรุณาให้ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สรายุทธ เวชสิทธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรมิเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เป็นอย่างสูงที่กรุณาทำการวิเคราะห์ข้อมูล และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่นักวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่เอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ในการจัดทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัวที่เป็นกำลังใจและขอบคุณเพื่อนๆที่เป็นกำลังใจ และคอยช่วยเหลือในการจัดทำโครงการพิเศษนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีของโครงการพิเศษฉบับ นี้ขออุทิศให้แต่คุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัว ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณต่อคณะวิจัยทุกท่าน

มณีไพลิน เวทศิลป์

รุ่งฤดี สุขประสิทธิ์

รุ่งอรุณ พิมพ์ทรัพย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่ออังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เปลือกไข่.....	3
2.1.1 องค์ประกอบของเปลือกไข่.....	3
2.1.2 การใช้ประโยชน์จากเปลือกไข่.....	3
2.2 แคลเซียมออกไซด์.....	4
2.3 ไบโอดีเซล.....	5
2.3.1 น้ำมันที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล.....	5
2.3.2 การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน.....	6
2.3.3 การผลิตไบโอดีเซลด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่.....	7
2.4 การออกแบบการทดลอง.....	7
2.4.1 Central Composite Design (CCD)	8
2.4.2 Box – Behnken Design.....	9
2.5 การวิเคราะห์พื้นที่ตอบสนอง (RSM).....	11
2.5.1 การวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Regression Analysis).....	12
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	15
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	15
3.1.1 อุปกรณ์.....	15
3.1.2 สารเคมี.....	16
3.2 การสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่.....	16
3.2.1 การเตรียมเปลือกไข่สำหรับการศึกษา.....	16
3.2.2 การเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃) ไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO).....	17
3.3 การสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน.....	17
3.3.1 น้ำมันพืชที่ใช้ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล.....	17
3.3.2 วิธีการสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	17
3.3.3 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอดีเซลด้วยการออกแบบการ ทดลอง.....	19
3.3.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	20
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	21
4.1 สมบัติของเปลือกไข่.....	21
4.1.1 ลักษณะเปลือกไข่.....	21
4.1.2 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃) ในเปลือกไข่.....	22
4.1.3 คุณสมบัติทางความร้อนของเปลือกไข่.....	22
4.1.4 องค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃) ในเปลือกไข่.....	23
4.2 สมบัติของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่.....	24
4.2.1 การเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนตไปเป็นแคลเซียมออกไซด์.....	24
4.2.2 องค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของ CaO ที่ได้จากเปลือกไข่.....	24
4.2.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว, ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่.....	25
4.3 ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล.....	26
4.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.1 ปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	26
4.4.2 ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองทางสถิติ.....	27
4.4.3 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_1) ของตัวแบบ.....	28
4.4.4 การวิเคราะห์นัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปร (Test on Individual Regression Coefficients).....	29
4.4.5 การวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสม.....	32
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	34
เอกสารอ้างอิง.....	36
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ.....	39
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบและวิเคราะห์.....	44
ภาคผนวก ค วิธีการทดลอง.....	60
ภาคผนวก ง การใช้โปรแกรม Mini Tab16 ในการวิเคราะห์.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่เป็ด.....	3
2-2 สูตรโครงสร้างและสมบัติของกรดไขมันหลักในน้ำมันปาล์ม.....	6
2-3 การเก็บข้อมูลของ Central Composite Design สำหรับ 3 Factors ที่ Alpha = 1.....	9
2-4 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร.....	10
3-1 สมบัติของเปลือกไข่ที่ศึกษา.....	16
3-2 สมบัติของเปลือกไข่ที่หลังการเผาที่ต้องการวิเคราะห์และเทคนิคที่ใช้.....	17
3-3 ตัวแปรและระดับค่าของตัวแปรในการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken.....	19
3-4 สภาวะที่ได้จากออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken.....	20
4-1 ผลจากการไทเทรตหาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃) ในเปลือกไข่.....	22
4-2 ผลจากการวิเคราะห์พื้นที่ผิว, ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่.....	26
4-3 ผลจากการคำนวณปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์.....	27
4-4 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ.....	28
4-5 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย.....	28
ก-3 การหาปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์ด้วยเทคนิค ¹ H-NMR.....	40
ก-4 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	41
ก-6 การหาปริมาณกรดไขมันอิสระ.....	42
ค-2 ปริมาณกรดไขมันอิสระ ปริมาตรเมทานอลและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2-1 การเข้าทำปฏิกิริยาของ Methoxide Anion ทำให้ได้เมทิลเอสเทอร์และไตรกลีเซอไรด์.....	7
2-2 Central Composite Design สำหรับ 3 Factors.....	8
2-3 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร.....	10
2-4 พื้นที่การตอบสนองแบบ 3 มิติและกราฟเส้นโครงร่าง.....	11
3-1 แสดงการตั้งชุดอุปกรณ์รีฟลักซ์.....	18
4-1 ลักษณะเปลือกไข่เป็ดที่นำมาใช้ศึกษา.....	21
4-2 คุณสมบัติทางความร้อนของเปลือกไข่.....	22
4-3 กราฟแสดงองค์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์และความเข้มสัญญาณของ CaCO ₃ Egg Shell และแคลเซียมคาร์บอเนต.....	23
4-4 เปรียบเทียบลักษณะของวัสดุ (ก) ก่อนเผาและ (ข) หลังเผาที่อุณหภูมิ 900°C.....	24
4-5 กราฟแสดงของโครงสร้างผลึกของแคลเซียมออกไซด์ CaO Egg Shell และกราฟมาตรฐานของแคลเซียมออกไซด์.....	25
4-6 Contour Plot แสดงอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่และเวลาการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME เมื่อกำหนดอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 9:1.....	30
4-7 Contour Plot แสดงอิทธิพลของเวลาการทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันต่อ %FAME เมื่อกำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	31
4-8 Contour Plot แสดงอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันต่อ %FAME เมื่อกำหนดเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 45 นาที.....	32
ข-1 การหาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (BET)...	44
ข-2 สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์ (%FAME) ในไบโอดีเซลด้วยเทคนิค ¹ H-NMR.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นเชื้อเพลิงที่สามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติคล้ายกับน้ำมันดีเซลมากและการนำมาใช้ไม่จำเป็นต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ อีกทั้งยังเป็นพลังงานทางเลือกที่ได้รับความสนใจในวงกว้าง เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้เองตามกระบวนการทางชีวภาพ และไม่มีมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้การใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่สามารถผลิตได้ในประเทศ ยังเป็นการลดปริมาณการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศได้ ถือเป็น การเสริมสร้างความมั่นคงและเสถียรภาพด้านพลังงานของประเทศอีกด้วย

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลทั่วไปจะใช้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) ระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอลในตัวเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานที่เป็นเนื้อเดียวกัน เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นต้น แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะทำให้เกิดปัญหาเรื่องการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานออกจากปฏิกิริยาสิ้นสุดลง การเปลี่ยนไปใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว ทั้งนี้ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบของแข็งที่นิยมใช้ คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) งานวิจัยของจันทรและคณะ (2551) ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์ของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล โดยใช้การทดลองแบบที่ละเอียด ซึ่งจะแปรผันตัวแปรอิสระที่ศึกษา และกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆที่ศึกษาคงที่ ผลจากการศึกษาพบว่าแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลได้ ข้อจำกัดของงานวิจัยดังกล่าวคือไม่สามารถทำนายสภาวะที่เหมาะสมตามเป้าหมายได้ ทั้งนี้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลสามารถทำนายได้ โดยใช้การออกแบบทางสถิติร่วมกับการวิเคราะห์พื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) (ธีรยุทธ์, 2551)

โครงการพิเศษนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติสำหรับการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับการวิเคราะห์ผลจากพื้นที่ผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติและการผลิตไบโอดีเซลที่สังเคราะห์โดยใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับการวิเคราะห์ผลจากพื้นที่ผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) นำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เปลือกไข่ที่ใช้ศึกษาเป็นเปลือกไข่เป็ดที่เหลือทิ้งจากร้านอาหารในคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ

2. สังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ อ้างอิงสภาวะจากงานวิจัยของจันทร์และคณะ (2551)

3. ศึกษาสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ ได้แก่ พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (BET) และศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction; XRD)

4. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Tranesterification) โดยใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดของน้ำมันที่ใช้ คือ น้ำมันปาล์มโมเลอิน ตรา มรกต และวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันตามวิธีมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40

5. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลและหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ Box- Behnken Design ร่วมกับการวิเคราะห์ผลจากพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่

- ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็น 2, 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์
- เวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 30, 45 และ 60 นาที
- อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1, 9:1 และ 12:1

และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ ($^1\text{H-Nuclear Magnetic Resonance}$; $^1\text{H-NMR}$)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2. ทราบถึงสภาวะของตัวแปรที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เปลือกไข่

2.1.1 องค์ประกอบของเปลือกไข่

เปลือกไข่มีรูพรุนเล็กๆ อยู่มากกว่า 17,000 รู เพื่อระบายความชื้นและรับอากาศเข้าสู่สารเคลือบผิว ป้องกันไม่ให้แบคทีเรียเข้าไปในฟองไข่ เปลือกไข่ประกอบด้วยชั้น 2 ชั้น คือ ชั้นเปลือกไข่ (Egg Membrane) ซึ่งเป็นชั้นของสารอินทรีย์อันประกอบไปด้วยเส้นใยโปรตีน และชั้นสารอนินทรีย์ (Tsai et al., 2008 and Yoo et al., 2009) ในเปลือกไข่เป็ดจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2-1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบเกือบทั้งหมดของเปลือกไข่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่เป็ด

แร่ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
CaCO_3	96.5
S	1.2
Mg	0.1
P	0.5
K	0.0839

ที่มา : วิชัย (2555)

2.1.2 การใช้ประโยชน์จากเปลือกไข่

เปลือกไข่ถือว่าเป็นขยะเหลือทิ้งจากการบริโภคที่มีปริมาณมากและมีอยู่อย่างแพร่หลาย แต่ด้วยองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่นั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น การนำไปกำจัดแมลงได้ นำไปไล่มด นำไปใช้ซักผ้าเพื่อให้ผ้าขาว เป็นเครื่องมือทำความสะอาด เป็นปุ๋ยให้ต้นไม้ และด้วยองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นทำให้สามารถนำไปสังเคราะห์เป็นแคลเซียมออกไซด์ได้ด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูงและนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆได้มากขึ้น รวมไปถึงในเชิงอุตสาหกรรม เป็นการเพิ่มคุณค่าของขยะเหลือทิ้งและลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide; CaO)

แคลเซียมออกไซด์ หรือที่รู้จักกันทั่วไป คือ ปูนขาวนั้น มีลักษณะเป็นก้อนหรือผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ มีสมบัติเฉพาะ ไม่เป็นพิษ และมีความเสถียรทางเคมี จึงนิยมนำไปใช้เป็นวัตถุดิบพื้นฐานที่สำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆ มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 2,572 °C ซึ่งสูงมาก แคลเซียมออกไซด์นี้สามารถเตรียมได้จากการให้ความร้อนแก่หินปูน หินปะการัง เปลือกของสัตว์ทะเล หรือแม้แต่ปูนขาวในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ที่สลายคาร์บอนไดออกไซด์ออกไป ปฏิกริยานี้สามารถผันกลับได้ หมายถึง แคลเซียมออกไซด์สามารถเกิดปฏิกริยากับคาร์บอนไดออกไซด์กลับไปเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตได้ ดังสมการที่ 2.1



แคลเซียมออกไซด์มีการนำไปใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เช่น

- 1) การนำไปทำปูนดิบ โดยการทำให้ปฏิกริยากับคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้เกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต และเมื่อปูนขาวผสมกับน้ำและทรายก็จะได้ปูนดิบ
- 2) การนำไปทำแก้ว ด้วยการนำปูนขาวไปทำสารละลายร่วมกับซิลิกา เมื่อปูนขาวถูกให้ความร้อนพร้อมทรายซิลิกา (SiO₂) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) จะเกิดเป็นสารละลายที่ไม่รวมกันผลึกแต่จะกลายเป็นของแข็งเมื่อเย็นตัวลง ไม่มีรูปร่างที่แน่นอน ใสเกือบไม่มีสี สามารถเป่าเป็นรูปร่างต่างๆ ได้
- 3) การนำปูนขาวมาใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กกล้า ด้วยการนำไปใส่สารละลายเพื่อรวมกับซิลิกา เมื่อผสมปูนขาวลงไปกับสินแร่ขณะหลอม ซิลิกาจะรวมตัวกับปูนขาวเกิดเป็นสารละลายที่เรียกว่า กากแร่ที่ไม่สามารถผสมรวมกับเหล็กที่หลอมอยู่ได้ ซิลิกัดจะถูกกำจัดออกจากเหล็กโดยการทิ้งกากแร่
- 4) การนำมาใช้ผลิตแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC₂) ด้วยการให้ความร้อนปูนขาวจากถ่านหิน เพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตอะซิโตนซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่สำคัญสำหรับยานพาหนะและเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในการสร้างสารอินทรีย์รวมถึงไวนิลคลอไรด์ นิโอพรีน และอะซิโรรีโไตรดซึ่งเป็นวัตถุดิบของพอลิเมอร์
- 5) การนำมาใช้ในการลดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาจากปล่องของโรงไฟฟ้า ซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำปฏิกริยากับปูนขาวได้แคลเซียมซัลเฟต
- 6) การนำมาใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย
- 7) การนำมาใช้บำบัดน้ำเสียขั้นต้นของโรงผลิตน้ำ เพื่อลดความเป็นกรด เพื่อให้ทำให้น้ำสะอาดพอที่จะสามารถดื่มได้

นอกเหนือจากนี้แล้วแคลเซียมออกไซด์ยังเป็นสารตั้งต้นที่นิยมนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกริยาแบบวิวิธพันธ์ ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลได้อีกด้วย เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์มีความเป็นเบสแรง (Basic Base) จึงให้ผลผลิตไบโอดีเซลค่อนข้างสูง อีกทั้งยังละลายในแอลกอฮอล์ได้น้อย ทำให้แยกออกจากปฏิกริยาได้ง่ายและยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง แต่ประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซลอาจลดน้อยลงเมื่อนำแคลเซียมออกไซด์กลับมาใช้มากกว่า 11 ครั้ง เนื่องจากสารที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต (Intermediate) เช่น ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ไปอุดตัน รวมถึงน้ำหรือออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกริยาที่ผิวของแคลเซียมออกไซด์ทำให้ความไวในการทำปฏิกริยาลดลง อย่างไรก็ตามแคลเซียมออกไซด์ที่มีความ

ไวลดลงนี้สามารถนำไป กระตุ้นด้วยความร้อนเพื่อนำกลับมาใช้ได้ใหม่ในกระบวนการได้อีก (อัจฉราและอภิพงษ์, 2557)

2.3 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (Biodiesel) คือเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากน้ำมันพืช ไขมันสัตว์หรือน้ำมันที่ผ่านการปรุงอาหารแล้วมาสกัดเอาเยื่อเหนียวและสิ่งสกปรกออก (Degumming) แล้วนำไปผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ใกล้เคียงน้ำมันดีเซล นิยมใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ซึ่งเป็นการเติมแอลกอฮอล์อย่างเมทานอลหรือเอทานอลกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดหรือเบส ที่อุณหภูมิสูงเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันจากไตรกลีเซอไรด์เป็นเมทิลเอสเทอร์และอาจได้กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ แอลกอฮอล์ที่ใช้มักมีจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง 1-8 อะตอม โดยเมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูก สายโซ่คาร์บอนสั้น มีความมีขี้สูง ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว (ธีรยุทธ์, 2551)

2.3.1 น้ำมันที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

โดยทั่วไปไบโอดีเซลผลิตจากน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ซึ่งเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) มีความหนืดสูง มีโครงสร้างเป็น C_3H_5 ซึ่งเชื่อมต่อกับกรดไขมันที่มีองค์ประกอบแตกต่างกันและมีไขมันอยู่ในโครงสร้างถึงร้อยละ 94-96 ของน้ำหนักโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ทำให้น้ำมันพืชแต่ละชนิดมีสมบัติที่ต่างกันอย่างชัดเจนตามกรดไขมันหลักที่เป็นองค์ประกอบ ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลนิยมใช้น้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบ เนื่องจากน้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันที่สกัดได้มากเมื่อเทียบกับพืชชนิดอื่น ทั้งยังเป็นพืชอนุรักษ์สภาพแวดล้อมและเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ น้ำมันปาล์มประกอบไปด้วยกรดไขมันหลายชนิดด้วยกัน ดังแสดงในตารางที่ 2-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2-2 แสดงสูตรโครงสร้างและสมบัติของกรดไขมันหลักในน้ำมันปาล์ม

ชนิดของกรดไขมัน	ชื่อทางเคมีของกรดไขมัน	โครงสร้าง (x:y)	สูตรโมเลกุล
Capric	Decanoic	10:0	C ₁₀ H ₂₀ O ₂
Lauric	Dodecanoic	12:0	C ₁₂ H ₂₄ O ₂
Myristic	Tetradecanoic	14:0	C ₁₄ H ₂₈ O ₂
Palmitic	Hexadecanoic	16:0	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
Stearic	Octadecanoic	18:0	C ₁₈ H ₃₆ O ₂
Arachidic	Eicosanoic	20:0	C ₂₀ H ₄₀ O ₂
Behenic	Docasanoic	22:0	C ₂₂ H ₄₄ O ₂
Lignoceric	Tetracosanoic	24:0	C ₂₄ H ₄₈ O ₂
Oleic	cis-9-Octadecanoic	18:1	C ₁₈ H ₃₄ O ₂
Linoleic	cis-9,cis-12-Octadecanoic	18:2	C ₁₈ H ₃₂ O ₂
Linolanic	cis-9,cis-12,cis15-Octadecanoic	18:3	C ₁₈ H ₃₀ O ₂
Erucle	cis-13-Docosenoic	22:1	C ₂₂ O ₄₂ O ₂

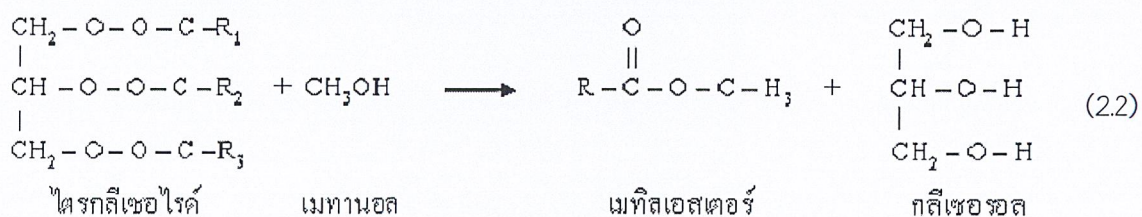
หมายเหตุ x: จำนวนอะตอมของคาร์บอนของกรดไขมัน

y: จำนวนพันธะคู่ในกรดไขมัน

ที่มา: รุ่งทิพย์ (2557)

2.3.2 การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification)

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Alcoholysis เป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืช ไขมันสัตว์หรือน้ำมันพืชที่ใช้แล้วกับแอลกอฮอล์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดหรือเบสเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันจากไตรกลีเซอไรด์เป็นโมโนอัลคิลเอสเทอร์ (Mono Alkyl Ester) และกลีเซอริน (Glycerine) ดังสมการที่ 2.2



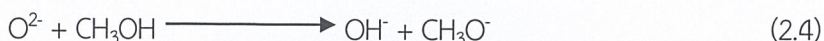
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

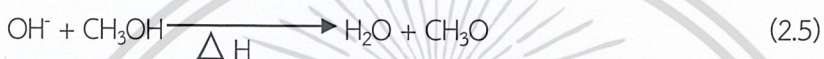
2.3.3 การผลิตไบโอดีเซลด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

กลไกการเร่งปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันอาจแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน (Boro et al., 2012)

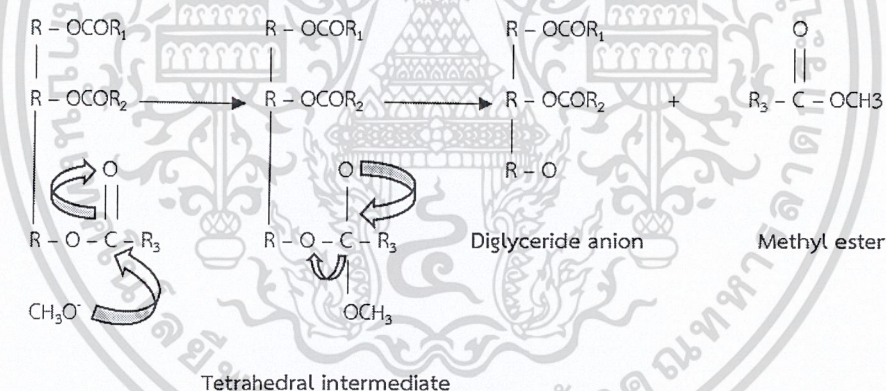
ขั้นที่ 1 เมื่อเติม CaO ลงไปจะทำให้เกิดการแตกตัวของ CaO และ CH₃OH ดังสมการ



ขั้นที่ 2 CH₃OH และไฮดรอกไซด์ไอออน ทำปฏิกิริยาเกิดเป็น Methoxide Anion



ขั้นที่ 3 Methoxide Anion ที่เกิดจากขั้นที่ 2 จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl) ของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้เกิดสารตัวกลาง (Intermediate) ซึ่งสารตัวกลางนี้จะมีการเปลี่ยนรูปเป็นเมทิลเอสเทอร์และ ไดกลีเซอไรด์ (Methyl Ester and Diglyceride) ดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 แสดงการเข้าทำปฏิกิริยาของ Methoxide Anion ได้เมทิลเอสเทอร์และไดกลีเซอไรด์
ที่มา: Boro et al (2012)

ขั้นที่ 4 Methoxide Anion จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl) ของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้เกิดเป็นเมทิลเอสเทอร์และโมโนกลีเซอไรด์ และหลังจาก Methoxide Anion เข้าทำปฏิกิริยาหมดทำให้เกิด ปฏิกิริยาที่ 2.3 เปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์อีกครั้ง

2.4 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นการกำหนดวิธีการดำเนินการทดลอง ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานหลักสามขั้นตอน ได้แก่ การวางแผน เป็นการกำหนดตัวแปรที่จะทำการศึกษาหรือที่เรียกว่าปัจจัย (Factor) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

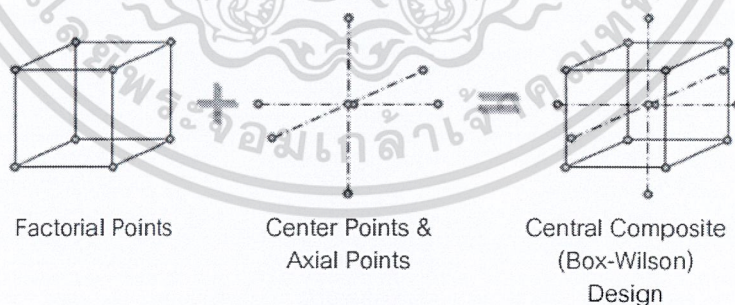
และระดับของปัจจัยที่จะทำการศึกษา (Level) การออกแบบ เป็นการกำหนดจำนวนข้อมูลที่ต้องการจากการทดลองในแต่ละระดับขึ้น กำหนดรูปแบบการทดลองในรูปแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการทดลองและวิเคราะห์ผล เป็นขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล คำนวณค่าทางสถิติสำหรับการทดสอบที่เหมาะสม โดยทำการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการผลิตไบโอดีเซล

2.4.1 Central Composite Design (CCD)

Central Composite Design (หรือ box – wilson design) เป็นการทดลองที่ 3 ระดับ นิยมแทนด้วยสัญลักษณ์ $(-1, 0, +1)$ กล่าวคือจะปรับตัวแปรที่ต้องการศึกษาไปตัวแปรละ 3 ค่า แต่แทนที่จะปรับตัวแปรแบบ Full Combination หรือ Full Factorial กลับเลือกบาง Runs หรือบาง สภาวะการทดลองที่จำเป็น เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการ สร้างแบบจำลองทางสถิติ โดย Model ที่ได้จะยังคงมีทั้ง Main Effect, Interaction และ Quadratic Terms โดยใช้ทรัพยากรไม่มากจนเกินไป

ตัวอย่างของ Central Composite Design สำหรับการศึกษาดัวแปร 3 ตัว ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 2-2 และตารางที่ 2-3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ

1. Factorial Points ซึ่งในที่นี้เป็นการนำ 2-Level Full Factorial มา เป็นส่วนหนึ่งของการทดลองนั่นเอง
2. Axial Points เป็นการ ปรับค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งในขณะที่ Fix ให้ค่าตัวแปรอื่น อยู่ที่ค่ากลาง หรือค่า (0)
3. Center Points เป็นการ ปรับค่าของตัวแปรทุกตัวแปรที่ค่ากลาง หรือค่า (0) สำหรับ ตัวอย่างในตารางที่ 2-3 เลือกค่า Alpha = 1 หรือ ระยะจาก Axial Point ไปยัง Center Point เป็น 1 ซึ่งค่าดังกล่าวมักจะเหมาะสมในทางปฏิบัติ ที่ alpha = 1 แบบนี้ว่า (face centered design)



รูปที่ 2-2 แสดงรูป Central Composite Design สำหรับ 3 Factors

ที่มา: จรัส (2552)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2-3 แสดงการเก็บข้อมูลของ Central Composite Design สำหรับ 3 Factors ที่ค่า Alpha = 1

A	B	C	Point Types
-1	-1	-1	Factorial Point
1	-1	-1	Factorial Point
-1	1	-1	Factorial Point
1	1	-1	Factorial Point
-1	-1	1	Factorial Point
1	-1	1	Factorial Point
-1	1	1	Factorial Point
1	1	1	Factorial Point
-1	0	0	Axial Point
1	0	0	Axial Point
0	-1	0	Axial Point
0	1	0	Axial Point
0	0	-1	Axial Point
0	0	1	Axial Point
0	0	0	Center Point
0	0	0	Center Point

ที่มา: จรัส (2552)

2.4.2 Box-Behnken Design

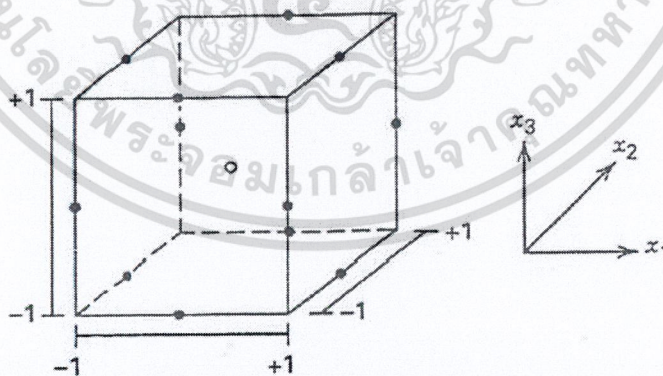
เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพิตพื้นที่การตอบสนอง การออกแบบแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการทดลองที่ต้องการมีจำนวนน้อย แสดงดังตารางที่ 2-4 รูปทรงเรขาคณิตของการออกแบบแสดงดังรูปที่ 2-3 พบว่า การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลม ที่จุดวางอยู่บนวงกลมรัศมี 2 นอกจากนี้การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ นั่นเป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือการรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2-4 แสดงการออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร

RUN	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

ที่มา: จีรยุทธ (2551)



รูปที่ 2-3 แสดงการออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร

ที่มา: จีรยุทธ (2551)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การวิเคราะห์พื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM)

พื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยให้ผลที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุด ยกตัวอย่างเช่น สมมติต้องการหาระดับของอุณหภูมิ (x_1) และความดัน (x_2) ที่จะทำให้ผลผลิตจากกระบวนการมีค่ามากที่สุด ผลของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิกับความดัน กล่าวคือ

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

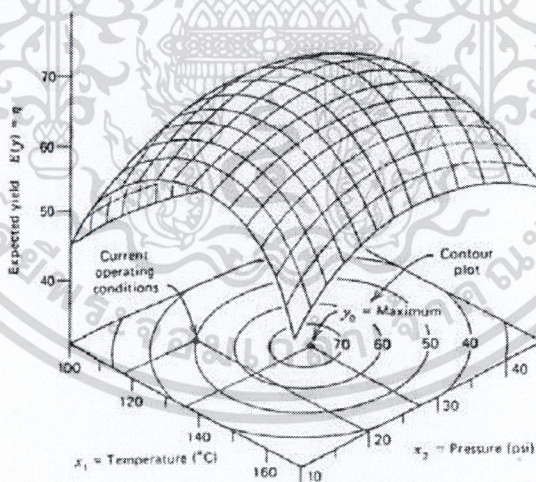
โดยที่ ϵ คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า

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

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

ซึ่งเรียกว่า “พื้นที่การตอบสนอง (Response Surface)”

การแสดงพื้นที่ที่ตอบสนองในรูปแบบของกราฟจะแสดงตัวอย่างดังรูปด้านล่าง โดย η จะพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 ซึ่งจะพล็อตในรูปแบบ Contour Plot



รูปที่ 2-4 พื้นที่การตอบสนองแบบ 3 มิติและกราฟเส้นโครงร่าง

ที่มา: อีรยุทธ (2551)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 การวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Regression Analysis)

เป็นวิธีการหนึ่งที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ประเภทคือ ตัวแปรตาม (Dependent Variable: นิยมใช้สัญลักษณ์ Y) และตัวแปรอิสระ (Independent Variable: นิยมใช้สัญลักษณ์ X) โดยมุ่งเน้นที่จะพยากรณ์ตัวแปรตามด้วยค่าความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ ซึ่งเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) การหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยจะทำได้หลังจากที่ได้สร้างหรือกำหนดรูปแบบของความสัมพันธ์ (Model) (ธีรยุทธ์, 2551) ซึ่งในการออกแบบแบบ Response Surface Methodology นั้นมีรูปแบบของแบบจำลองอยู่ 4 แบบจำลองคือ Linear model, Linear + Interaction model, Linear + Square model และ Full Quadratic model ดังสมการ

1. Linear model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i \quad (2.6)$$

2. Linear + interaction model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{ij} X_{ij} \quad (2.7)$$

3. Linear + square model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 \quad (2.8)$$

4. Full quadratic model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{ij} X_{ij} \quad (2.9)$$

ในการตัดสินใจความเหมาะสมของแบบจำลองที่จะสามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุดต้องพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแต่ละแบบจำลองเปรียบเทียบกัน

ค่า R^2 เป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจใช้ประกอบพิจารณาเมื่อข้อมูลมีจำนวนน้อยกว่า 30 ตัวอย่าง (ทัศนีย์, 2550) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10

$$R^2 = 1 - \frac{n-1}{n-k-1} \times (1 - R^2) \quad (2.10)$$

โดยที่ n = จำนวนการทดลอง

k = จำนวนสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เกศระวีและคณะ (2554)

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาการนำไขมันโคเจียวมาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้และหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิต โดยใช้รูปแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคนโดยวิเคราะห์ร่วมกับพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology) ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ระยะเวลา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล จากการวิเคราะห์หาค่าของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์โดยพิจารณาจาก Surface Plot และ Contour Plot ร่วมกับการวิเคราะห์หาค่าสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปรอิสระในแบบจำลอง พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์มากที่สุด นอกจากนี้ตัวแปรในเทอมยกกำลังสองได้แก่ เวลาในการทำปฏิกิริยา \times เวลาในการทำปฏิกิริยา และตัวแปรร่วมระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งใช้วิเคราะห์ผลจากพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology) ได้สภาวะที่เหมาะสมและค่าที่ได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน

จันทระและคณะ (2551)

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็งคือแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมได้จากเปลือกไข่ โดยทำการศึกษาค่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ได้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ 5 ชั่วโมง และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ 4 เปอร์เซ็นต์ และทำการศึกษเปรียบเทียบการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เกรดวิเคราะห์กับแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยพบว่า การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เกรดวิเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์มากกว่าการใช้แคลเซียมออกไซด์เกรดวิเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 100.00 และ 77.37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ธีรยุทธ์ (2551)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน ซึ่งในขั้นตอนแรกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดคือไอออนซัลเฟตเพนทาไฮเดรตเพื่อกำจัดกรดไขมันอิสระ เมื่อกรดไขมันอิสระมีค่าน้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ จึงทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสในขั้นตอนที่สองซึ่งก็คือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเข้าสู่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคชันที่สมบูรณ์แล้วจึงใช้วิธีการทางสถิติในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดโดยวิเคราะห์ผลจากพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology

Guo et al. (2011)

ไบโอดีเซลมักจะผลิตโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี โดยเฉพาะตัวที่มีความเป็นกรดและเบสแรง เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเนื้อเดียวกันสามารถเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นเมทิลเอสเทอร์ที่มีเปอร์เซ็นต์มากด้วยเวลาที่สั้นและราคาต่ำ อย่างไรก็ตามการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ออกจากผลิตภัณฑ์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่นั้นค่อนข้างยาก หลังจากเกิดปฏิกิริยา ตัวเร่งจะถูกล้างออกจากผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำร้อนซึ่งจะทำให้เกิดน้ำเสียตามมา น้ำมันพืชอย่างน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันเมล็ดเรพและน้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันที่ใช้บริโภคเป็นหลัก แต่ไม่ค่อยเหมาะสมนักหากจะนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับประเทศกำลังพัฒนาเนื่องจากปริมาณวัตถุดิบที่จำกัดและราคาที่สูง ดังนั้นน้ำมันอย่างน้ำมันสนูปดำ ไขมันสัตว์ และน้ำมันเหลือใช้จะถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ น้ำมันดังกล่าวนั้นมีน้ำและกรดไขมันอิสระเป็นส่วนประกอบซึ่งเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสอาจทำให้เกิดสบู่ได้ ในทางกลับกันตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดนั้นใช้เวลาทำปฏิกิริยานาน เราจึงหันมาสนใจตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งซึ่งสามารถแก้ปัญหาเหล่านั้นได้เนื่องจากไม่เป็นสนิม ไม่เป็นพิษ และแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ด้วยความสามารถของตัวเร่งที่เป็นของแข็งทำให้กระบวนการดำเนินได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งยังสามารถลดขั้นตอนการแยกกลีเซอรอลและลดค่าใช้จ่ายในการทำให้ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์อีกด้วย จากการศึกษาพบว่าผลผลิตไบโอดีเซลที่ดีที่สุดคือร้อยละ 99.7

Viriya-empikul et al. (2011)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันนั้นได้มาจากเปลือกไข่ เปลือกหอยเขอรี่ เปลือกหอยตลับ โดนทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทำการเผาในสภาวะที่เหมาะสม ณ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-4 ชั่วโมง วัตถุดิบเหล่านั้นจะเปลี่ยนจากแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในรูปแบบที่เข้มข้น จากการศึกษาพบว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่และเปลือกหอยที่เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสจะสามารถให้ผลผลิตไบโอดีเซลถึง 90 เปอร์เซ็นต์ภายในเวลา 2 ชั่วโมงซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เป็นอย่างดีและเป็นตัวเร่งราคาถูกที่สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในกระบวนการการผลิตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzers) รุ่น Autosorb-1 serie บริษัท Quantachromeinstrument
2. เครื่องทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนท์ (^1H -Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy; ^1H -NMR) รุ่น Advance Ultra shield 400
3. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffract meter; XRD) BRÜKER รุ่น D8 Advance
4. เครื่องวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักโดยใช้ความร้อน (Thomo Gravimetric Analyzer; TGA) Nabertherm
5. เครื่องปั่นกวนสารละลาย (Stirrer) รุ่น C-MAG HS 7 บริษัท ไทย เพียว ซายซ์จำกัด พร้อมแท่งแม่เหล็ก
6. เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum filtration unit) รุ่น Aspirator A บริษัท TOKYO RIKAKIKAI CO., LTD
7. เตาเผา (Muffle Furnace) รุ่น Controller P 320
8. เครื่องกลั่นระเหยสาร (Rotary Vacuum Evaporator) รุ่น EYELA N-N Series
9. ตู้อบ (Oven) บริษัท Fisher Scientific
10. เครื่องชั่งน้ำหนัก (Balance) รุ่น ML204/01 บริษัท Mettler Toledo
11. โถดูดความชื้น (desiccator)
12. ตะแกรงร้อนมาตรฐาน ขนาด 20 mesh
13. ขวดกั้นกลมสามคอ
14. กรวยแยก
15. เทอร์โมมิเตอร์
16. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
17. บริภัณฑ์แก้วและพลาสติกสำหรับห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 สารเคมี

1. น้ำมันปาล์มโอเลอินทรามรกต
2. แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ได้จากเปลือกไข่
3. เมทานอล (99.99% Methanol; CH₃OH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Scientific
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide; NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
5. ไฮโดรคลอริก (HCl) เกรดวิเคราะห์บริษัท CARLO ERBA
6. ฟีนอล์ฟทาเลอิน (Phenolphthalein) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA

3.2 การสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ (CaO)จากเปลือกไข่

3.2.1 การเตรียมเปลือกไข่สำหรับการศึกษา

1. นำเปลือกไข่เปิดมาล้างน้ำให้สะอาด และลอกเอาเยื่อเมือกด้านในออกให้หมดทิ้งไว้ให้แห้งแล้ว บดด้วยครกหินให้ละเอียด จากนั้นนำมาอบให้แห้งในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำมาบดด้วยตะแกรงขนาด 20 mesh
2. นำเปลือกไข่ที่ผ่านการบดแล้วไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 สมบัติของเปลือกไข่ที่ศึกษา

สมบัติทางกายภาพ-เคมี	วิธีวิเคราะห์
ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃)	เทคนิคการไทเทรตแบบย้อนกลับ (Back Titration) อ้างอิงวิธีการของจันทระและคณะ (2551) รายงานวิธีการดังแสดงใน ภาคผนวก ค-1
ช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃) ไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO)	เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermo Gravimetric Analysis; TGA)
องค์ประกอบ และโครงสร้างผลึก	เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction; XRD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในเปลือกไข่เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO)

นำเปลือกไข่ที่ผ่านการบดแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง อ้างอิงสถานะตามงานวิจัยของจันทร์และคณะ (2551) เปลือกไข่ที่ผ่านการเผาแล้วนำมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเก็บรักษาสภาพในโถดูดความชื้น (desiccator) ก่อนนำไปวิเคราะห์สมบัติ ดังแสดงในตารางที่ 3-2 และนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลต่อไป

ตารางที่ 3-2 สมบัติของเปลือกไข่ที่หลังการเผาที่ต้องการวิเคราะห์และเทคนิคที่ใช้

สมบัติ	วิธีวิเคราะห์
องค์ประกอบ และโครงสร้างผลึก	เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction ; XRD)
พื้นที่ผิว , ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน	เทคนิคการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (BET) วิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข-1

3.3 การสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification)

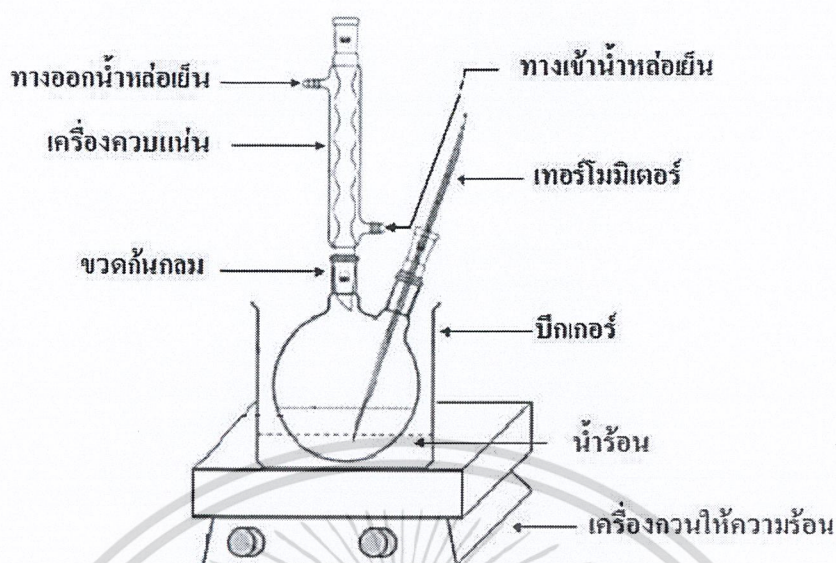
3.3.1 น้ำมันพืชที่ใช้ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล

นำไปวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันก่อนการนำไปสังเคราะห์ไบโอดีเซล อ้างอิงวิธีตามมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40 (รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ค-2) น้ำมันพืชที่ใช้ศึกษา (น้ำมันปาล์มโอเลอิน ตรา มรกต)

3.3.2 วิธีการสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ชั่งน้ำมัน 100 กรัม ใส่ขวดก้นกลมสามคอ
2. ติดตั้งอุปกรณ์ชุดรีฟลักซ์โดยต่อขวดก้นกลมสามคอที่มีน้ำมันอยู่เข้ากับคอนเดนเซอร์ตั้งรูปที่

3-1



รูปที่ 3-1 แสดงการตั้งชุดอุปกรณ์รีฟลักซ์

3. นำไปอุ่นที่อุณหภูมิ 60 ± 1 °C ประมาณ 10 นาที
4. เตรียมเมทานอลตามอัตราส่วนโดยโมลที่กำหนดไว้ (ดูรายละเอียดวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก-1)
5. ชั่งแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไซตามที่กำหนดไว้ และนำไปผสมกับเมทานอลที่เตรียมไว้
6. เติสารที่เตรียมได้ในข้อ 5. ลงไปในขวดก้นกลมที่อุ่นน้ำมันไว้ในข้อ 3. ทำการกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที และเริ่มจับเวลา
7. ทำการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 60 ± 1 °C จนครบเวลาที่กำหนด
8. เมื่อทำปฏิกิริยาจนครบกำหนดเวลาที่ตั้งไว้
9. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปกรองเอาตัวเร่งออก ด้วยเครื่องแบบลดความดัน จากนั้นเทผลิตภัณฑ์ลงในกรวยแยก ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน
10. ไซแยกชั้นกลีเซอรอลที่อยู่ชั้นล่างออก ให้เหลือแต่ด้านบนซึ่งเป็นเมทิล-เอสเทอร์หรือไบโอดีเซล
11. นำไบโอดีเซลที่ได้ไประเหยเมทานอลออกให้หมดด้วยเครื่องกลั่นระเหยสาร (Evaporator) จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปคำนวณเปอร์เซ็นต์ผลผลิต
12. นำไบโอดีเซลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ ($^1\text{H-Nuclear Magnetic Resonance}$; $^1\text{H-NMR}$) รายละเอียดวิธีการคำนวณใน

เอกสารภาคผนวก ก-2 และ ก-3 สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอดีเซลด้วยการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ร่วมกับการวิเคราะห์พื้นที่ผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) อ้างอิงตามธีรยุทธ์ (2551) ถูกใช้เป็นรูปแบบการทดลองเพื่อศึกษาลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โดยมีตัวแปรที่เลือกศึกษาจำนวน 3 ตัวแปร ได้แก่ เวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามี 3 ระดับคือ 30, 45 และ 60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามี 3 ระดับคือ 2.0, 3.0 และ 4.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันมี 3 ระดับคือ 6:1, 9:1 และ 12:1 ดังแสดงในตารางที่ 3-3 รูปแบบการออกแบบ Box-Behnken ใช้โปรแกรม MINITAB Release 16 ในการออกแบบซึ่งจะได้การทดลองทั้งหมด 15 ดังแสดงในตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรและระดับค่าของตัวแปรในการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

ตัวแปร	สัญลักษณ์	-1	0	1
เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (นาที)	t	30	45	60
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	C	2.0	3.0	4.0
อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน	M	6:1	9:1	12:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3-4 สภาวะที่ได้จากออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

การทดลองที่	ระดับ			ปัจจัย		
	X_1^t	X_2^t	X_3^t	C (%w/w)	M (molar ratio)	t (min)
1	0	0	0	3	9	45
2	-1	-1	0	2	6	45
3	0	-1	-1	3	6	30
4	0	1	-1	3	12	30
5	0	0	0	3	9	45
6	-1	1	0	2	12	45
7	0	1	1	3	12	60
8	0	0	0	3	9	45
9	1	1	0	4	12	45
10	1	-1	0	4	6	45
11	1	0	1	4	9	60
12	-1	0	1	2	9	60
13	0	-1	1	3	6	60
14	1	0	-1	4	9	30
15	-1	0	-1	2	9	30

3.3.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ความสำคัญของปัจจัยที่ศึกษาต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้แต่ละการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์
พื้นที่ผิวการตอบสนอง (Response Surface Method; RSM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

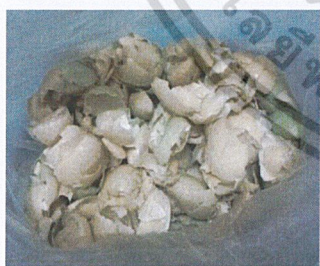
ผลการทดลองและอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ทำการทดลองเพื่อศึกษาลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พื้นที่ผิวการตอบสนอง พร้อมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้หลักการการออกแบบการทดลองร่วมกับการวิเคราะห์ผลทางสถิติ (Response Surface Methodology, RSM) ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ เวลาในการทำปฏิกิริยา (t) ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา (C) และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมัน (M) วิเคราะห์หาปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์ ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ รายละเอียดผลการทดลองเป็นดังนี้

4.1 สมบัติของเปลือกไข่

4.1.1 ลักษณะเปลือกไข่

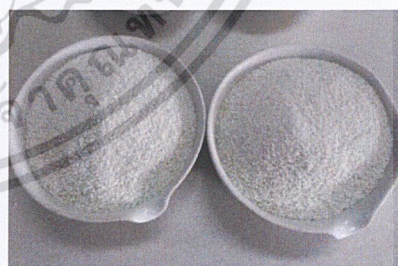
เปลือกไข่เปิดที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้มาจากการเก็บเปลือกไข่ที่ใช้แล้วจากร้านอาหารในโรงอาหารคณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ (รูปที่ 4-1 ก) เมื่อนำมาล้างลอกเยื่อเมือกด้านในออกแสดงดังรูปที่ 4-1 (ข) และนำไปบดด้วยครกหินให้ละเอียด จากนั้นนำไปอบให้แห้งในเตาอบ ที่อุณหภูมิ $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที และนำมาร่อนด้วยตะแกรงขนาด 20 mesh จะมีลักษณะเป็นผงสีขาวขุ่นอมเหลือง มีกลิ่นคาว ลักษณะคล้ายแป้งดังแสดงในรูปที่ 4-1 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4-1 ลักษณะเปลือกไข่เปิดที่นำมาใช้ศึกษา (ก) เปลือกไข่เปิด (ข) เปลือกไข่ที่ล้าง, ลอกเยื่อเมือก, บด และอบแห้ง และ (ค) เปลือกไข่ที่ผ่านการบดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 20 mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในเปลือกไข่

จากการวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในเปลือกไข่ด้วยวิธีการไทเทรตแบบย้อนกลับ (Back Titration) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-1

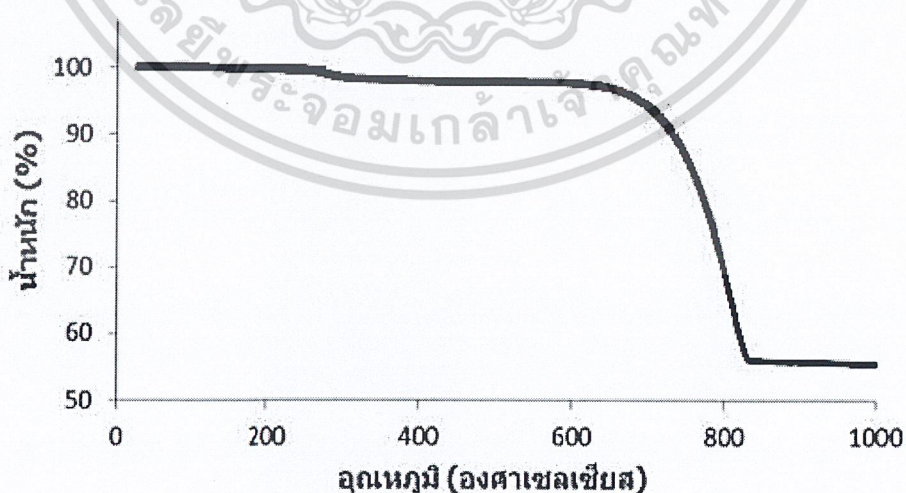
ตารางที่ 4-1 ผลจากการไทเทรตหาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในเปลือกไข่

ตัวอย่างที่	น้ำหนักเปลือกไข่ (กรัม)	ปริมาณกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ (มิลลิลิตร)
1	0.5022	10	4.45
2	0.5059	10	4.50
3	0.5017	10	4.45
เฉลี่ย			4.47

จากผลในตารางที่ 4-1 นำไปคำนวณหาปริมาณร้อยละของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) แสดงวิธีทำในภาคผนวก ค-1 ได้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในเปลือกไข่เท่ากับ 92.30 เปอร์เซ็นต์

4.1.3 คุณสมบัติทางความร้อนของเปลือกไข่

เมื่อนำเปลือกไข่ที่ผ่านการร่อนแล้วไปตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermo Gravimetric Analysis; TGA) จะได้เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของความร้อนของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 4-2



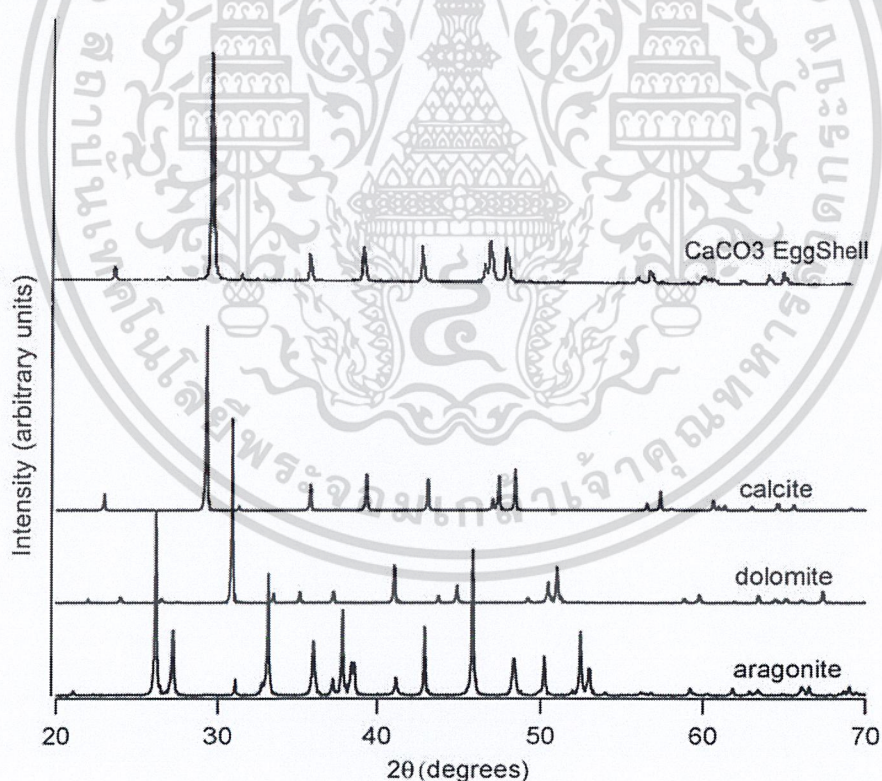
รูปที่ 4-2 คุณสมบัติทางความร้อนของเปลือกไข่แสดง TG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาคุณสมบัติการสลายตัวของความชื้นด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (TGA) พบว่าเปลือกไข่มีคุณสมบัติทนความร้อนได้ดี คือเมื่อให้ความร้อนแก่เปลือกไข่ระหว่าง 50-600 องศาเซลเซียส พบว่าไม่เกิดการสลายตัวของเปลือกไข่ ขณะที่เมื่อให้ความร้อนแก่เปลือกไข่จนถึง 680 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็ว และพบว่าที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ สอดคล้องกับผลของมวลที่สูญหายไป เนื่องจากมีน้ำหนักของผลิตภัณฑ์สุดท้ายหลงเหลืออยู่อย่างคงที่ที่ 51 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4-2) โดยคาดว่าปฏิกิริยานี้เกิดการสลายตัว (decomposition) ของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่มีการสูญเสียมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โมโนเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) แสดงดังสมการที่ (1) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ จันทรและคณะ (2551) ที่พบว่าช่วงเปลือกไข่จะมีช่วงการสลายตัวที่อุณหภูมิ 850-900 องศาเซลเซียส

4.1.4 องค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในเปลือกไข่

จากการนำเปลือกไข่ที่ผ่านการร่อนแล้วไปวิเคราะห์องค์ประกอบ และโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction; XRD) ที่มุมตกกระทบ 2θ ระหว่าง 10-70 จะได้กราฟแสดงผลดังรูปที่ 4-3



รูปที่ 4-3 กราฟแสดงองศาการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์และความเข้มสัญญาณของ CaCO_3 Egg Shell และ

แคลเซียมคาร์บอเนต 3 รูปผลึกได้แก่ aragonite, dolomite และ calcite

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสจวณไวสาหรับการใช้งานเพื่อกการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

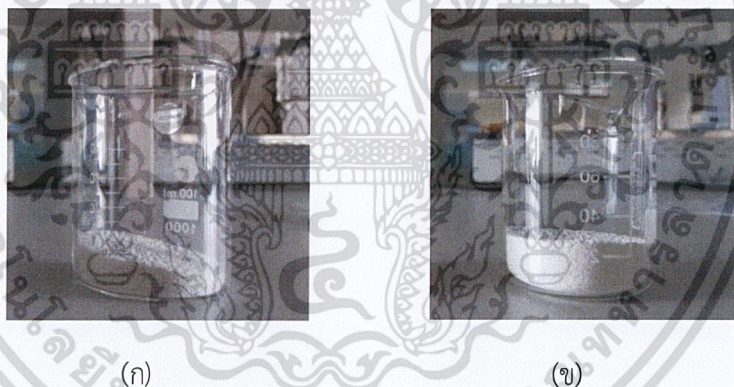
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นได้ว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเปลือกไข่ที่เตรียมไว้ สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของมาตรฐาน ซึ่งเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ Calcite โดยมีพีคหลักแสดงเอกลักษณ์ตำแหน่งที่ 23.101 องศา 29.466 องศา 31.516 องศา 36.039 องศา 39.489 องศา 43.244 องศา 47.212 องศา 48.615 องศา 56.678 องศา 57.517 องศา 58.232 องศา 60.798 องศา 61.145 องศา 61.527 องศา 63.191 องศา 64.795 องศา 65.796 องศา และ 69.349 องศา ตามลำดับ ซึ่งช่วยยืนยันผลวิเคราะห์หุ้ฟูฟ้งักชั้นที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกไข่ได้ว่าเปลือกไข่มีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โครงสร้างผลึก Calcite

4.2 สมบัติของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่

4.2.1 การเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในเปลือกไข่เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO)

หลังจากนำเปลือกไข่ที่ผ่านการร่อนแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่าเปลือกไข่หลังการเผามีลักษณะแตกต่างจากเดิม คือสีของเปลือกไข่ก่อนการเผามีลักษณะขุ่น และมีความอ่อนตัว ซึ่งจากการที่สีของเปลือกไข่มีลักษณะต่างกัน เพราะการเผาเปลือกไข่ทำให้เกิดการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4-4 (ข)

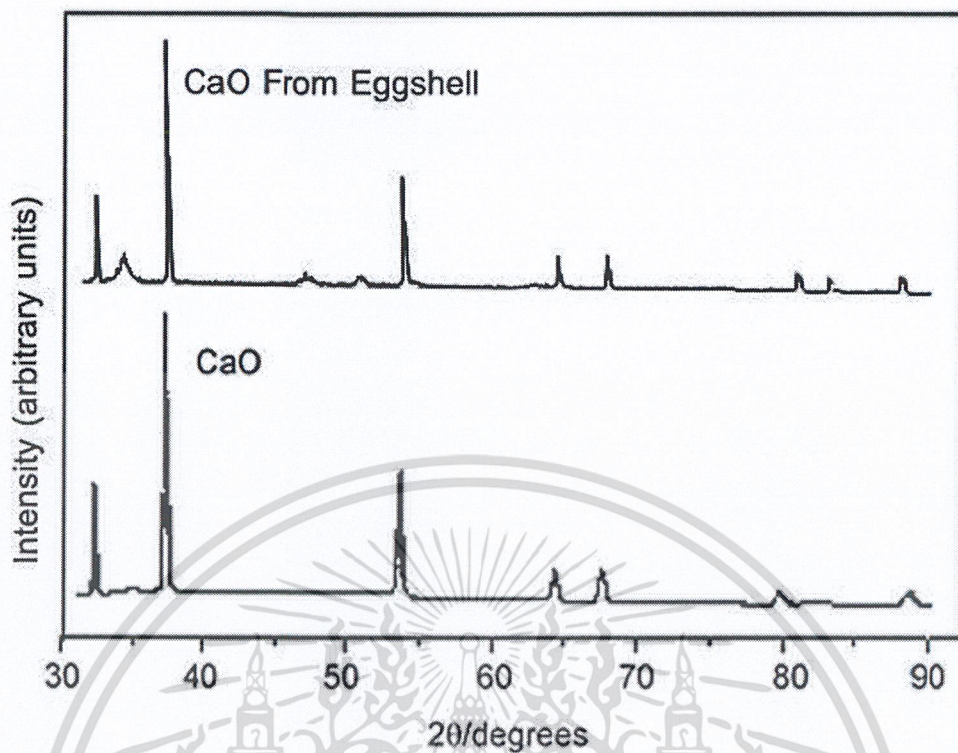


รูปที่ 4-4 เปรียบเทียบลักษณะของวัสดุ (ก) ก่อนเผา และ (ข) หลังเผาที่อุณหภูมิ 900°C

4.2.2 องค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของ CaO ที่ได้จากเปลือกไข่

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบ และโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction; XRD) ที่มุมตกกระทบ 2θ ระหว่าง $10-70$ ของ CaO ที่ได้จะได้กราฟแสดงผลดังรูปที่ 4-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-5 กราฟแสดงของโครงสร้างผลึกของแคลเซียมออกไซด์ CaO Egg Shell และกราฟมาตรฐานของแคลเซียมออกไซด์

จากรูปจะเห็นได้ว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเปลือกไข่ที่เผาแล้ว สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของมาตรฐานแคลเซียมออกไซด์ โดยมีพีคหลักแสดงเอกลักษณ์ตำแหน่งที่ 32.24 องศา 37.40 องศา 53.929 องศา 64.242 องศา และ 67.469 องศา ตามลำดับ ซึ่งช่วยยืนยันผลิตภัณท์ที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง คือ แคลเซียมออกไซด์

4.2.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว, ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิว, ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ด้วยเทคนิคการดูดซับ-ก๊าซไนโตรเจน (BET) สามารถคำนวณพื้นที่ผิวเฉลี่ยได้ดังแสดงในตารางที่ 4-2 แสดงในภาคผนวก ข-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-2 ผลจากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สมบัติทางกายภาพ		
	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ขนาดรูพรุน (nm)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)
แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่	27.71	7.64	0.05

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของแคลเซียมออกไซด์(CaO) ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ มีค่าเท่ากับ 27.71 m²/g, 7.64 nm และ 0.05 cm³/g ตามลำดับ ซึ่งสมบัติทางกายภาพดังกล่าวหากมีค่ามากจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันมีประสิทธิภาพมากขึ้น

4.3 ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล

จากการวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มโอเลอิน ตรา มรกต ตามวิธีมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40 ก่อนการนำไปสังเคราะห์ไบโอดีเซลพบว่าน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการศึกษามีปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid, FFA) อยู่ 1.11 ± 0.001% (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก-6) แสดงให้เห็นว่าน้ำมันปาล์มที่ใช้ศึกษามีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลเนื่องจากมีปริมาณกรดไขมันอิสระไม่เกิน 2.5% ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการนำมาสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสดังที่ได้กล่าวไว้ในงานวิจัยของจันทร์และคณะ (2551)

4.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

4.4.1 ปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการทดลองผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะต่างๆตามตารางการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) โดยใช้ น้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบ และใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยมีแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวแปรที่ศึกษาจำนวน 3 ตัวแปร ได้แก่ เวลาในการทำปฏิกิริยา (t) 30, 45 และ 60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (C) 2.0, 3.0 และ 4.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน (M) 6:1, 9:1 และ 12:1 ได้ผลร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%FAME) ดังแสดงดังตารางที่ 4-3 โดยลักษณะโครโมโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ด้วยวิธี (¹H-NMR) ดูได้ที่ภาคผนวก ข-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-3 ผลจากการคำนวณปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์

การทดลองที่	อัตราส่วน			ค่าที่ได้จากกราฟ		%FAME
	C	M	T	CH ₂	-OCH ₃	
1	3	9	45	1.22	1.37	74.86
2	2	6	45	1.23	1.28	69.38
3	3	6	30	1.22	1.18	64.48
4	3	12	30	1.23	1.48	80.22
5	3	9	45	1.23	1.41	76.42
6	2	12	45	1.23	1.57	85.09
7	3	12	60	1.24	1.53	82.26
8	3	9	45	1.23	1.53	82.93
9	4	12	45	1.23	1.62	87.80
10	4	6	45	1.23	1.4	75.88
11	4	9	60	1.23	1.54	83.47
12	2	9	60	1.22	1.67	91.26
13	3	6	60	1.22	1.16	62.87
14	4	9	30	1.23	1.69	91.60
15	2	9	30	1.23	1.74	94.31

จากตารางที่ 4-3 พบว่าน้ำมันปาล์มสามารถเปลี่ยนไปเป็นไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยมีแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ซึ่งมีร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%FAME) อยู่ในช่วง 62.87 เปอร์เซ็นต์ ถึง 94.31 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่ผ่านมาตรฐานไบโอดีเซลที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนดไว้ คือ 96.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ (จันทร์และคณะ, 2551) ที่ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช พบว่ามีร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%FAME) ในสัดส่วนใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 61.95 เปอร์เซ็นต์ ถึง 95.25 เปอร์เซ็นต์

4.4.2 ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองทางสถิติ

ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MINITAB ด้วยวิธีการวิเคราะห์ผลจากพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ได้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับแบบจำลองต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-4 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

แบบจำลอง	R ² (%)	R ² _{adj} (%)	SE
Linear model	40.90	24.78	8.161
Linear + square model	93.08	87.89	3.805
Linear + interaction model	41.98	0.00	9.482
Full quadratic model	94.16	83.64	3.275

จากตารางที่ 4-4 พบว่าแบบจำลอง Full Quadratic มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) น้อยที่สุดคือ 3.275 และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) มากที่สุดคือ 94.16 เปอร์เซ็นต์แสดงว่าแบบจำลอง Full Quadratic มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับร้อยละเมทิลเอสเทอร์

4.4.3 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β) ของตัวแปร

ผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปร แบบจำลอง Full Quadratic ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

Term	Cofe	StDev	t	P
Constant	22.3075	43.6312	0.511	0.631
%CaO (C)	-36.4387	14.4315	-2.525	0.053
MeOH:oil (M)	23.7450	4.8105	4.936	0.004
Time (t)	-0.0481	0.9621	-0.050	0.962
%CaO*%CaO (C ²)	7.1550	1.9809	3.612	0.015
MeOH:oil*MeOH:oil (M ²)	-1.1719	0.2201	-5.325	0.003
Time*Time (t ²)	0.0003	0.0088	0.038	0.971
MeOH:oil*%CaO (M*C)	-0.3158	0.6344	-0.498	0.640
Time*%CaO (t*C)	-0.0847	0.1269	-0.667	0.453
Time* MeOH:oil (t*M)	0.0203	0.0423	0.479	0.652

หมายเหตุ S=3.275 R² = 94.16 % R²(adj) = 83.64%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- S คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน
 Coeff คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β) ของแต่ละตัวแปรในสมการ Full Quadratic
 StDev คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)
 t และ p คือ ตัวสถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐานและค่าความน่าจะเป็นตามลำดับ

จากตารางที่ 4-5 สามารถเขียนสมการจากแบบจำลอง Full Quadratic แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของเมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระ (เวลาในการทำปฏิกิริยา, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน) ได้ดังสมการที่ (10)

$$\begin{aligned} \%FAME = & 22.3075 - 36.4387C + 23.7450M - 0.0481t + 7.1550C^2 \\ & - 1.1719M^2 + 0.0003t^2 - 0.3158MC - 0.0847tC + 0.0203tM \end{aligned} \quad (10)$$

- โดยที่ t คือ เวลาการทำปฏิกิริยา (นาที)
 M คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน
 C คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

4.4.4 การวิเคราะห์นัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปร (Test on Individual Regression Coefficients)

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปรในสมการ Full Quadratic ถูกนำมาหา นัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวโดยการทดสอบสมมติฐาน

$$H_0: \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k = 0 \quad \text{ตัวแปรอิสระที่ } i \text{ (X}_i\text{) ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม}$$

$$H_1: \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k \neq 0 \quad \text{ตัวแปรอิสระที่ } i \text{ (X}_i\text{) มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม}$$

ตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบ คือ ตัวสถิติ t

การตัดสินใจว่าตัวแปรที่สนใจมีอิทธิพลต่อตัวแปรหรือไม่ โดยพิจารณาค่า *p-value* ซึ่งจะปฏิเสธ H_0 ก็ต่อเมื่อค่า *p-value* ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ (α) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ จะกำหนดไว้ที่ 0.05 จากตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาในส่วนของ Linear Term อันได้แก่ t, M และ C มีค่า *p-value* ของตัวแปร t, M และ C มีค่าเท่ากับ 0.962, 0.004 และ 0.053 ตามลำดับ เพราะฉะนั้นที่ระดับ นัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 พบว่าค่า *p-value* ของ M มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรอิสระ M จัดเป็น ปัจจัยหลักหรือตัวแปรที่มีผลต่อ %FAME อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และที่ ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 พบว่าค่า *p-value* ของ t และ M มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปร อิสระ t และ C ไม่จัดเป็นตัวแปรที่มีผลต่อ %FAME อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับต่อไปพิจารณาส่วนของ Square terms อันได้แก่ t^2 , M^2 และ C^2 พบว่าค่า p -value มีค่าเท่ากับ 0.971, 0.003 และ 0.015 ตามลำดับ จะเห็นว่าค่า p -value ของตัวแปรอิสระ M^2 และ C^2 ในส่วนของ Square term มีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 ตัวแปรอิสระ M^2 และ C^2 จัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อ %FAME อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 พบว่าค่า p -value ของตัวแปรอิสระ t^2 มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรอิสระ t^2 ไม่จัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อ %FAME อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95

สุดท้ายพิจารณาส่วนของอิทธิพลร่วมของตัวแปร (Interaction terms) ซึ่งบอกถึงความสัมพันธ์หรือความเกี่ยวข้องระหว่างตัวแปรอิสระที่ได้ทำการศึกษาน้อยสองปัจจัยว่ามีผลต่อตัวแปรตามที่ศึกษาหรือไม่ ในที่นี้ได้แก่ tC, tM และ MC พบว่ามีค่า p -value เป็น 0.453, 0.652 และ 0.640 ตามลำดับ ที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 จะเห็นได้ว่าค่า p -value ของตัวแปรอิสระ tC ในส่วนของ Interaction terms มีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 ตัวแปร tC จัดเป็นปัจจัยร่วมที่มีผลต่อ %FAME อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่อิทธิพลร่วมระหว่าง MC และ tC ไม่มีผลต่อ %FAME อย่างมีนัยสำคัญ

ทั้งนี้อิทธิพลของตัวแปรต่อค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูป Contour line ได้ดังรูปที่ 4-6 ถึง 4-8

1. อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่และเวลาการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME

ผลของเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์ (%FAME) เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันมีค่าคงที่เท่ากับ 9:1 แสดงได้ดังรูปที่ 4-6



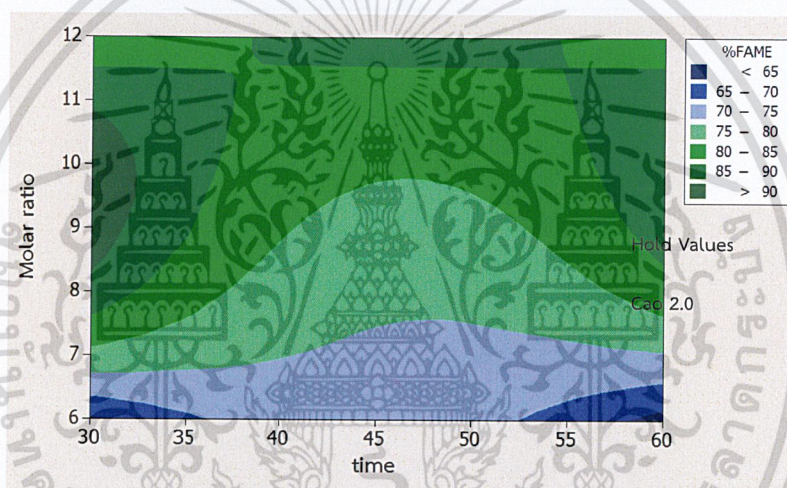
รูปที่ 4-6 Contour Plot แสดงอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่และเวลาการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME เมื่อกำหนดอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 9:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-6 พบว่า %FAME เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 30 นาที และเมื่อเพิ่มเวลามากขึ้นจะส่งผลให้ %FAME มีแนวโน้มลดลง จนกระทั่งเวลาตั้งแต่นาทีที่ 52 เป็นต้นไป %FAME มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ %FAME พบว่า %FAME มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เพิ่มขึ้นจาก 2.0 เปอร์เซ็นต์ถึงประมาณ 2.75 เปอร์เซ็นต์หลังจากนั้นพบว่า %FAME มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ 4.0 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ส่งผลต่อ %FAME

2. อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME

ผลของเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์ (%FAME) เมื่อกำหนดให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีค่าคงที่เท่ากับ 2.0 โดยน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ต่อน้ำหนักของน้ำมันแสดงได้ดังรูปที่ 4-7



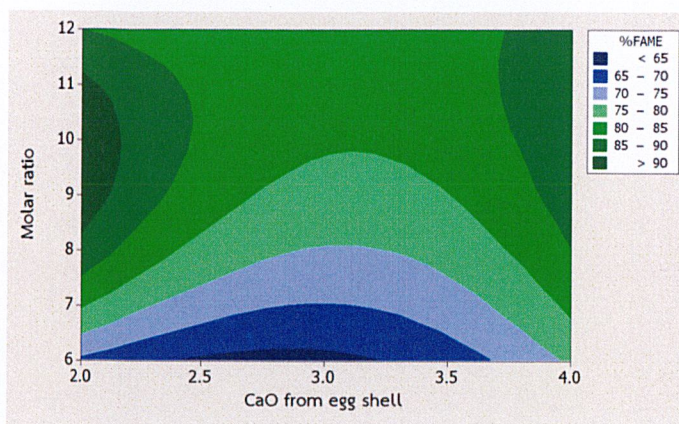
รูปที่ 4-7 Contour Plot แสดงอิทธิพลของเวลาการทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันต่อ %FAME เมื่อกำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4-7 พบว่าผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME ขึ้นกับอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีในระบบโดยในสถานะที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน เพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ %FAME มีค่ามากขึ้น ซึ่งระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่ส่งผลต่อ %FAME

3. อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ต่อ %FAME

ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์ (%FAME) เมื่อกำหนดให้เวลาในการทำปฏิกิริยามีค่าคงที่เท่ากับ 45 นาที แสดงได้ดังรูปที่ 4-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-8 Contour Plot แสดงอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันต่อ %FAME เมื่อกำหนดเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 45 นาที

จากรูปที่ 4-8 จะเห็นได้ว่า %FAME มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน %FAME มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน ซึ่งสรุปได้ว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันส่งผลต่อค่า %FAME

4.4.5 การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม

ในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม MINITAB เป็นการเอาเทคนิคที่เรียกว่า Simultaneous Optimization Technique เป็นการนำเอา Desirability Functions มาใช้ในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม (Myers and Montgomery, 2002 อ้างถึงในอิริยุทธ์, 2551) การใช้โปรแกรม MINITAB ในการประมวลผล มีสิ่งที่ต้องกำหนดดังต่อไปนี้

1. ค่าเป้าหมาย (Target) ของ %FAME ที่ต้องการ

เนื่องจากวัตถุประสงค์เพื่อต้องการให้ได้ค่า %FAME มากที่สุด (Maximize) และเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ดังนั้นจึงกำหนดเป้าหมายเท่ากับ 96.5 เปอร์เซ็นต์

2. ค่าขอบเขตบน (Upper Limit) ของ %FAME

ค่าขอบเขตบนเป็นเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มากที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องกำหนดค่าขอบเขตบนในนี้กำหนดให้เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์

3. ค่าขอบเขตล่าง (Lower Limit) ของ %FAME

ค่าขอบเขตล่างเป็นเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์น้อยที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องกำหนดค่าขอบเขตล่างในนี้กำหนดให้เท่ากับ 62.87 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.ค่า Weigh

ค่า Weight เป็นตัวกำหนดรูปแบบของ Desirability Functions ในที่นี้กำหนดให้ค่า Weight เป็น 1

เมื่อกำหนดค่าดังกล่าวข้างต้นแล้ว โปรแกรม MINITAB สามารถประมวลผลที่สภาวะที่เหมาะสมตามเป้าหมายที่กำหนด คือ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 10:1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) โดยใช้แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ออกแบบการทดลองแบบบล็อก-เบทซ์นเคนร่วมกับการวิเคราะห์พื้นที่ผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าร้อยละเมทิลเอสเทอร์ (%FAME) และหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เปลือกไข่เป็ดมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่มีโครงสร้างเฟส Calcite เป็นส่วนประกอบเท่ากับร้อยละ 92.30

2. ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermo Gravimetric Analysis; TGA) พบว่าช่วงอุณหภูมิที่ใช้เปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ควรสูงกว่า 850°C แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สังเคราะห์ได้มีค่าพื้นที่ผิว $27.71\text{ m}^2/\text{g}$ ขนาดรูพรุน 7.64 nm และปริมาตรรูพรุน $0.05\text{ cm}^3/\text{g}$

3. การศึกษาความเหมาะสมของแบบจำลองสำหรับอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของเมทิลเอสเทอร์กับปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ (CaO), อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน พบว่า แบบจำลองแบบ Full quadratic model เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

4. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบระดับนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ของตัวแปรด้วย t-test พบว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน (M) ทั้งที่เป็นตัวแปรอิสระใน Linear term และที่เป็นตัวแปรอิสระใน Square term มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ตัวแปรร่วม (interaction term) ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (t) กับความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ (C) มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในแบบจำลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

5. สภาวะที่เหมาะสมทางสถิติในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) โดยใช้แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา (t) 60 นาที ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ (C) 2 เปอร์เซ็นต์

โดยใช้น้ำหนักและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน (M) 10 : 1 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. ในขั้นตอนการทำปฏิกิริยาอาจจะทำการควบคุมปัจจัยบางประการได้ไม่สมบูรณ์แบบ จึงอาจส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลได้
2. การเลือกช่วงเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาแคบเกินไปทำให้ผลการทดลองที่ได้ไม่ครอบคลุมเท่าที่ควร ซึ่งหากเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาให้นานขึ้นอาจจะส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์มากขึ้นได้
3. เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องงบประมาณทำให้ไม่สามารถทำการส่งตัวอย่างวิเคราะห์ในครั้งที่ 2 ได้ จึงจำเป็นต้องใช้ค่าที่ได้จากผลการทดลองเพียงค่าเดียว (ไม่ได้ใช้ค่าเฉลี่ย) จึงอาจส่งผลให้ค่าที่ได้คลาดเคลื่อนไป

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลในงานวิจัยนี้คือ 60 องศาเซลเซียส ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงความเป็นไปได้ในการลดอุณหภูมิที่ใช้ เพื่อประหยัดพลังงาน
2. ในการเลือกช่วงของปัจจัยที่นำมาใช้ในการทดลองควรเลือกให้ครอบคลุมปัจจัยโดยรวมเพื่อลดปัญหาเรื่องความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง
3. ควรมีการศึกษาสมบัติทางกายภาพ-ทางเคมี และคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ให้มากขึ้น เพื่อการพัฒนาให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

เกศระวี ปานทับ, อนุพร โกไศยกานนท์ และสุทธิมา ลิมหลัก. 2554. “การใช้ประโยชน์ของไขมันโคเจียวเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล.” โครงการงานพิเศษสาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

จรัล ทรัพย์เสรี. 2552. “DOE CENTRAL COMPOSITE DESIGN.” *Q Production*. 145 : 72-74

จันทร สาททอง, นันทิวัฒน์ ประการสุข และปุณิกา พิริยะอังกูร. 2551. “การสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” โครงการงานพิเศษสาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ทัศนีย์ สวัสดิ์พาณิชย์. 2550. “การหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุบูดำด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธีรยุทธ์ ธรรมวิจิตร. 2551. “การหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุบูดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รุ่งทิพย์ ชัยเดช. 2557. “การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันทอดใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมเมทอกไซด์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

วิชัย ดำรงโกคณัณฑ์. 2555. “เทคโนโลยีการนำเปลือกไข่มาใช้ประโยชน์.” *วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์*. ปีที่ 2 : 75-83

อัจฉรา อิ่มคา พุฒคา และอภิพงษ์ พุฒคา. 2557 “การสังเคราะห์และคุณลักษณะของแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล.” *บทความปริทัศน์การสังเคราะห์และคุณลักษณะของแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล*. 22(3) : 29-46.

Feng Gou and Zhen Fang. 2011. “Biodiesel Production with Solid Catalysts.” *Biodiesel – Feedstocks and Processing Technologies*. 12 : 341-358

Boro J., Deka D. and Thakur A.J. 2009. “A review on solid oxide derived from waste shells as catalyst for biodiesel production.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16 : 904-910

Viriya-empikul N., Krasae P., Nualpaeng W., Yoosuk B. and Faungnawakij K. 2012.

“Biodiesel production over Ca-based solid catalysts derived from industrial wastes.” *Fuel* 92 : 239-244

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Tsai W.T., Yang J.M., Hsu H.C., Lin C.M., Lin K.U. and Chiu. C.H. 2008. "Development and characterization of mesoporosity in eggshell ground by planetary ball milling." *Microporous and Mesoporous Materials*. 111 : 379-386
- Yoo S., Hsieh J.S., Zou P. and Kokoszka J. 2009. "Utilization of calcium carbonate particles from eggshell waste as coating pigments for ink-jet printing paper." *Bioresource Technology*. 100 : 6416-6421



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

ก-1 การหาอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน

การคำนวณหาอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ใช้ในการบวนการทรานส์เอสเทอร์ิเฟเคชัน เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมัน 12:1 โดยมีน้ำมันปาล์มเริ่มต้นหนัก 100 กรัม

โดย	มวลโมเลกุลของน้ำมันปาล์ม	=	847	g/mol
	มวลโมเลกุลของเมทานอล	=	32	g/mol
	ความหนาแน่นที่แน่นอน	=	0.7918	g/cm ³
มีสูตรการคำนวณเป็น	$D = M/V$			
น้ำมันปาล์ม 1 โมล	=		น้ำมันปาล์มเริ่มต้น (g)	
	=		มวลโมเลกุลของน้ำมันปาล์ม (g/mol)	
	=		100 g	
	=		847g/mol	
	=		0.1180 mol	

จากการทดลองใช้น้ำมันปาล์มและเมทานอลจำนวน 1 mol และ 12 mol ตามลำดับ เพราะฉะนั้นถ้าใช้น้ำมันปาล์ม 0.1180 mol จะต้องใช้เมทานอล 1.416 mol

ปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองตามอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน (12 : 1) เท่ากับ $\frac{1.416 \text{ mol} \times 32 \text{ g/mol}}{0.7918 \text{ g/mol}} = 57.22 \text{ cm}^3$

ก-2 การหาเปอร์เซ็นต์ผลผลิต (%Yield)

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอดีเซลตามวิธีของ ทศนีย์ สวัสดิ์พานิชย์ (2550) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

จากการทดลอง ชั่งน้ำหนักน้ำมันปาล์มเริ่มต้นเท่ากับ 100.09 กรัม น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ได้ จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเท่ากับ 81.72 กรัม

$$\text{ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ผลผลิตจะเป็น } \frac{81.72 \times 100}{100.09} \text{ หรือ } 81.65 \%$$

ก-3 การหาปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$

การหาปริมาณร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ เป็นการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ของ เมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ที่มีไตรกลีเซอไรด์ เป็นองค์ประกอบหลัก ผลที่ได้จากการทดลองเป็นดังตาราง

การทดลองที่	อัตราส่วน			%Yield	ค่าที่ได้จากกราฟ		%FAME
	C	M	T		CH ₂	-OCH ₃	
1	3	9	45	81.65	1.22	1.37	74.86
2	2	6	45	79.26	1.23	1.28	69.38
3	3	6	30	86.74	1.22	1.18	64.48
4	3	12	30	92.67	1.23	1.48	80.22
5	3	9	45	90.22	1.23	1.41	76.42
6	2	12	45	90.94	1.23	1.57	85.09
7	3	12	60	80.84	1.24	1.53	82.26
8	3	9	45	88.42	1.23	1.53	82.93
9	4	12	45	81.41	1.23	1.62	87.80
10	4	6	45	84.14	1.23	1.4	75.88
11	4	9	60	73.76	1.23	1.54	83.47
12	2	9	60	89.95	1.22	1.67	91.26
13	3	6	60	87.42	1.22	1.16	62.87
14	4	9	30	83.76	1.23	1.69	91.60
15	2	9	30	90.74	1.23	1.74	94.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned} \%FAME &= \frac{100 \times (2 \times \text{พื้นที่ใต้พีคของ } -OCH_3)}{3 \times \text{พื้นที่ใต้พีคของ } \alpha-CH_2} \\ &= 100 \times (2 \times 1.37) / 3 \times 1.22 \\ &= 74.86\% \end{aligned}$$

ก-4 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไฮดรอกไซด์

เตรียมสารละลาย NaOH 0.25 N โดยชั่ง NaOH 5 g ละลายในน้ำกลั่น 500 mL จากนั้นนำมาไทเทรตกับ KHP 5.1056 g ที่ละลายในน้ำกลั่น 100 mL แล้วปิเปตใส่ขวดรูปชมพู่ 3 ขวด ขวดละ 20 mL

ครั้งที่	สเกลเริ่มต้น	สเกลยุติ	ปริมาตร NaOH ที่ใช้ (mL)
1	0.00	19.95	19.95
2	0.00	19.95	19.95
3	0.00	20.05	20.05
	เฉลี่ย		19.98

ตัวอย่างการคำนวณ

- การหาความเข้มข้นของสารละลาย KHP

$$\begin{aligned} \text{จาก } g/MW &= NV/1000 \\ 5.1056/204.233 &= N(100)/1000 \\ N &= 0.2500 \text{ นอร์มอล} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การหาความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

$$\begin{aligned} \text{mol NaOH} &= \text{mol KHP} \\ N_{\text{NaOH}} V_{\text{NaOH}} &= N_{\text{KHP}} V_{\text{KHP}} \\ N_{\text{NaOH}} (13.28) &= 0.1000 (10) \\ N_{\text{NaOH}} &= 0.075 \text{ นอร์มอล} \end{aligned}$$

ก-5 การหาแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกไข่

$$\begin{aligned} - \text{โมล HCl เริ่มต้น} &= 0.01 \text{ mol} \\ - \text{โมล HCl ที่เหลือ} &= 0.0046 \times 0.1 \\ &= 0.00046 \text{ mol} \\ - \text{โมล HCl ที่ทำปฏิกิริยา} &= 0.01 - 0.00046 \\ &= 0.00954 \text{ mol} \\ - \text{โมล CaCO}_3 &= 0.00954 / 2 \\ &= 0.00477 \text{ mol} \\ - \text{ร้อยละ CaCO}_3 &= \frac{0.00477 \times 100.1 \times 100}{0.5173} \\ &= 92.30 \% \end{aligned}$$

ก-6 การหาปริมาณกรดไขมันอิสระ

ครั้งที่	น้ำหนักน้ำมัน (g)	NaOH ที่ใช้ไทเทรต (mL)	กรดไขมันอิสระ (%)	
			ในรูปลอริก	ในรูปปาล์มเมติก
1	7.05	0.7	0.50	0.64
2	7.08	0.7	0.50	0.64
3	7.06	0.65	0.46	0.59
เฉลี่ย			0.49	0.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 - \text{การหากรดไขมันอิสระในรูปลอริก (\%)} &= (\text{ปริมาณ NaOH} \times N \times 20.0) / \text{น้ำหนักน้ำมัน} \\
 &= (0.70 \times 0.2514 \times 20.0) / 7.05 \\
 &= 0.50 \% \\
 \text{เฉลี่ย} &= (0.50 + 0.50 + 0.46) / 3 \\
 &= 0.49 \%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 - \text{กรดไขมันอิสระในรูปปาล์มเมติก (\%)} &= (\text{ปริมาณ NaOH} \times N \times 25.6) / \text{น้ำหนักน้ำมัน} \\
 &= (0.70 \times 0.2514 \times 25.6) / 7.05 \\
 &= 0.64\% \\
 \text{เฉลี่ย} &= (0.64 + 0.64 + 0.59) / 3 \\
 &= 0.62\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น ปริมาณกรดไขมันอิสระ} &= \text{กรดไขมันอิสระในรูปลอริก} + \text{กรดไขมันอิสระในรูปปาล์มเมติก} \\
 &= 0.49 + 0.62 \\
 &= 1.11 \%
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบและวิเคราะห์

ข-1 การหาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (BET)

SURFACE AREA DATA		
Multipoint BET	2.771E+01	m ² /g
Langmuir Surface Area	6.634E+01	m ² /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area	4.112E+01	m ² /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area	5.486E+01	m ² /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area	4.168E+01	m ² /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area	5.616E+01	m ² /g
t-Method External Surface Area	2.771E+01	m ² /g
t-Method Micro Pore Surface Area	0.000E+00	m ² /g
DR Method Micro Pore Area	6.841E+01	m ² /g
PORE VOLUME DATA		
Total Pore Volume for pores with Diameter less than 2702.9 Å at P/Po = 0.99291	5.298E-02	cc/g
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume	6.207E-02	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume	6.453E-02	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter	6.207E-02	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter	6.453E-02	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume	6.140E-02	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume	6.413E-02	cc/g
t-Method Micro Pore Volume	0.000E+00	cc/g
DR Method Micro Pore Volume	2.416E-02	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume	6.006E-03	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume	6.448E-03	cc/g
PORE SIZE DATA		
Average Pore Diameter	7.647E+01	Å
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode)	2.147E+01	Å
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode)	3.762E+01	Å
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode)	2.147E+01	Å
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode)	3.762E+01	Å
DR Method Micro Pore Width	8.377E+01	Å
DA Method Pore Diameter (Mode)	2.960E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode)	1.888E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode)	3.599E+01	Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-2 สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์ (%FAME)ในไบโอดีเซลด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$

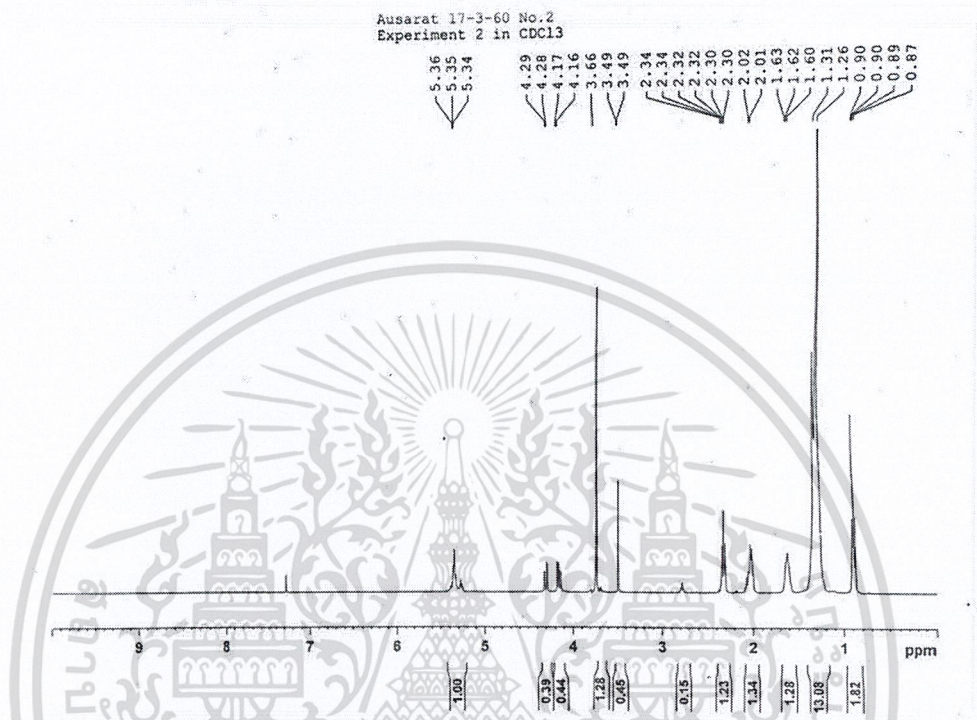
การทดลองที่ 1 : C = 3, M = 9, t = 45



รูปที่1 สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเร็วรอบเป็น 400 รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

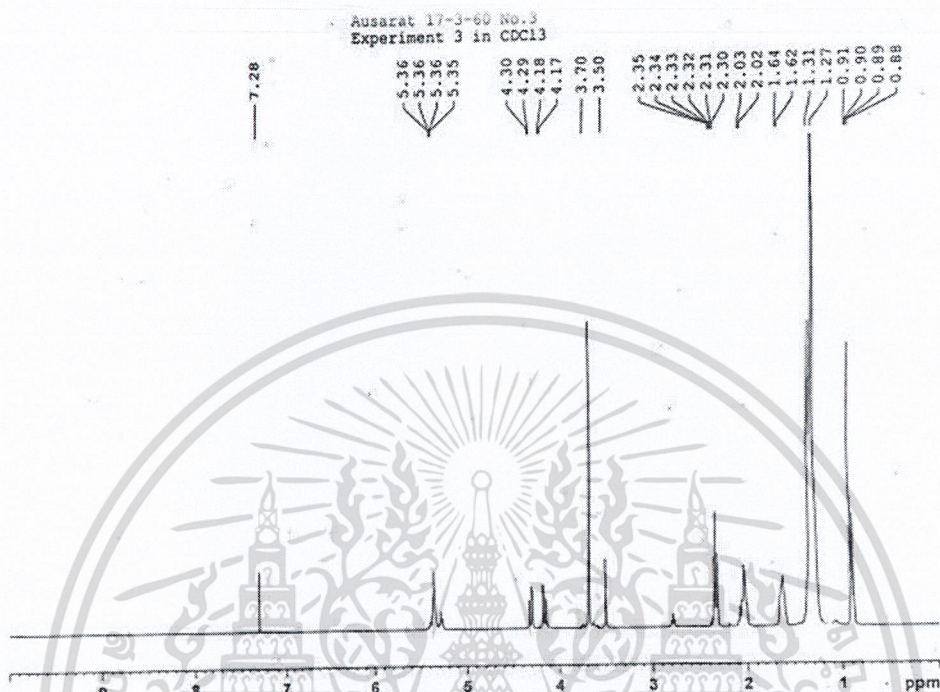
การทดลองที่ 2 : C = 2, M = 6, t = 45



รูปที่ 2 สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเร็วรอบเป็น 400 รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

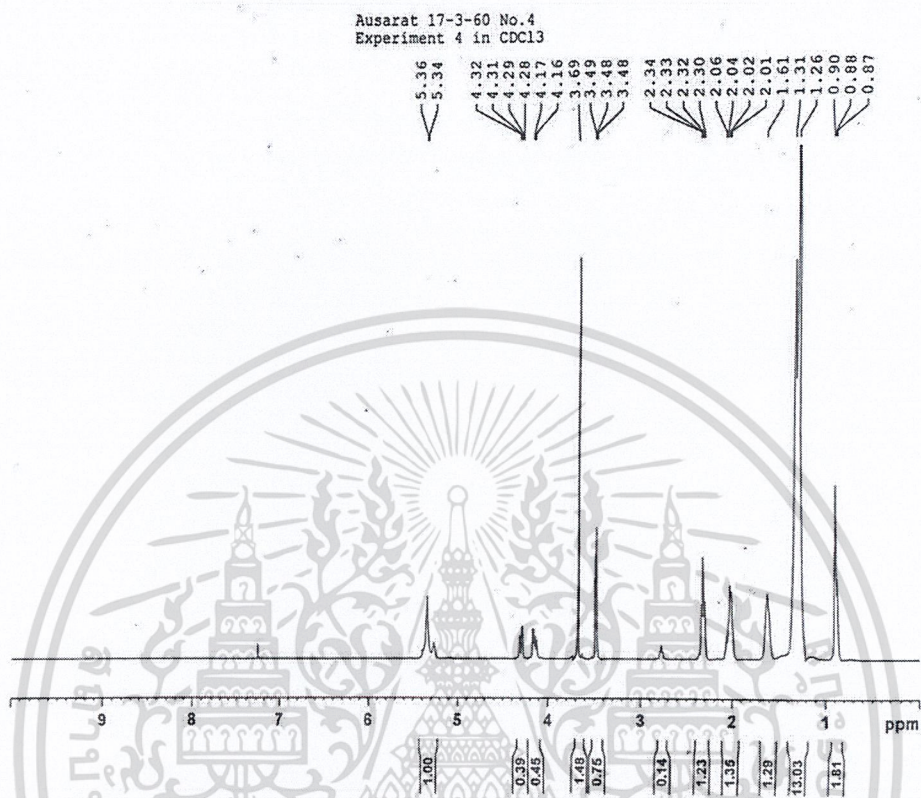
การทดลองที่ 3 : C = 3 , M = 6 , t = 30



รูปที่ 3 สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเร็วรอบเป็น 400 รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

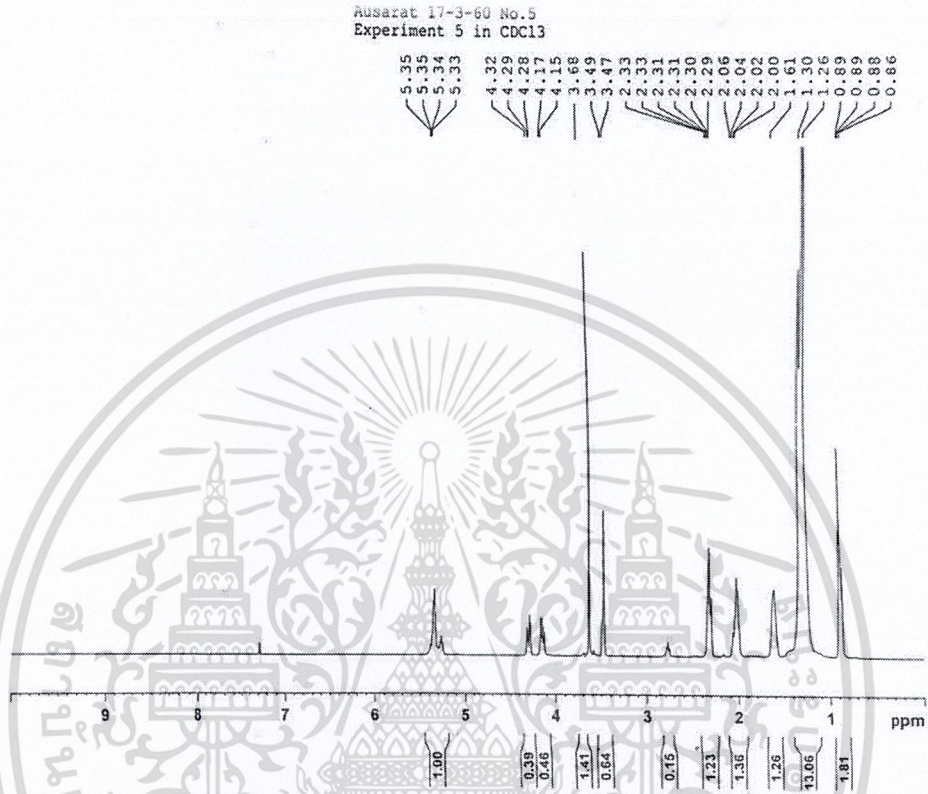
การทดลองที่ 4 : C = 3 , M = 12 , t = 30



รูปที่ 4 สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 12:1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเร็วรอบเป็น 400 รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

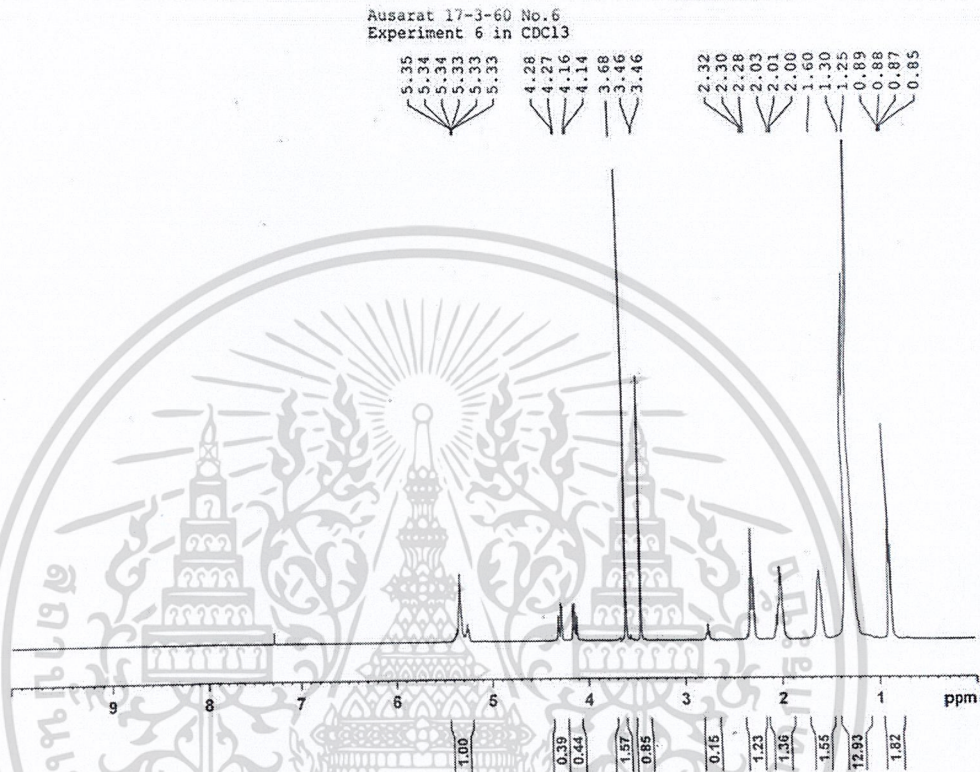
การทดลองที่ 5 : C = 3 , M = 9 , t = 45



รูปที่ 5 สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเร็วรอบเป็น 400 รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

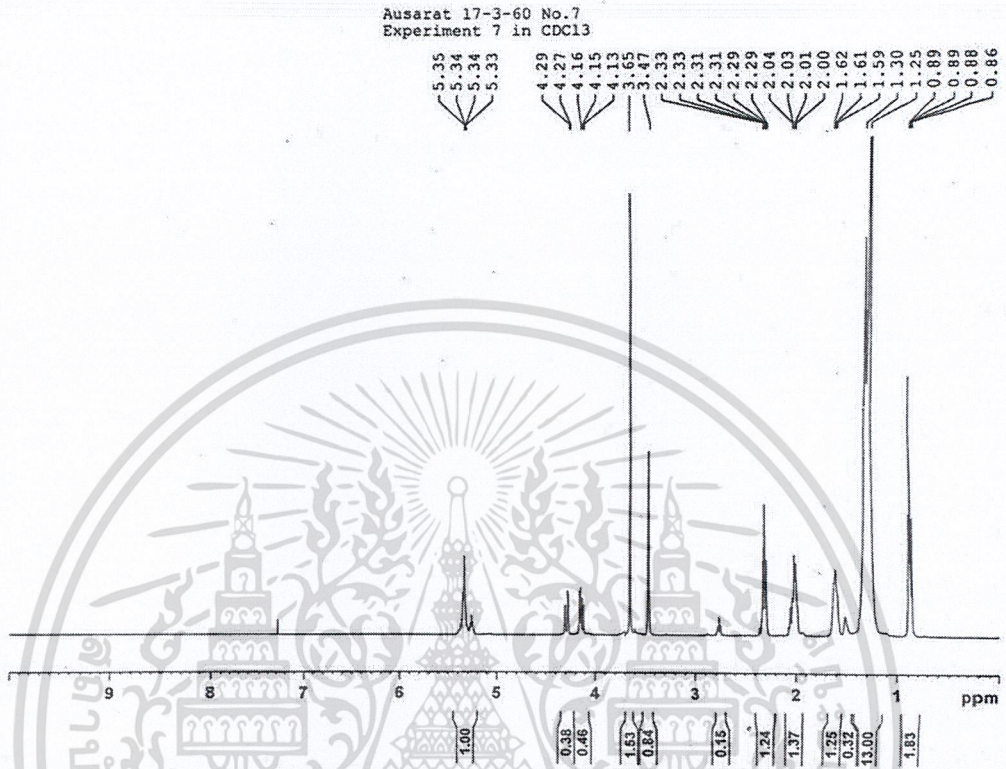
การทดลองที่ 6 : C = 2 , M = 12 , t = 45



รูปที่ 6 สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 12:1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเร็วรอบเป็น 400 รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

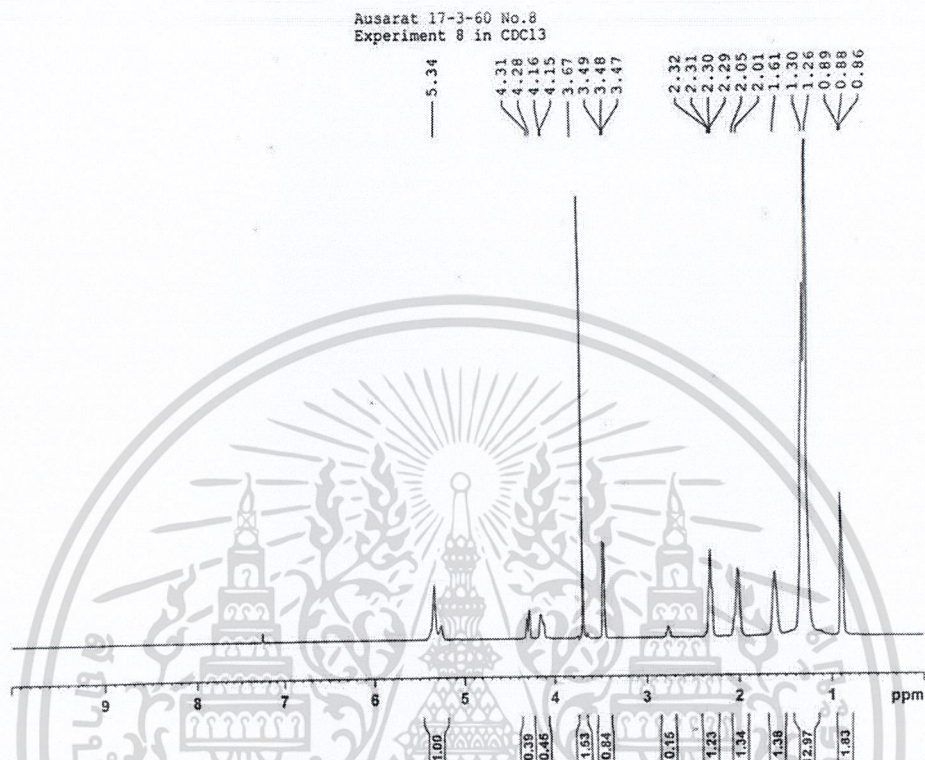
การทดลองที่ 7 : C = 3, M = 12, t = 60



รูปที่ 7 สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 12:1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเร็วรอบเป็น 400 รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

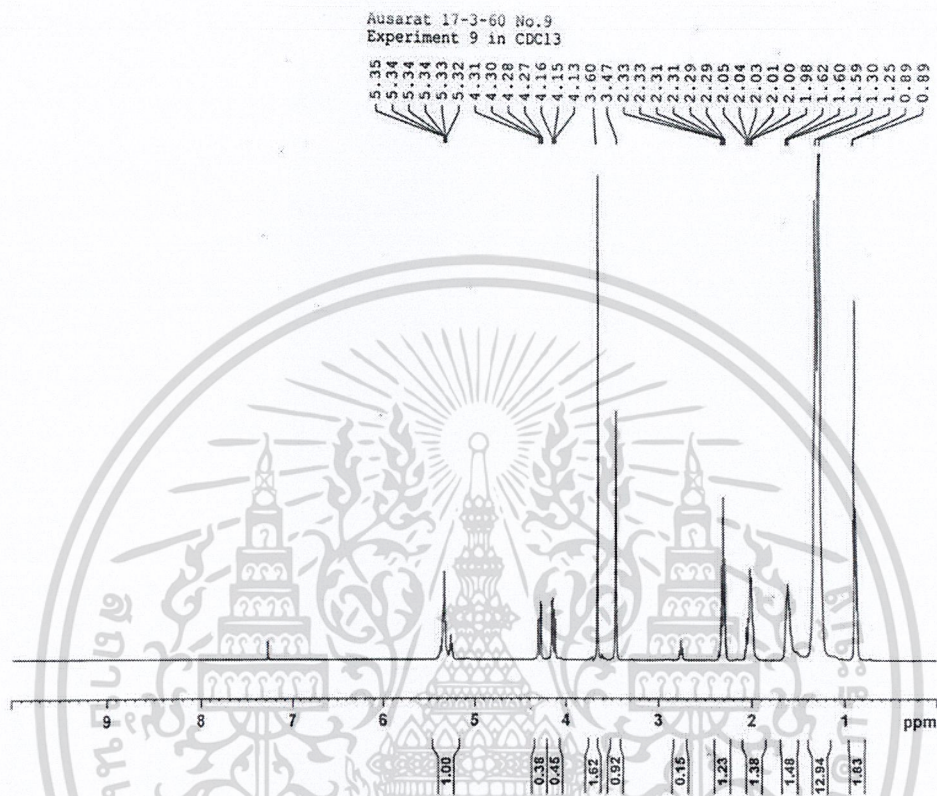
การทดลองที่ 8 : C = 3 , M = 9 , t = 45



รูปที่ 8 สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยใช้ ความเร็วรอบเป็น 400 รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

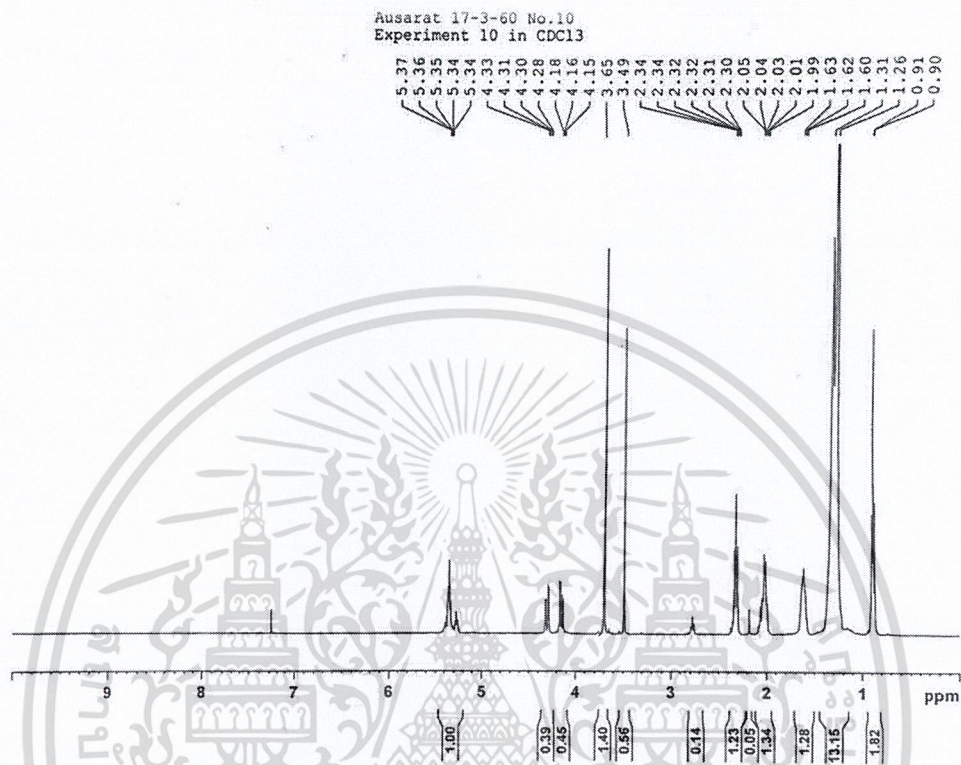
การทดลองที่ 9 : C = 4 , M = 12 , t = 45



รูปที่ 9 สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 12:1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเร็วรอบเป็น 400 รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

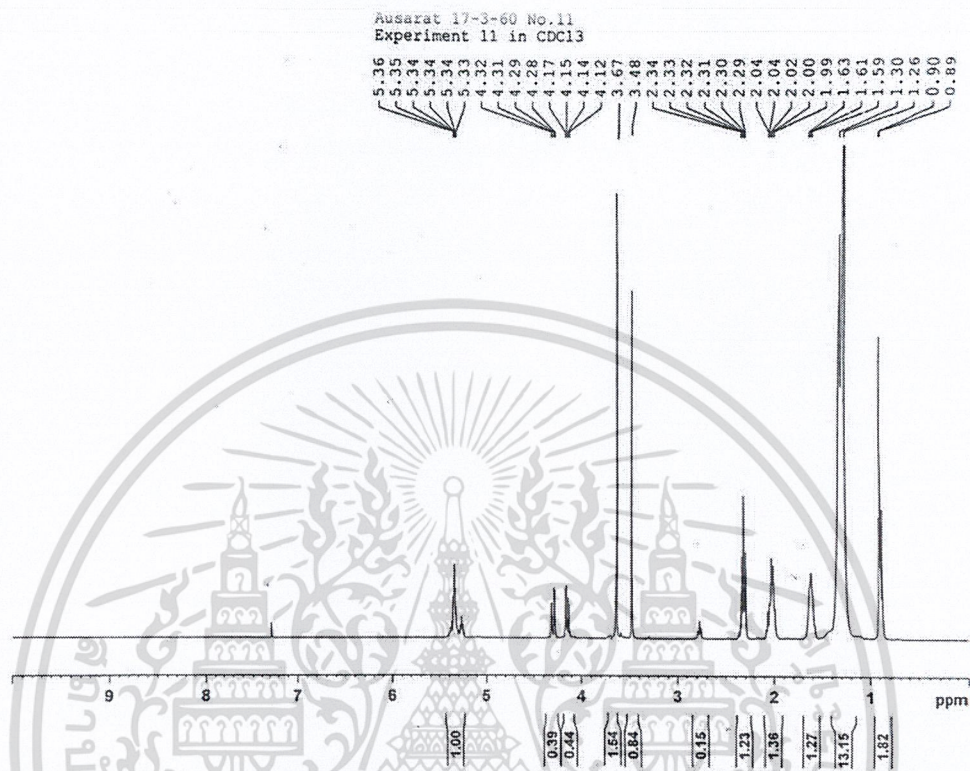
การทดลองที่ 10 : C = 4, M = 6, t = 45



รูปที่ 10 สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเร็วรอบเป็น 400 รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

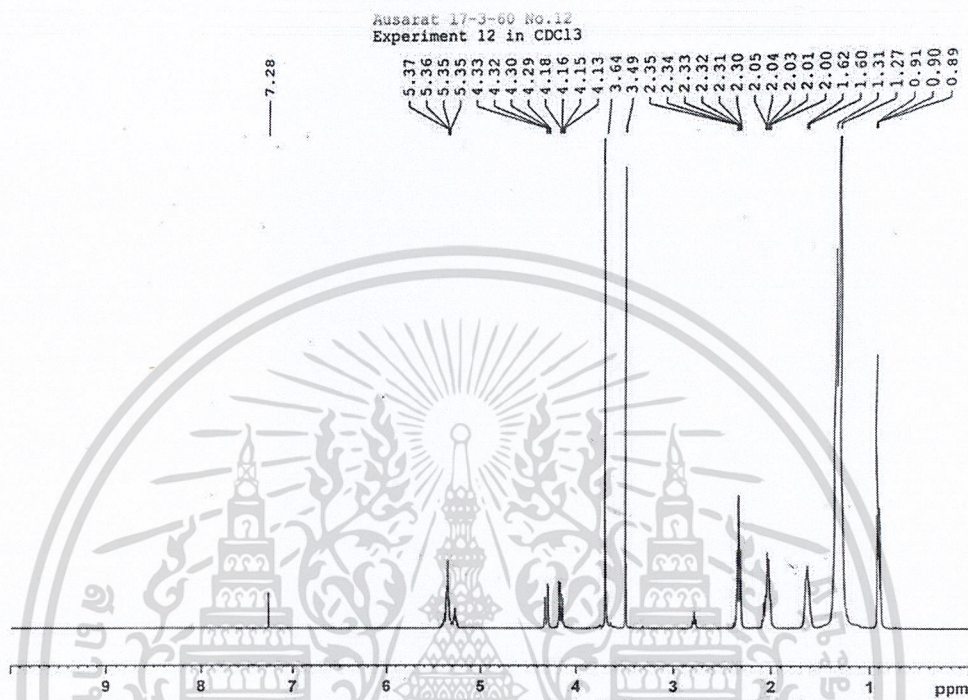
การทดลองที่ 11 : C = 4 , M = 9 , t = 60



รูปที่ 11 สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเร็วรอบเป็น 400 รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

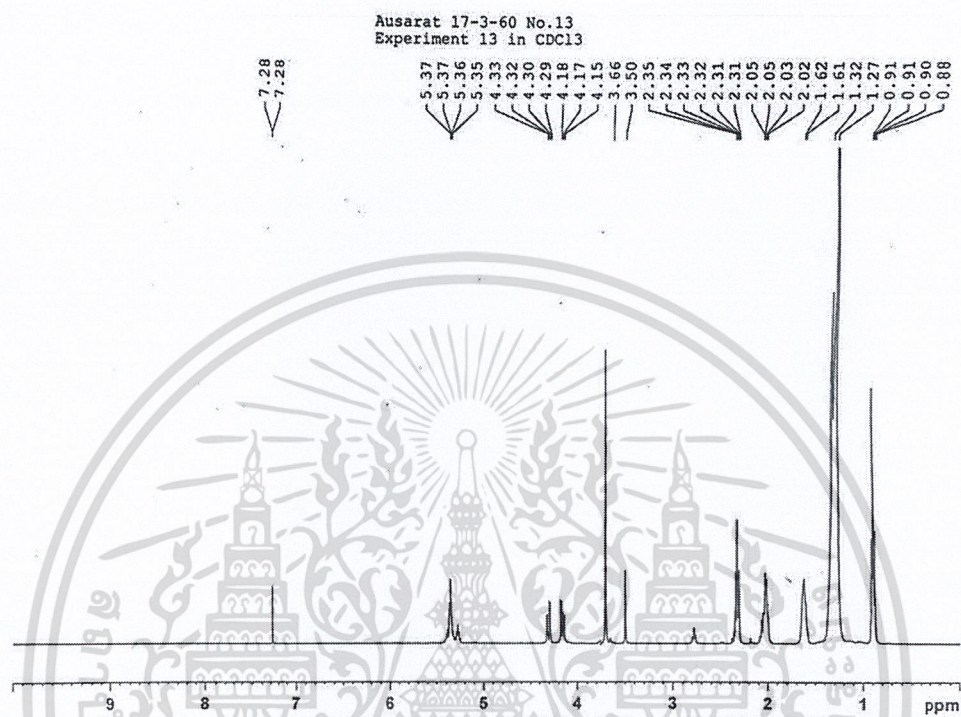
การทดลองที่ 12 : C = 2 , M = 9 , t = 60



รูปที่ 12 สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเร็วรอบเป็น 400 รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

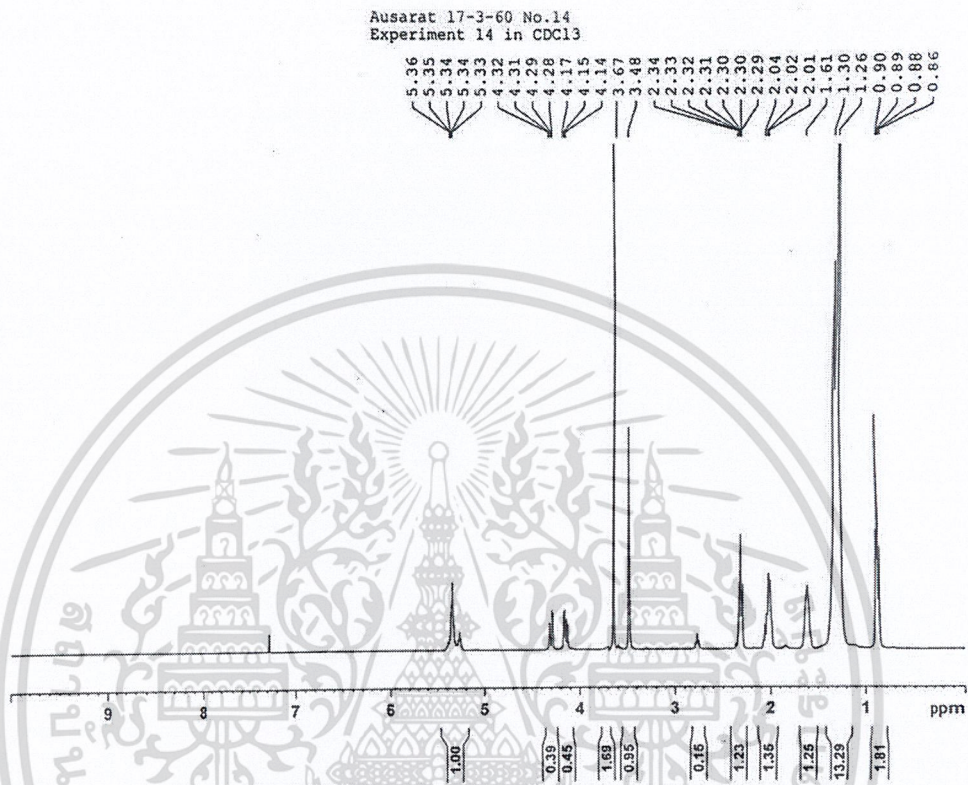
การทดลองที่ 13 : C = 3 , M = 6 , t = 60



รูปที่ 13 สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเร็วรอบเป็น 400 รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

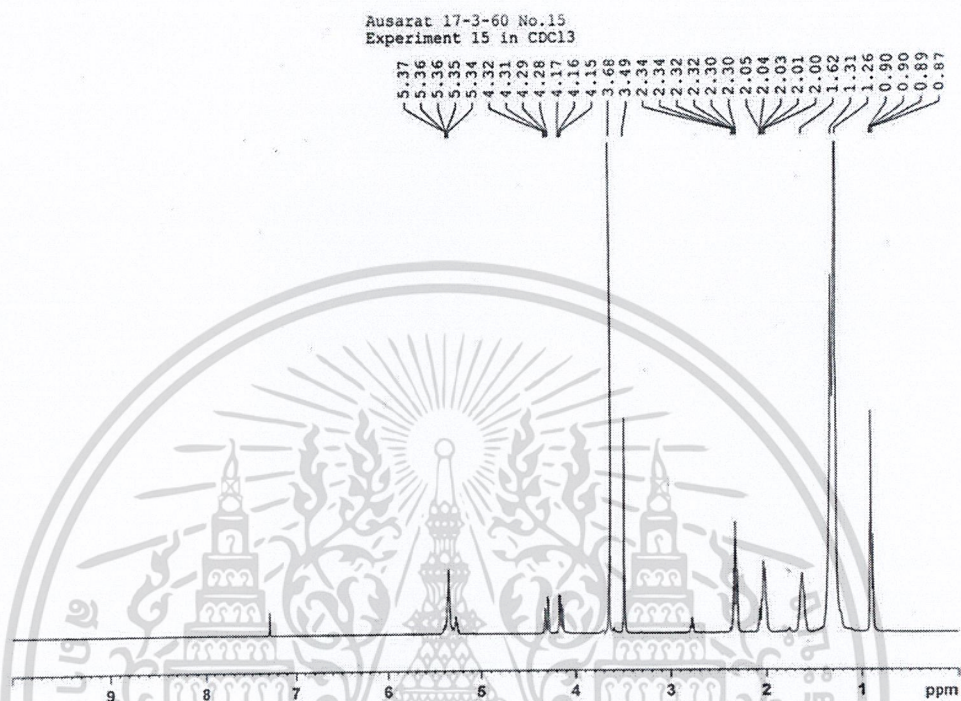
การทดลองที่ 14 : C = 4 , M = 9 , t = 30



รูปที่ 14 สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเร็วรอบเป็น 400 รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 15 : C = 2 , M = 9 , t = 30



รูปที่ 15 สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเร็วรอบเป็น 400 รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

วิธีการทดลอง

ค-1 การหาแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกไข่

- 1) นำเปลือกไข่ที่บดแล้ว มาชั่งน้ำหนักระหว่าง 0.45-0.55 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
- 2) เติมนกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 1 M จำนวน 10 มิลลิลิตร ทำการเขย่า ให้ความร้อนจนกว่าจะเดือดเป็นเวลาประมาณ 10 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
- 3) เติมนิฟอล์ฟทาลีน 2-3 หยด
- 4) นำมาไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 M
- 5) บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรตเพื่อวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในเปลือกไข่
- 6) ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

ค-2 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันตามวิธีมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40 พิจารณาน้ำมันที่นำมาทดลองว่ามีปริมาณกรดไขมันอิสระประมาณเท่าใด ดังตาราง

ตารางแสดงปริมาณกรดไขมันอิสระปริมาตรเมทานอลและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

กรดไขมันอิสระ (เปอร์เซ็นต์)	น้ำมัน (กรัม)	เมทานอล (มิลลิลิตร)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มอล)
0.00-0.2	56.4±0.2	50	0.1
0.2-1.0	28.2±0.2	50	0.1
1.0-30.0	7.05±0.05	75	0.25
30.0-50.0	7.05±0.05	100	0.25 หรือ 1.0
50.0-100	3.525±0.001	100	1.0

เนื่องจากน้ำมันที่จะนำมาทดลองต้องมีกรดไขมันอิสระไม่เกิน 2.5 % ดังนั้นจึงเลือกช่วงกรดไขมันอิสระในน้ำมัน 1.0 –30.0 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) เตรียมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 นอร์มอล
- 2) หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยนำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรเจนแพตทาเลต 0.25 นอร์มอล ใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์
- 3) ชั่งน้ำมัน 7.05 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 4) เติมเมทานอลลงไป 75 มิลลิลิตร
- 5) ให้ความร้อนจนสารละลายเข้ากันดี (ไม่เกิน 10 °C)
- 6) เติมฟีนอล์ฟทาลีน 2 มิลลิลิตร
- 7) ไทเทรตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน
- 8) บันทึกปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรตเพื่อวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ



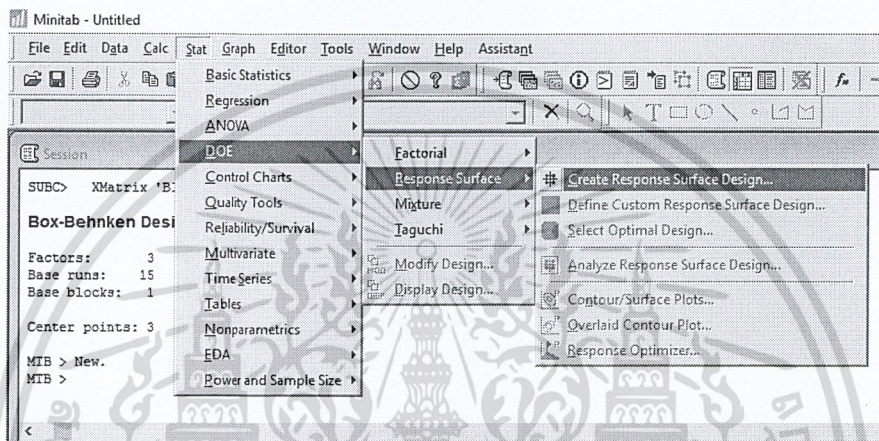
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การใช้โปรแกรม Mini Tab 16ในการวิเคราะห์

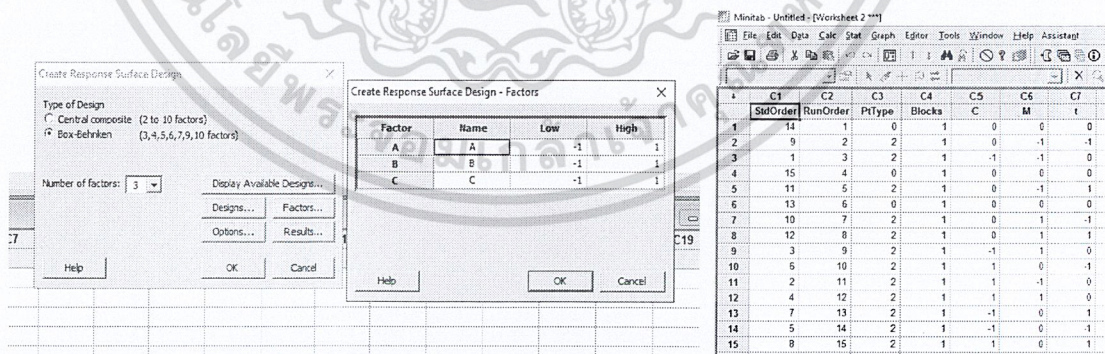
ง-1 การออกแบบการทดลอง

- 1) เข้าเมนู Stat > DOE > Response Surface > Create Response Surface Design...



- 2) เลือก Box-Behnken> Design... > OK > Factor... ใส่ข้อมูลระดับต่ำสุดและสูงสุดที่จะศึกษา> OK แล้วจะปรากฏเป็นตารางการทดลองใน work sheet

หมายเหตุ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลจากการทดลองที่ละปัจจัยเพื่อกำหนดขอบเขตต่ำสุด สูงสุด จึงใช้การ

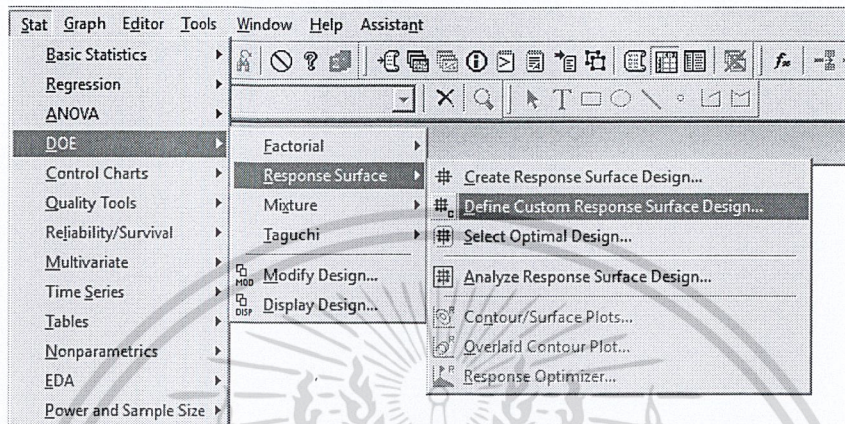


เข้ารหัส (Code, -1, 0, 1) แต่ในกรณีที่เราพบช่วงข้อมูลของปัจจัยที่มีผลต่อ Yield อยู่แล้ว ก็สามารถใช้ ค่าต่ำสุด สูงสุดของข้อมูลที่จะศึกษานั้นๆ เพื่อออกแบบการทดลองได้เลยซึ่งโปรแกรมจะกำหนดค่ากลาง (0) ให้อัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ-2 การหาสถานะที่เหมาะสมหลังจากที่ได้ทำการทดลองและทราบค่าผลตอบ (Y) แล้ว

1) เข้าเมนู Stat > DOE > Response Surface > Define Custom Response Surface Design..



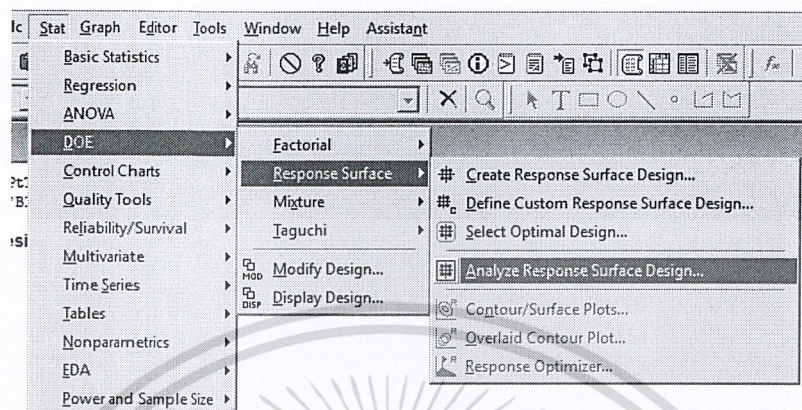
2) เลือก Factors > Low/High > เลือก Uncoded เนื่องจากเป็นค่าที่วัดได้จริงจากการทดลอง > OK แล้วจะปรากฏเป็นตาราง work sheet

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	C	M	t	%yield	StdOrder	RunOrder	Blocks	PTType
	3	9	45	81.65	1	1	1	1
	2	6	45	79.26	2	2	1	1
	3	6	30	86.74	3	3	1	1
	3	12	30	92.67	4	4	1	1
	3	9	45	90.22	5	5	1	1
	2	12	45	90.94	6	6	1	1
	3	12	60	80.84	7	7	1	1
	3	9	45	88.42	8	8	1	1
	4	12	45	81.41	9	9	1	1
	4	6	45	84.14	10	10	1	1
	4	9	60	73.76	11	11	1	1
	2	9	60	89.95	12	12	1	1
	3	6	60	87.42	13	13	1	1
	4	9	30	83.76	14	14	1	1
	2	9	30	90.74	15	15	1	1

Factor	Name	Low
A	C	2
B	M	6
C	t	30

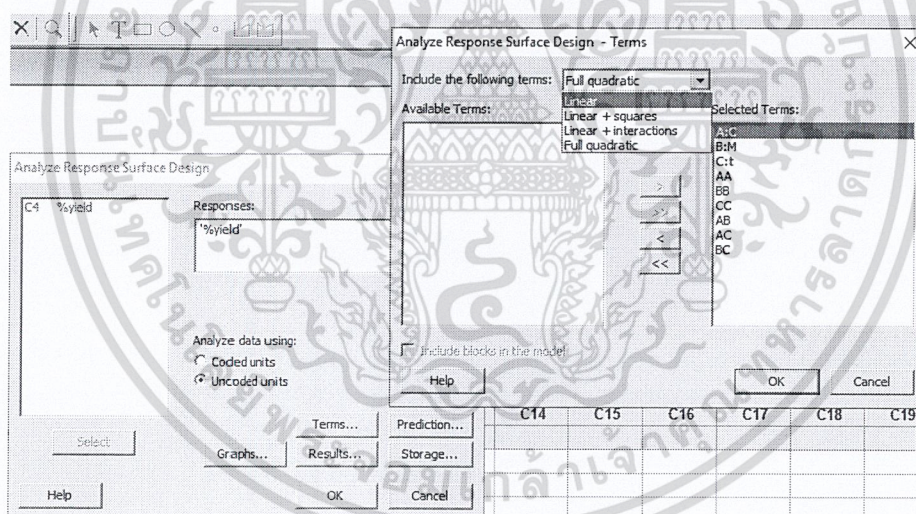
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เข้าเมนู Stat > DOE > Response Surface > Analyze Response Surface Design...



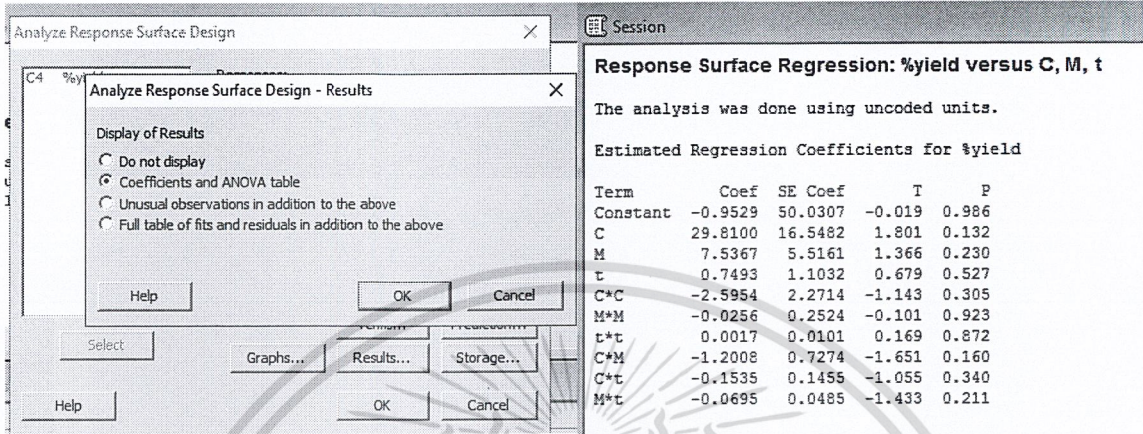
4) เลือก Response > เลือก Uncode > Terms เพื่อเลือกแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ >

OK



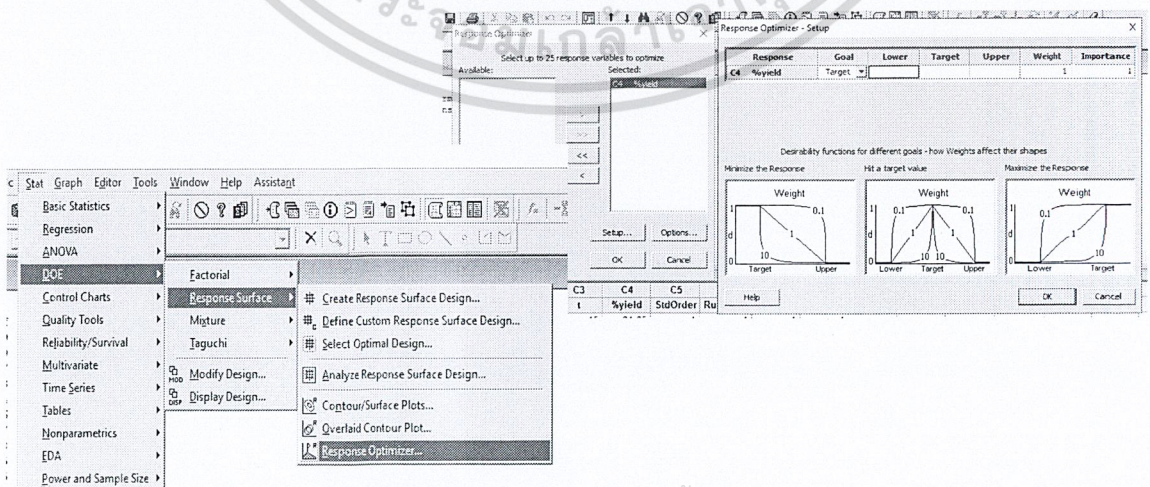
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) เลือก Results > Coefficients and ANOVA table > OK > OK แล้วจะปรากฏเป็นตารางผลการวิเคราะห์ในหน้าต่าง Session



6) เข้าเมนู Stat > DOE > Response Surface > Response Optimizer > ตั้งค่า Target Lower และ Upper ให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ > OK > OK แล้วจะปรากฏสภาวะที่เหมาะสมโดย

- ค่าเป้าหมาย (Target) คือ ค่าของตัวแปรตาม/ผลตอบที่สนใจศึกษา (Y) ที่ต้องการ
- ค่าขอบเขตบน (Upper Limit) คือค่าของตัวแปรตาม/ผลตอบที่สนใจศึกษา (Y) ที่มีค่ามากที่สุดที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา
- ค่าขอบเขตล่าง (Lower Limit) คือ ค่าของตัวแปรตาม/ผลตอบที่สนใจศึกษา (Y) ที่มีค่าน้อยที่สุดที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้