

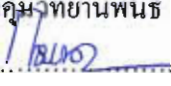
ไบโอดีเซล: การออกแบบการทดลองสำหรับการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ยุคศตวรรษที่ 21
ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

นพพร แสงอาทิตย์


วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีศึกษา
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
มกราคม 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา


คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ นพพร แสงอาทิตย์ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

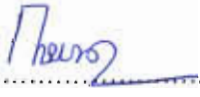
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

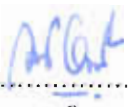

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ดร.การะเกด เทศศรี)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธาน
(ดร.ภัทรพร ตักขณศิริกุล)


..... กรรมการ
(ดร.เอกพงษ์ สุวัฒน์มาลา)


..... กรรมการ
(ดร.การะเกด เทศศรี)


..... กรรมการ
(ดร.ณรงค์ อึ้งกิมบัววน)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพา


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกรัฐ ศรีสุข)

วันที่ 14 เดือน มกราคม พ.ศ. 2559

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนการศึกษาจากโครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทาง
วิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.) สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์ (สสวท.)
กระทรวงศึกษาธิการ

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร.การะเกด เทศศรี อาจารย์ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน และเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.เอกพงษ์ สุวัฒน์มาลา ประธานหลักสูตรเคมีศึกษา ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ดร.ภัทรพร ลักษณ์ศิริกุล ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ดร. อรุณรัตน์ สันฐิติวินสกุล โปรแกรมวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไข และวิจารณ์ผลงาน ทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบ

นอกจากนี้ขอขอบคุณน้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการตัวเร่งปฏิกิริยานาโน ที่ช่วยเหลือในการทำ การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน

เนื่องจกงานวิจัยครั้งนี้ส่วนหนึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากทุนการศึกษาระดับปริญญาโทสำหรับข้าราชการครูทุน โครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.) สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์ (สสวท.) จึงขอขอบพระคุณ ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่เลี้ยง แซ่จั้ง และน้อง ๆ ทุกคนรวมทั้งภรรยาที่เฝ้าทำกำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

คุณค่า และประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูคุณเวทิตาแด่ บพจารย์ บุรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

นพพร แสงอาทิตย์

56920131: สาขาวิชา: เคมีศึกษา; วท.ม. (เคมีศึกษา)

คำสำคัญ: ไบโอดีเซล การออกแบบการทดลอง วิทยาศาสตร์ในโรงเรียน ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน
นพพร แสงอาทิตย์: ไบโอดีเซล: การออกแบบการทดลองสำหรับการเรียนรู้วิทยาศาสตร์
ยุคศตวรรษที่ 21 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

(BIODIESEL: AN EXPERIMENTAL DESIGN FOR 21ST CENTURY SCIENCE LEARNING IN
HIGH SCHOOL.)

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ : ภาวะเอก เทศศรี, Ph.D. 92 หน้า. ปี พ.ศ. 2559

ไบโอดีเซลเป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงทางเลือกที่ช่วยสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน และ
สิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้สนใจศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยา
ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม ภายใต้สภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว และตัวเร่ง
ปฏิกิริยานาโน เพื่อใช้เป็นแนวทางการออกแบบบทปฏิบัติการสำหรับนักเรียนในระดับมัธยมศึกษา
ต่อไป โดยเน้นการทดลองที่ง่าย ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาสั้น และสามารถสังเกตเห็นการ
เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน ผลลัพธ์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน พบว่ามี
การแยกชั้นของไบโอดีเซล และกลีเซอรอลอย่างชัดเจนเนื่องจากความแตกต่างของสี และ
ความหนาแน่นปริมาณ กลีเซอรอลที่เกิดขึ้นพบว่าสัมพันธ์กับปริมาณ ไบโอดีเซลที่เกิดขึ้น ปริมาณ
กลีเซอรอลที่เกิด ขึ้นสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ปริมาณไบโอดีเซลที่เกิดขึ้น สำหรับการเร่งปฏิกิริยา
เนื้อเดียว ผลการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้
โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ควรใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดย
อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60
องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ที่สภาวะนี้ได้รับร้อยละผลผลิตเท่ากับ 98 สำหรับการเร่งปฏิกิริยา
โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ 98% ที่
สภาวะที่มีการใช้ นาโนแคลเซียมออกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำมันปาล์มต่อ
เมทานอล เท่ากับ 1:6 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที กระบวนการเรียนรู้
การผลิตไบโอดีเซล ได้รับการออกแบบเป็น 2 การทดลอง โดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ
นาโนแคลเซียมออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา รายละเอียดการทดลองสนับสนุนให้นักเรียนสามารถ
คิดวิเคราะห์ ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่เกิดขึ้น และการอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้อย่างมี
เหตุและผล นอกจากนี้การปฏิบัติการทดลองจะสามารถเป็นแรงจูงใจให้นักเรียนเกิดความคุ้นเคยกับ
เทคโนโลยีพลังงานทางเลือกในแง่ต่าง ๆ มากขึ้น ซึ่งเหล่านี้ล้วนสอดคล้องกับทักษะการเรียนรู้ใน
ศตวรรษที่ 21

56920131: MAJOR: CHEMICAL EDUCATION; M.Sc. (CHEMICAL EDUCATION)

KEYWORD: BIODIESEL/ LABORATORY-EXPERIMENT DESIGN/ HIGH SCHOOL/
SCIENCE IN SCHOOL/ NANO CATALYST

NOPPORN SANGATITH: BIODIESEL: AN EXPERIMENTAL DESIGN FOR 21ST
CENTURY SCIENCE LEARNING IN HIGH SCHOOL. ADVISORY COMMITTEE:
KARAKED TEDSREE, Ph.D. 92 P. 2015.

Biodiesel is known as a sustainable alternative fuel to energy and environment. This research focuses on studying the effect of reaction parameters on the production of biodiesel from transesterification of palm oil via homogenous catalysis and nanocatalysis. The study can be used as guidelines in laboratory experiment designed for high school students. The aims of the experimental design are simple experiment, short reaction time and clearly visible. The experimental results clearly demonstrated the separation phase of biodiesel and glycerol due to the different in color and density. The relationship between the obtained glycerol was found consistency with the biodiesel yield. The amount of glycerol obtained can be used to identify the amounts of biodiesel production. For homogeneous catalysis, suitable experimental conditions for laboratory-experiment setting was 0.5% weight of NaOH catalyst, ratio of oil to methanol of 1:6, reaction temperature at 60 °C and reaction time of 10 min. At these conditions, 98 % of the biodiesel production yield was reached. For nanocatalysis using the synthesized nanocalcium oxide (nano CaO), 98 % of the biodiesel production yield was also reached with the following conditions: 1.0% weight of nano CaO catalyst, ratio of oil to methanol of 1:6, reaction temperature at 60 °C and reaction time of 30 min. The biodiesel learning process was designed into 2 comparable experiments between using NaOH and nano CaO compared with bulk CaO as catalysts for biodiesel production. The text of the experiment gives students to think critically and logically to make the relationship between evidence and explanation. In addition, this exercise will inspire students to become more familiar with the various aspects of renewable energy technologies. These are consistent with skills framework for 21st century learning.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
สารบัญ.....	ค
สารบัญตาราง.....	ง
สารบัญภาพ.....	จ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
ขอบเขตการศึกษา.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
การจัดการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21.....	4
การจัดการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ศตวรรษที่ 21.....	5
สภาวะการปัจจุบัน ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม.....	6
การผลิตไบโอดีเซล.....	7
ไขมัน และน้ำมัน.....	9
ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	11
กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเบส.....	12
การวิเคราะห์ไบโอดีเซล.....	14
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี.....	16
วัสดุนาโน.....	17
ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน.....	19
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
3 วิธีการทดลอง.....	24
แผนการดำเนินงาน.....	24

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
เครื่องมือวิเคราะห์ อุปกรณ์และสารเคมี.....	25
การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื้อเดียว.....	26
การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์.....	26
การทดสอบความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธี Hammett indicator.....	27
การวิเคราะห์ขนาด สัณฐาน และการกระจายตัวของอนุภาคนาโนแคลเซียมออกไซด์ โดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	27
การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา นาโนแคลเซียมออกไซด์.....	27
การวิเคราะห์ร้อยละเอสเทอร์ของกรดไขมัน (% FAME) โดยเทคนิค นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโทรสโกปี.....	28
การออกแบบการทดลองในชั้นเรียน.....	29
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	30
ตอนที่ 1 การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวไฮดรอกไซด์.....	30
การออกแบบชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล.....	30
การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....	31
การหาละเอียดของไบโอดีเซล โดย ¹ H NMR สเปกโทรสโกปี.....	33
การศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม.....	34
กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว.....	39
ตอนที่ 2 การผลิตไบโอดีเซลโดยตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมนาโนแคลเซียมออกไซด์.....	40
การสังเคราะห์ และการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคนาโนแคลเซียมออกไซด์.....	41
การวิเคราะห์ความเป็นเบสบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา.....	43
การศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื้อผสมนาโนแคลเซียมออกไซด์.....	44
การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม.....	46

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม..	48
กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์	53
ตอนที่ 3 การจัดทำคู่มือชุดการทดลอง และการใช้คู่มือการทดลอง.....	55
แนวคิดในการจัดทำคู่มือชุดการทดลอง และการใช้คู่มือการทดลอง.....	55
5 สรุปผลการทดลอง.....	57
สรุปผลการทดลอง.....	57
ข้อเสนอแนะ.....	58
บรรณานุกรม.....	59
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก	64
คู่มือการทดลองชุดที่ 1.....	65
คู่มือการทดลองชุดที่ 2.....	76
ภาคผนวก ข	86
ภาคผนวก ค	90
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	92

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันปาล์ม.....	11
4.1 ค่าเคมีเคิลชิฟ (chemical shift) ของไบ โอดีเซล.....	33
4.2 ผลลัพธ์การเปลี่ยนสีของแสมเมตอินดิเคเตอร์ที่ใช้ทั้ง 3 ชนิด.....	44
4.3 ร้อยละของไบ โอดีเซลที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างกัน.....	49
4.4 ความสูงของชั้นกลีเซอรอล และชั้นสบู่จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน.....	51

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 เสาหลักของการจัดการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 2.....	4
2.2 ปฏิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์.....	7
2.3 ปฏิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเอสเทอร์กับแอลกอฮอล์.....	7
2.4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	8
2.5 ปฏิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน.....	10
2.6 โครงสร้างไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันปาล์ม.....	10
2.7 กลไกการเกิดปฏิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยมีตัวเร่งปฏิริยาน้ำเดี่ยวชนิดเบส.....	13
2.8 โครงสร้างพื้นผิวของโลหะออกไซด์.....	14
2.9 ปฏิริยาสะปอนนิฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ.....	14
2.10 ^1H NMR spectrum ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน อักษร A, G และ M หมายถึงหมู่ของเมทิลีน โปรตอน ($-\text{CH}_2$), glyceridic และเมทอกซี โปรตอน ($-\text{O}-\text{CH}_3$).....	15
2.11 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวจำเพาะเมื่อวัสดุมีขนาดเล็กลง.....	18
2.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโน.....	18
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	24
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาปฏิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	30
4.2 ปฏิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันน้ำมันปาล์ม.....	31
4.3 ภาพถ่าย ก) ก่อนทำปฏิริยา ข) หลังทำปฏิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันน้ำมันปาล์ม.....	32
4.4 ^1H NMR สเปกตรัมของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์ม.....	34
4.5 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์จากปฏิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่เวลา ก) 5 นาที ข) 10 นาที ค) 20 นาที และ ง) 30 นาที สภาวะที่ทดลอง: อัตราส่วนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ใช้ตัวเร่งปฏิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ทำปฏิริยาที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส.....	35

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.6 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ ก) 0.1 ข) 0.2 ค) 0.3 ง) 0.4 จ) 0.5 ฉ) 0.6 ช) 0.7 ซ) 0.8 ฉ) 0.9 ฎ) 1.0 โดยน้ำหนักน้ำมันปาล์ม สภาวะที่ทดลอง: อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที.....	36
4.7 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์ที่ได้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ ก) 45 ข) 50 ค) 55 ง) 60 จ) 65 องศาเซลเซียส สภาวะที่ทดลอง: ร้อยละโดยน้ำหนักโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.5 อัตราส่วนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที โดย ค่าความคลาดเคลื่อนอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง ± 1 องศาเซลเซียส.....	38
4.8 (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนแคลเซียมออกไซด์ (ข) ภาพขยายรูป (ก).....	42
4.9 กราฟการกระจายตัวของขนาดของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้.....	43
4.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของแคลเซียมออกไซด์จากหินปูน.....	43
4.11 ภาพถ่าย ก) ของผสมระหว่างน้ำมันปาล์ม แคลเซียมออกไซด์ และเมทานอลก่อนให้ความร้อน ข) หลังให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	45
4.12 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ก) ใช้แคลเซียมออกไซด์จากหินปูน 1% ข) ใช้แคลเซียมออกไซด์จากหินปูน 7% ค) ใช้แคลเซียมออกไซด์นาโน 1% สภาวะที่ทดลอง: อัตราส่วนโดยเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	47
4.13 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ที่เวลา ก) 10 นาที ข) 20 นาที ค) 30 นาที และ ง) 40 นาที สภาวะที่ทดลอง: อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม เท่ากับ 6:1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส.....	48

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.14 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ ก) 0.25 ข) 0.5 ค) 1.0 ง) 2.0 จ) 3.0 และ ฉ) 4.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม สถานะที่ทดลอง: อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	50
4.15 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์ที่ได้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ ก) 50 ± 1 ข) 60 ± 1 และ ค) 65 ± 1 องศาเซลเซียส สถานะที่ทดลอง: นาโนแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ เท่ากับ 1% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม อัตราส่วนโดย โมลน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 ทำปฏิกิริยา 30 นาที.....	52
ข-1 ¹ H NMR สเปกตรัมของไบโอดีเซล: สถานะที่ทดลอง อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันปาล์ม ต่อเมทานอล 1:6 โซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	87
ข-2 ¹ H NMR สเปกตรัมของไบโอดีเซล: สถานะที่ทดลอง อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันปาล์ม ต่อเมทานอล 1:6 นาโนแคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	88
ข-3 ¹ H NMR สเปกตรัมของไบโอดีเซล: สถานะที่ทดลอง อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันปาล์ม ต่อเมทานอล 1:6 นาโนแคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย กำลังเผชิญกับปัญหาด้านพลังงาน เช่น ราคาที่สูงขึ้น การขาดแคลนในอนาคต รวมถึงผลกระทบของการใช้พลังงานที่มีต่อสิ่งแวดล้อม การสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานทางเลือกอื่น ๆ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม รวมทั้งพลังงานหมุนเวียนจากชีวมวล ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้ได้ไม่มีวันหมด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงเป็นวิธีหนึ่งในการสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นเพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการวางรากฐานความรู้เรื่องพลังงานทดแทน และการปลูกจิตสำนึกด้านสิ่งแวดล้อมแก่เยาวชนไทย รวมทั้งส่งเสริมให้การเรียนการสอนวิทยาศาสตร์ในชั้นเรียนมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงเกิดแนวคิดที่จะสร้างชุดการทดลองพื้นฐาน เรื่องไบโอดีเซล เพื่อใช้ประกอบการสอนวิชาเคมี ในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

โลกได้ก้าวเข้าสู่ศตวรรษที่ 21 ซึ่งวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วมีการค้นพบองค์ความรู้ใหม่ตลอดเวลาอย่างต่อเนื่องในลักษณะทวีคูณ ทำให้เกิดการพัฒนาด้านต่าง ๆ อย่างรวดเร็ว ดังนั้นแนวการจัดการเรียนรู้ทางวิทยาศาสตร์ จึงควรเป็นการเรียนรู้ที่เอื้อต่อการนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์มาช่วยในการตัดสินใจในเรื่องของธรรมชาติและ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์ โดยควรเน้นความเข้าใจ และตระหนักในคุณค่าที่จะนำวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมาผสมผสานเข้ากับสังคม และสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี ดังนั้นแนวคิดการพัฒนาชุดการสอนพลังงานทดแทนในหัวข้อ ไบโอดีเซล จึงมุ่งเน้นการออกแบบการทดลองที่ตอบสนองต่อกระบวนการสร้างทักษะการเรียนรู้ทางวิทยาศาสตร์ในยุคศตวรรษที่ 21

นาโนเทคโนโลยีเป็นกระแสใหม่ของการพัฒนาเทคโนโลยีในศตวรรษที่ 21 ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้าง สังเคราะห์ ควบคุม และใช้ประโยชน์จากวัสดุหรือโครงสร้างที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร นาโนเทคโนโลยีจะทำให้วัสดุมีสมบัติพิเศษที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ เป็นประจักษ์นวัตกรรมทางวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีทุกแขนง ปัจจุบันมีแนวคิดการนำนาโนเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ด้านพลังงาน และสิ่งแวดล้อมมากมาย เช่น การพัฒนาอนุภาคนาโน เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง เซลล์เชื้อเพลิง และการผลิตไบโอดีเซลคุณภาพสูง การนำแนวคิดทางด้านนาโนเทคโนโลยี เข้ามาสู่ชั้นเรียนระดับมัธยม จะช่วยให้นักเรียนเกิดการเรียนรู้เทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่เข้ามาเกี่ยวข้องในชีวิตประจำวันได้มากขึ้น งานวิจัยนี้

จึงมีแนวคิดต่อยอด เพื่อสร้างชุดการทดลอง การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และข้อดีข้อจำกัดของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้ทั่วไปในการผลิตไบโอดีเซล

โดยทั่วไปการผลิตไบโอดีเซลจะใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (transesterification) โดยการให้ความร้อนน้ำมันหรือไขมันกับแอลกอฮอล์ ภายใต้สภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว (homogeneous catalyst) และตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม (heterogeneous catalyst) ในปัจจุบันกระบวนการผลิตไบโอดีเซลยังคงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว ซึ่งวิธีการนี้ในขั้นตอนการกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยา ต้องใช้น้ำในการล้างตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากไบโอดีเซล ก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมากที่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมของแข็งมาใช้ โดยทั่วไปนิยมใช้ในรูปของโลหะออกไซด์ เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ซึ่งโลหะออกไซด์เหล่านี้มีสมบัติเป็นเบส โลหะออกไซด์ที่มีความแรงของเบสสูงจะมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาได้ดี ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมมีข้อดี คือ สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย นำกลับมาใช้ใหม่ได้ และเป็นมิตรกับระบบนิเวศวิทยา อย่างไรก็ตามปัญหาประการหนึ่งที่สำคัญของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม คือ อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดเฉพาะที่พื้นผิว ทำให้ปริมาณพื้นผิวมีผลกระทบอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นเพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงจึงต้องลดขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาดในระดับนาโนเมตร หรือเรียกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานาโน (nano catalyst) ซึ่งมีลักษณะเฉพาะ คือ มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารตั้งต้น และตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับระยะเวลาในการจัดการเรียนการสอนในระดับมัธยมศึกษา

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาหาสภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล และออกแบบชุดการทดลองการผลิตไบโอดีเซล โดยแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง การทดลองแรกเกี่ยวกับความรู้พื้นฐานการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว และการทดลองที่ 2 เป็นการนำความรู้เกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยีมาเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต และลดปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยการพัฒนาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน แคลเซียมออกไซด์

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน สำหรับการผลิตไบโอดีเซล ภายใต้สภาวะที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวและตัวเร่งปฏิกิริยานาโนเนื้อผสม รวมทั้งการออกแบบชุดการทดลอง การผลิตไบโอดีเซล และคู่มือการทดลองที่สามารถตอบสนองการเรียนรู้อุตสาหกรรมของนักเรียน ในยุคศตวรรษที่ 21

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ของน้ำมันปาล์ม โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อ กระบวนการผลิต เช่น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น
2. สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนเคลือบออกไซด์ และวิเคราะห์ขนาด รูปร่าง และการกระจายตัว โดยเทคนิคอิเล็กตรอน ไมโครสโคปี
3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ของน้ำมันปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมนาโนเคลือบออกไซด์ ศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่มีผล ต่อกระบวนการผลิต เช่น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เป็นต้น
4. วิเคราะห์ร้อยละการเกิดไบโอดีเซล โดยใช้เทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์ แมกเนติก เรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี
5. นำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาไปออกแบบชุดการทดลองผลิตไบโอดีเซล ที่เหมาะสมกับนักเรียนในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
6. จัดทำคู่มือการทดลอง สำหรับการเรียนระดับมัธยมศึกษา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำชุดการทดลองนี้ไปใช้จัดกิจกรรมอบรมให้ความรู้ หรือจัดการเรียนรู้ เรื่องการผลิตไบโอดีเซลในชั้นเรียน
2. ช่วยฝึกฝนให้ผู้เรียนได้เรียนรู้ และเพิ่มทักษะเรื่องการใช้อุปกรณ์การทดลอง และ เทคนิคการทำการทดลองต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
3. นักเรียนเกิดกระบวนการเรียนรู้ ที่นำไปสู่ การคิดวิเคราะห์ การแก้ปัญหา และ ตระหนักในคุณค่าด้านพลังงาน และสิ่งแวดล้อม
4. นักเรียนเกิดแนวคิดในการนำนาโนเทคโนโลยีไปประยุกต์ใช้ประโยชน์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การจัดการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21

การจัดการเรียนรู้ในปัจจุบัน ผู้สอนต้องเปลี่ยนแปลงจากการใช้วิธีสอนแบบบรรยาย (lecture teaching) เป็นการจัดการเรียนรู้โดยเน้นผู้เรียนเป็นสำคัญ (child-oriented learning) และเปลี่ยนวิธีการวัดผลจากการวัดผลตามจุดประสงค์เชิงพฤติกรรมที่ผู้สอนกำหนดตามเนื้อหาที่ต้องการให้ผู้เรียนเรียนรู้ (forward design) มาเป็นกำหนดสมรรถนะหรือผลการเรียนรู้ที่ผู้เรียนควรได้รับ ก่อนเขียนแผนจัดการเรียนรู้ และเขียนจุดประสงค์ให้ตรงกับสมรรถนะที่ผู้เรียนควรได้รับ

การจัดการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21 เน้นให้ทั้งผู้เรียน และผู้สอนก้าวเข้าสู่การเรียนรู้ในอนาคตไปพร้อม ๆ กัน จึงต้องปรับสิ่งแวดล้อมในการเรียนรู้ในเรื่องการออกแบบการจัดการเรียนรู้ เวลาในการเรียนรู้ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ชุมชน และนโยบายของรัฐและสถานศึกษา เพื่อให้สนับสนุนสมรรถนะของผู้สอน และผู้เรียนในโลกอนาคต (Phornphisutthimas, 2013) ภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 เสาหลักของการจัดการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21 (Phornphisutthimas, 2013)

การจัดการเรียนรู้ในปัจจุบันจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนให้สอดคล้องกับทักษะการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21 ซึ่งมีลักษณะสำคัญ 9 ประการ (Phornphisutthimas, 2013) ได้แก่

1. เป็นลักษณะการจัดการเรียนรู้ที่เน้นผู้เรียนเป็นสำคัญ (child center)
2. ใช้สื่อต่าง ๆ เป็นองค์ประกอบในการจัดการเรียนรู้ (media-driven)
3. เป็นการเรียนรู้ที่ผู้เรียนสามารถจัดการเรียนรู้ด้วยตนเองได้ (personalized)

4. เป็นการเรียนรู้ที่ผู้เรียนสามารถปรับเปลี่ยน และสังเคราะห์องค์ความรู้ใหม่จากประสบการณ์เดิมที่มีอยู่ได้ (transfer-by-design)
5. แสดงออกได้อย่างโปร่งใส (visibly relevant) โดยยึดหลักการเปลี่ยนแปลงโดยธรรมชาติ และทำให้เกิดความร่วมมือในการทำงานอย่างมีความสุข
6. ผู้เรียนได้รับความรู้ในปริมาณมาก (data-rich) จากการจัดการเรียนรู้ในหลักสูตร โดยใช้วิธีการจัดการเรียนรู้ และทรัพยากรต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม
7. มีการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับภาวะการณ์ตลอดเวลา (adaptable) จนเกิดการเรียนรู้อย่างไม่มีที่สิ้นสุด
8. มีการประสานงานและจัดการเรียนรู้ร่วมระหว่างสถานศึกษา และชุมชน
9. มีความหลากหลาย (diverse) ของกระบวนการวิธีการ เทคนิค และสื่อที่ใช้ในการจัดการเรียนรู้ร่วมระหว่างผู้สอน ผู้เรียน และชุมชน

2.2 การจัดการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ศตวรรษที่ 21

การจัดการเรียนรู้กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ในปัจจุบันเป็นการเรียนรู้ว่าวิทยาศาสตร์ทำงานอย่างไร (Toplis, 2011) ซึ่งมีองค์ประกอบที่เป็นแก่นหลักของการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ 3 ประการ ได้แก่

1. การศึกษาประวัติ และปรัชญาของวิทยาศาสตร์ เป็นการเรียนรู้ความเป็นมาของวิทยาศาสตร์ เรียนรู้วิธีการคิดของนักวิทยาศาสตร์ เพื่อให้เกิดความซาบซึ้งใจ และทำให้ผู้เรียนต้องการเรียนร่วม ไปกับนักวิทยาศาสตร์หรือเนื้อหาวิทยาศาสตร์ที่ผู้เรียนวาดภาพหรือจินตนาการไว้
2. การทดลอง และสืบค้นข้อมูลเพื่อตรวจสอบสมมติฐานที่ผู้เรียนคาดหมายไว้
3. เรียนรู้วิธีการให้เหตุผลเพื่อนำไปสู่การอภิปราย วิเคราะห์ รวมถึงการสังเคราะห์ประมวลความรู้ทางวิทยาศาสตร์เพื่อนำไปใช้งานต่าง ๆ

การเรียนรู้ของผู้เรียนในยุคปัจจุบันเป็นการถ่ายทอดความรู้จากผู้สอนไปยังผู้เรียนโดยจัดสภาพแวดล้อมของการเรียนรู้ให้เหมาะสมกับเนื้อหาในรายวิชา การเรียนรู้วิชาวิทยาศาสตร์มีลักษณะการจัดการเรียนรู้ที่เน้นผู้เรียนเป็นสำคัญ เนื่องจากในแต่ละเนื้อหาจะมีบทบาทปฏิบัติการที่สอดคล้องกับเนื้อหาที่ผู้เรียนต้องศึกษาค้นคว้า การจัดการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ในสถานศึกษาควรมีการใช้สื่อที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ตามสมรรถนะที่ผู้เรียน การเรียนรู้โดยการฝึกปฏิบัติ ช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจเนื้อหาต่าง ๆ ด้านวิทยาศาสตร์มากขึ้น บทฝึกปฏิบัติอาจเป็นการทำปฏิบัติการในห้องปฏิบัติการจริง (Phornphisutthimas, 2013) การจัดการสถานศึกษาเพื่อให้เกิดภาวะแวดล้อมที่ส่งเสริมการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ในศตวรรษที่ 21 และช่วยส่งเสริมให้ผู้เรียนเกิดทักษะ

ในการดำรงชีวิตในภาวะปัจจุบัน 7 ทักษะ (Wagner, 2008) ได้แก่

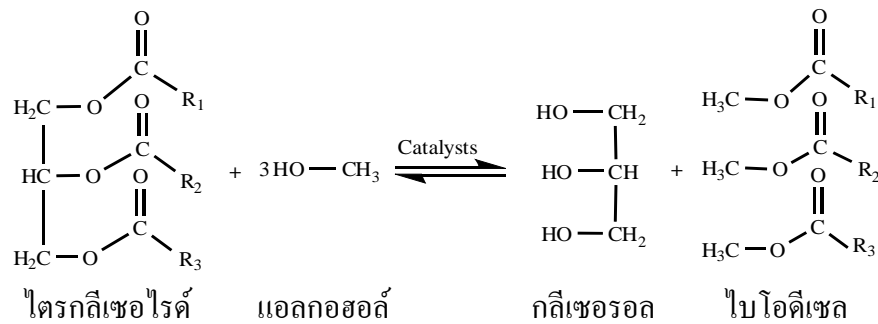
1. การคิดวิเคราะห์และการแก้ปัญหา
2. การร่วมมือกันทำงานและความเป็นผู้นำ
3. ความคล่องตัวและการปรับตัว
4. ความคิดริเริ่มและการสร้างสรรค์สิ่งใหม่
5. การสื่อสารด้วยภาษาพูดและภาษาเขียนอย่างมีประสิทธิภาพ
6. การเข้าถึงและการวิเคราะห์ข้อมูล
7. ความอยากรู้อยากเห็น และจินตนาการ

2.3 สถานะการปัจจุบัน ด้านพลังงาน และสิ่งแวดล้อม

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังเผชิญปัญหาด้านพลังงาน เนื่องจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม หากยังมีการใช้น้ำมันหรือพลังงานในอัตราที่สูง จากสถานการณ์พลังงานไทย ปี 2557 พบว่า ประเทศไทยมีการใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ขั้นต้น เท่ากับ 2,052 พันบาร์เรลน้ำมันดิบต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 1.6 เมื่อเทียบกับปีที่ผ่านมา (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2557) และมีแนวโน้มสูงขึ้นทุก ๆ ปี รวมทั้งเมื่อมีการใช้พลังงานปริมาณที่สูงขึ้น ย่อมส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จากการประมาณการ โดยองค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา (Organization for Economic Co-operation and Development ;OECD) พบว่าการปล่อยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซหลักที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกส่งผลให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อน และฝุ่นละอองขนาดเล็ก สาเหตุหลักมาจากภาคผลิตพลังงาน (Virginie, 2011) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นร้อยละ 3 ต่อปี (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) ทำให้วิกฤตการณ์ด้านสิ่งแวดล้อมของไทยจัดอยู่ในอันดับที่ 7 ของทวีปเอเชีย ส่วนใหญ่เป็นปัญหามลพิษทางอากาศ รองลงมา คือ มลพิษทางน้ำ มลพิษทางดิน มลพิษทางเสียง มลพิษจากขยะและสิ่งปฏิกูล (กระทรวงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม, 2555) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างเร่งด่วนที่ต้องมีการจัดหาพลังงานทดแทนมาใช้แทนพลังงานปิโตรเลียมที่มีราคาแพงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และกำลังจะหมดไป ไบโอดีเซลจึงเป็นพลังงานเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล และเป็นพลังงานทางเลือกใหม่เป็นพลังงานสะอาด ไม่มีกำมะถัน ลดแก๊สเรือนกระจกที่เป็นปัญหาโลกร้อน (คณะกรรมการสิทธิมนุษยชน, 2545) ไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากไขมันพืชหรือไขมันสัตว์ เหมาะกับประเทศไทยและรัฐบาลได้มีการผลักดันส่งเสริมให้มีการจัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทน โดยตั้งเป้าหมายปี 2564 ให้มีการผลิตไบโอดีเซลได้วันละ 5.97 ล้านลิตร เพื่อใช้ภายในประเทศเป็นการลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ

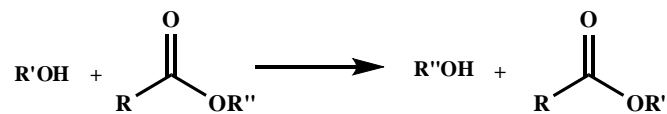
2.4 การผลิตไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (biodiesel) เป็นพลังงานเชื้อเพลิงที่ผลิตจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ซึ่งมีไตรกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบหลัก ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ มีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยไตรกลีเซอไรด์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแอลคิลเอสเทอร์ หรือไบโอดีเซล และกลีเซอรอล (Yang, Xu, Li, Ren, & Wang, 2013; Garpen, 2005) แสดงดังในภาพที่ 2-2



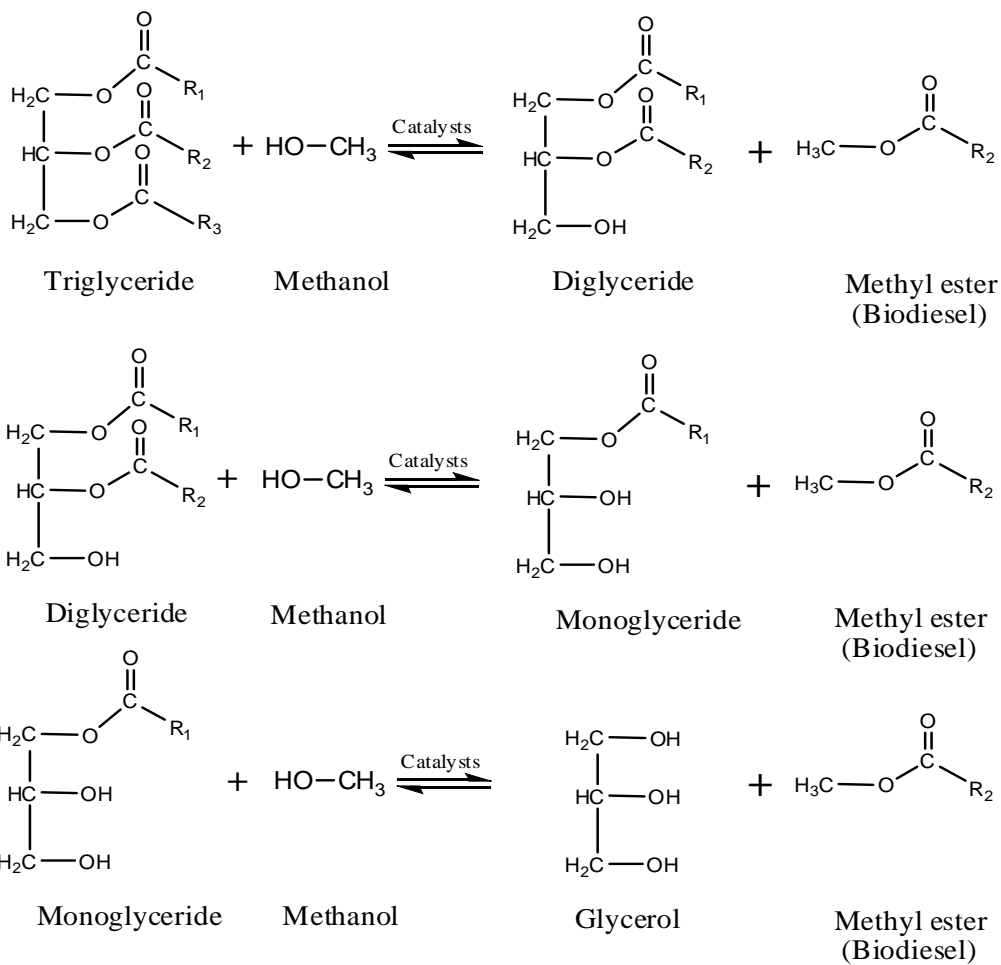
ภาพที่ 2-2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ (Yang et al., 2013)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (transesterification) เป็นปฏิกิริยาการแทนที่หมู่แอลคิลของเอสเทอร์ ด้วยแอลกอฮอล์อีกชนิดหนึ่ง ให้เอสเทอร์ชนิดใหม่ เป็นการเปลี่ยนหมู่ R" ในเอสเทอร์เดิม กับหมู่ R' ในแอลกอฮอล์เดิม โดยกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (ระวีวรรณ สิทธิ โอสธ, 2555) ดังปฏิกิริยาในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเอสเทอร์กับแอลกอฮอล์ (Yang et al., 2013)

การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ หากปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ จะมีไดกลีเซอไรด์ และ โมโนกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นอินเตอร์มีเดียตเกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Kondo & Noda, 2001)

ไบโอดีเซลสามารถนำมาใช้แทนน้ำมันดีเซลได้ (คณะกรรมการ สภาผู้แทนราษฎร, 2554) ไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบทำให้ไอเสียที่ปล่อยออกจากเครื่องยนต์ไม่ก่อให้เกิดฝนกรด สามารถลดมลพิษในอากาศ ลดปริมาณฝุ่นละอองเล็ก ๆ และมีวันดำต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซล สามารถลดวันค่าได้มากกว่าร้อยละ 40 ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงมีค่าการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล และมีความปลอดภัยในการขนส่ง และไบโอดีเซลยังมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีกว่าน้ำมันดีเซล ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ได้ดี และนอกจากนี้ยังป้องกันการน็อกของเครื่องยนต์ได้ดีกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากมีค่าซีเทนสูงกว่าน้ำมันดีเซล

2.5 ไขมัน และน้ำมัน

ไขมัน และน้ำมัน (lipid and oil) เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน และกลีเซอรอล ไขมันจะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ส่วนน้ำมันจะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ไขมัน และน้ำมันมีส่วนประกอบหลักทางเคมีที่เหมือนกัน ได้แก่ ไตรกลีเซอไรด์ และกรดไขมันอิสระ

2.5.1 กรดไขมัน

กรดไขมัน (Fatty acid) เป็นกรดอินทรีย์โซ่ตรงที่มีหมู่คาร์บอกซิล 1 หมู่ (straight chain aliphatic monocarboxylic acid) ในธรรมชาติจะพบกรดไขมันเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำมัน ไขมันที่พบในรูปของกรดไขมันอิสระมีน้อยมาก กรดไขมันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

1) **กรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acids)** มีสูตรทั่วไปเป็น $C_nH_{2n}O_2$ พันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลเป็นพันธะเดี่ยว และไม่สามารถรับไฮโดรเจนได้อีก ตัวอย่างกรดไขมันอิ่มตัว ได้แก่ กรดปาล์มมิติก เป็นต้น

2) **กรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acids)** เป็นกรดไขมันที่พันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลบางตำแหน่งเป็นพันธะคู่ทำให้สามารถเติมไฮโดรเจนเข้าไปในโมเลกุลของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวได้อีก แบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ ตามจำนวนพันธะคู่ ดังนี้

- กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่เพียง 1 พันธะ (mono unsaturated) มีสูตรทั่วไป $C_nH_{2n-2}COOH$ ตัวอย่าง เช่น กรดปาล์มมิโตเลอิก และกรด โอเลอิก เป็นต้น

- กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่มากกว่า 1 พันธะ (polyunsaturated) กรดไขมันชนิดนี้ส่วนใหญ่มีคาร์บอนอะตอมในโมเลกุล 18-22 อะตอม และมีพันธะคู่ 2-6 พันธะ ตัวอย่างกรดไขมันชนิดนี้ ได้แก่

กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ 2 พันธะ ได้แก่ กรดลิโนเลอิก (linoleic acid) มีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุล 18 อะตอม มีพันธะคู่อยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 9 และ 12 และจัดอยู่ในกลุ่มที่เรียกว่า โอเมก้า 6 พบมากในน้ำมันพืช เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วลิสง และน้ำมันงา

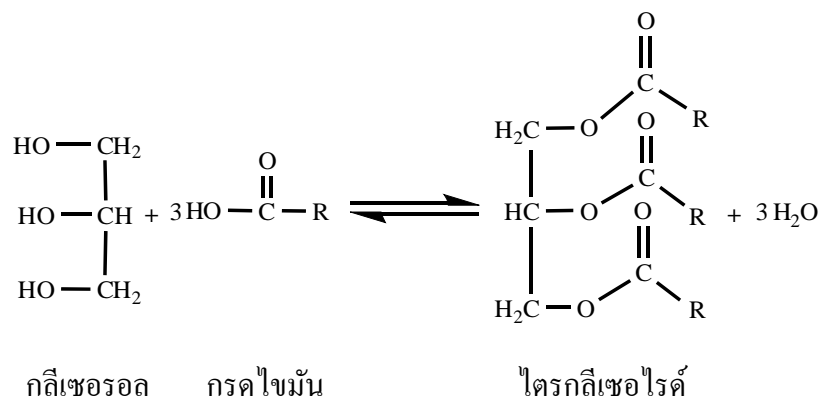
กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ 3 พันธะ ได้แก่ กรดลิโนเลนิก มีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุล 18 อะตอม มีพันธะคู่อยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 9, 12 และ 15 และจัดอยู่ในกลุ่มที่เรียกว่า โอเมก้า 3 พบมากที่สุดคือน้ำมันถั่วเหลือง จะพบน้อยในน้ำมันลินสีด

คุณสมบัติทางเคมี และกายภาพของไขมัน ขึ้นกับองค์ประกอบที่เป็นโซ่ยาวของกรดไขมัน นอกจากนี้ไตรกลีเซอไรด์ และกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในน้ำมันยังประกอบด้วย ฟอสฟาไทด์ วิตามิน และเม็คสึซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดสีในน้ำมัน (นิธิยา รัตนานพนธ์, 2553)

2.5.2 ไตรกลีเซอไรด์

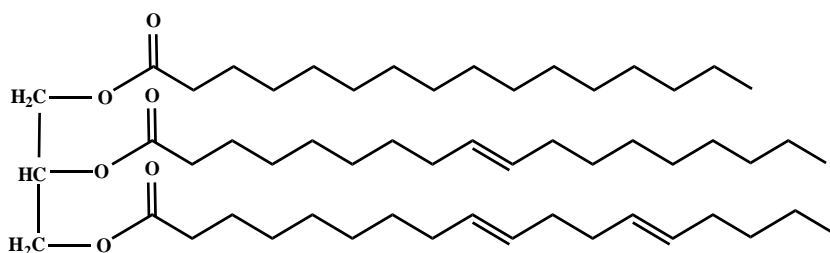
ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) เกิดจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรอล

1 โมเลกุล กับกรดไขมัน 3 โมเลกุล ดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (นิธิยา รัตนูปนนท์, 2553)

เนื่องจากโมเลกุลกลีเซอรอลมีตำแหน่งที่กรดไขมัน เข้าไปทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ได้ 3 ตำแหน่ง ทำให้ได้ไตรกลีเซอไรด์หลายชนิด ไตรกลีเซอไรด์ที่มีโมเลกุลประกอบด้วยกรดไขมัน ชนิดเดียวกันทั้ง 3 โมเลกุล เรียกว่า ไตรกลีเซอไรด์ชนิดเดียว (simple triacylglycerols) ถ้าประกอบด้วยกรดไขมันต่างชนิดกัน เรียกว่า ไตรกลีเซอไรด์ชนิดผสม (mixed triacylglycerols) ในธรรมชาติ จะพบพวกไตรกลีเซอไรด์ชนิดเดียวน้อยมาก ส่วนใหญ่พบพวกไตรกลีเซอไรด์ชนิดผสมเป็นจำนวนมาก เช่น น้ำมันปาล์ม โดยมีกรดไขมันที่สำคัญ ได้แก่ ปาล์มติก โอเลอิก และไลโนเลอิก เป็นองค์ประกอบ ดังแสดงในภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 โครงสร้างไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันปาล์ม

คุณสมบัติทางเคมี และกายภาพของไขมันหรือน้ำมันนั้น ขึ้นกับองค์ประกอบของกรดไขมัน เช่น น้ำมันปาล์ม มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันปาล์ม (Tay, Ping, & Yusof, 2009)

กรดไขมัน	จำนวนคาร์บอนและ จำนวนพันธะคู่	สูตรโมเลกุล	% wt
Caprolic acid	8 : 0	$C_7H_{15}COOH$	0.20
Capric acid	10 : 0	$C_9H_{19}COOH$	0.17
Lauric acid	12 : 0	$C_{11}H_{23}COOH$	0.46
Myristic acid	14 : 0	$C_{13}H_{27}COOH$	1.20
Palmitic acid	16 : 0	$C_{15}H_{31}COOH$	46.9
Palmioleic acid	16 : 1	$C_{15}H_{29}COOH$	0.15
Stearic acid	18 : 0	$C_{17}H_{35}COOH$	4.30
Arachidic acid	20 : 0	$C_{19}H_{39}COOH$	0.28
Oleic acid	18 : 1	$C_{17}H_{33}COOH$	36.7
Liolic acid	18 : 2	$C_{17}H_{31}COOH$	9.03
Liolenic acid	18 : 3	$C_{17}H_{29}COOH$	0.31

2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) หมายถึง สารที่เพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดพลังงานกระตุ้นหรือพลังงานก่อกัมมันต์ให้ต่ำลง แต่ไม่ทำให้พลังงานของปฏิกิริยาเปลี่ยนไป จึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น (จตุพร วิทยาคูณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, 2547)

ตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน แบ่งได้ตามวัฏภาคหรือสถานะ เมื่อเทียบวัฏภาคของตัวเร่งปฏิกิริยากับวัฏภาคของสารตั้งต้น และสารผลิตภัณฑ์ สามารถแบ่งตัวเร่งปฏิกิริยาได้เป็น 2 ประเภท คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว (homogeneous catalyst) และตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม (heterogeneous catalyst) ดังนี้

2.6.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้น ซึ่งน้ำมันที่เป็นสารตั้งต้น และตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีสถานะเป็นของเหลวทั้งคู่ ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวชนิดเบส (homogeneous base-catalyst) และตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวชนิดกรด (homogeneous acid-catalyst)

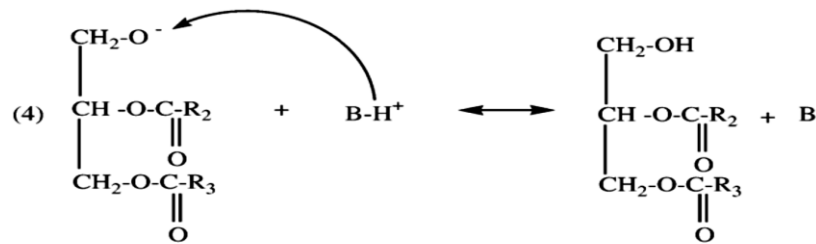
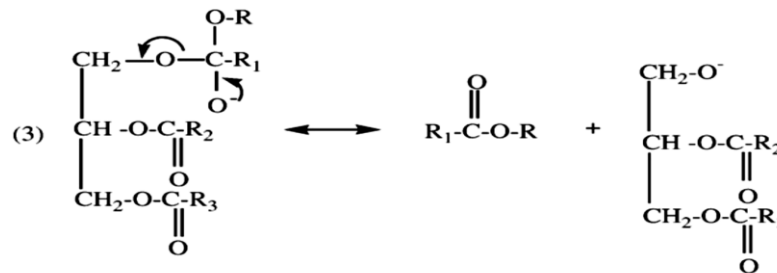
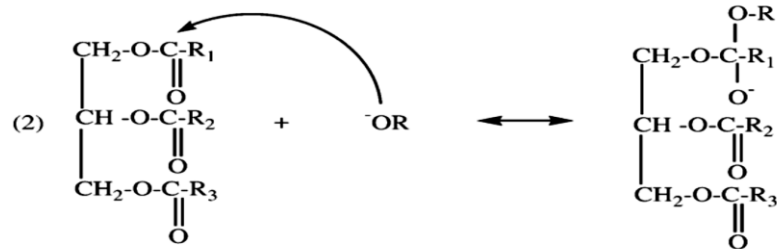
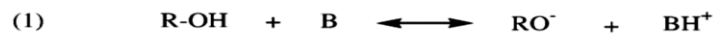
ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวชนิดกรด กรดที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะทำให้ได้ผลผลิต คือ ไบโอดีเซลในปริมาณมากแต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ามาก อาจจะใช้เวลามากกว่า 1 วันกว่าปฏิกิริยาจะเกิดอย่างสมบูรณ์ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดสามารถใช้ได้ดีกับไตรกลีเซอไรด์ที่มีส่วนประกอบของกรดไขมันอิสระและน้ำในปริมาณสูงได้ เช่น ในน้ำมันที่ใช้แล้ว เป็นต้น (Fukada, Kondo, & Noda, 2001)

ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวชนิดเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำปฏิกิริยากับเมทานอลหรือเอทานอล และน้ำมันหรือไขมัน โดยเริ่มต้นก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจะเปลี่ยนจากรูปเบส ไปเป็นในรูปของสารประกอบแอลกอฮอล์ (alkoxide) เมื่อทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์

2.6.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม มีสถานะต่างจากสารตั้งต้น โดยแตกต่างจากน้ำมันซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่มีสถานะเป็นของเหลว แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกมาได้ง่าย และสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมมีประสิทธิภาพ และความจำเพาะในการเร่งปฏิกิริยาค่ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมชนิดหนึ่งที่มีการศึกษากันมากในการผลิต ไบโอดีเซล เพราะมีราคาถูก และมีความสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี (Boey, Pragas, & Hamid, 2011; Kouzu & Hidaka, 2012) ในสถานะของการผลิตไบโอดีเซล มีการละลายในเมทานอลต่ำ ง่ายต่อการจัดการมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Ibrahim, Ahmed, Bugaje, Mohammed, & Ugwumma, 2013) และยังสามารถทำปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิต่ำ ที่ความดันบรรยากาศ (Reddy, Reddy, Oshel, & Verkade, 2006)

2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส

กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวแบบเบส ขั้นตอนแรก ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสจะเป็นตัวรับโปรตอนจากแอลกอฮอล์ได้แอลกอฮอล์ ขั้นตอนที่สองแอลกอฮอล์จะเป็นนิวคลีโอไฟล์เข้ามาจับกับหมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์ อยู่ในรูปเตตระฮีดรัลอินเทอร์มีเดียต (tetrahedral intermediate) ขั้นตอนที่สาม การแตกของเตตระฮีดรัลอินเทอร์มีเดียตจะได้เมทิลเอสเทอร์ และแอนไอออนที่อยู่ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ หลังจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้โปรตอนกับแอนไอออน และตัวเร่งปฏิกิริยาจะเริ่มเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลตัวต่อไป ร่วมกับแอลกอฮอล์จนได้เมทิลเอสเทอร์ และกลีเซอรอลอย่างสมบูรณ์ (Lam, Lee, & Mohamed, 2010) กลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 2-7



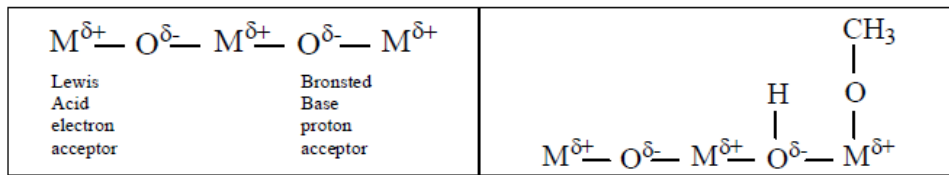
R_1, R_2, R_3 คือ สายโซ่คาร์บอนในกรดไขมัน

R_4 คือ หมู่แอลคิลในแอลกอฮอล์

B คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส

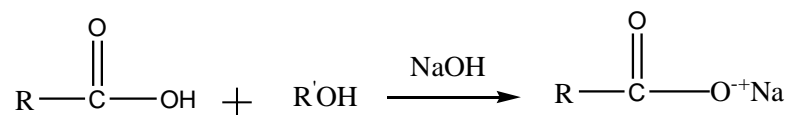
ภาพที่ 2-7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวชนิดเบส (Lam et al., 2010)

ตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลส่วนมากเป็นพวกโลหะออกไซด์ ซึ่งโครงสร้างประกอบด้วยส่วนที่เป็นบวกของโลหะไอออน ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน เรียกว่า กรดลิวอิส และส่วนที่เป็นออกซิเจนแอนไอออน ทำหน้าที่รับโปรตอน ซึ่งเรียกว่า เบสเบรอนสเตท เมื่อโลหะออกไซด์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์จะได้เมทอกไซด์ ทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอไฟล์เข้าทำปฏิกิริยาที่หมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมัน (Refaat, 2011) ดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 โครงสร้างพื้นผิวของโลหะออกไซด์ (Refaat, 2011)

ข้อจำกัดตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส คือ น้ำ และปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันดิบ ถ้ามีน้ำ และปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ในระบบของการเกิดปฏิกิริยาในปริมาณมากจะทำให้มีสบู่เกิดขึ้น แทนที่จะได้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดสบู่เรียกว่า สะaponification) ดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 ปฏิกิริยาสะaponification ของกรดไขมันอิสระ (Pohl, Streff, & Brokman, 2012)

2.8 การวิเคราะห์ไบโอดีเซล

การวิเคราะห์ และติดตามการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีหลายวิธีที่ได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของเอสเทอร์ เช่น เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography; GC) เทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (proton nuclear magnetic resonance spectroscopy; ¹H-NMR)

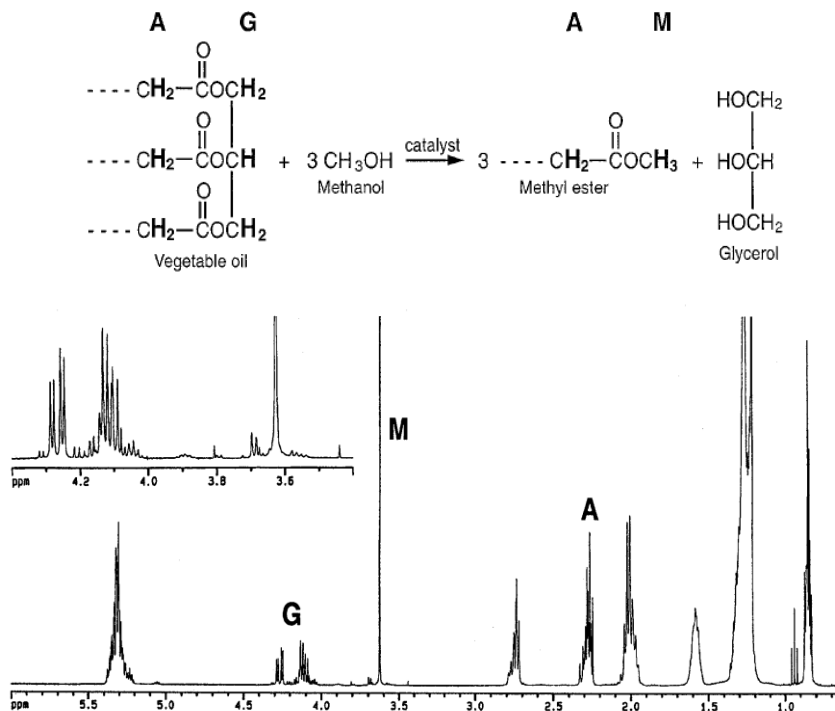
2.8.1 เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ใช้หลักการแยกสารประกอบที่ผสมกันโดยอาศัย ความแตกต่างของจุดเดือด และลักษณะโครงสร้างของสาร เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์สารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ โดยนำตัวอย่างฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวอย่างจะถูกแยกในคอลัมน์ คอลัมน์ที่ใช้เป็น คะปิลลารีคอลัมน์ซึ่งภายในบรรจุเฟสคงที่เกิดอันตรกิริยากับองค์ประกอบในตัวอย่าง การเกิดอันตรกิริยาของตัวอย่างกับเฟสคงที่จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพผิวของสาร เมื่อดีเทคเตอร์ตรวจวัดสารประกอบที่ถูกชะออกมาจากคอลัมน์ที่เวลาในการคงอยู่คอลัมน์ (retention time) ซึ่งมีช่วงเวลาที่แน่นอนสำหรับสารแต่ละชนิดแสดงข้อมูลในรูปของโครมาโทแกรม

2.8.2 เทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

(¹H NMR Spectroscopy)

การวิเคราะห์ และการติดตามการเกิดปฏิกิริยาด้วยเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี เป็นวิธีที่สะดวก และรวดเร็วในการติดตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างแอลกอฮอล์ และน้ำมัน ใช้หลักการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้พีคของสัญญาณโปรตอน que แสดงลักษณะเฉพาะของไตรกลีเซอไรด์ และสัญญาณโปรตอน que แสดงลักษณะเฉพาะของไบโอดีเซล เช่น การเปรียบเทียบค่าพื้นที่ใต้พีคของโปรตอนตรงหมู่เมทิลีน (methylene group; -CH₂-) ที่อยู่ตำแหน่งถัดจากหมู่ เอสเทอร์ของสารไตรกลีเซอไรด์ โดยมีค่าเคมีเคิลซิป เท่ากับ 2.3 ppm ลักษณะพีคเป็นตริปเปต (triplet peak) และเมทอกซีโปรตอน (methoxy group; -O-CH₃) ในสารเมทิลเอสเทอร์ที่ตำแหน่งของเคมีเคิลซิป เท่ากับ 3.7 ppm ลักษณะพีคเป็นซิงเกิลต์ (singlet peak) ดังแสดงในภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 ¹H-NMR spectrum ผลผลิตกันซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน อักษร A, G และ M หมายถึงหมู่ของเมทิลีนโปรตอน (-CH₂), glyceridic และเมทอกซีโปรตอน (-O-CH₃) ตามลำดับ (Knothe, 2000)

ร้อยละของการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็นเมทิลเอสเทอร์ สามารถคำนวณ ดังสมการที่ 2.1

$$C = 100 \times \frac{2A_{Me}}{3A_{CH_2}} \quad (2.1)$$

โดย

ค่า C คือ ค่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น

A_{Me} คือ พื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากพื้นที่ใต้พีคโปรตอนตรงหมู่เมทอกซี

A_{CH_2} คือ พื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากพื้นที่ใต้พีคโปรตอนตรงหมู่เมทิลีน

2 และ 3 คือจำนวนโปรตอนของหมู่เมทิลีน และหมู่เมทอกซีตามลำดับ

นอกจากนี้เทคนิค ^1H-NMR ยังเหมาะที่จะติดตามร้อยละผลิตภัณฑ์จากสัญญาณของ glyceridic และโปรตอนจากหมู่เมทิลเอสเทอร์ Knothe (2000) ได้ติดตามความก้าวหน้าของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ ^1H-NMR และเปรียบเทียบข้อมูลกับ fiber-optic near infrared spectroscopy ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับการอินทริเกตสัญญาณจากหมู่เมทอกซี ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถใช้ได้เฉพาะกรณีที่ใช้เมทานอลในการเกิดปฏิกิริยา สามารถคำนวณได้ตามสมการ 2.2

$$C_{ME} = 100 \times \left(\frac{5 \times I_{ME}}{5 \times I_{ME} + 9 \times I_{TAG}} \right) \quad (2.2)$$

โดย

C_{ME} คือ ร้อยละการเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล)

I_{ME} คือ ค่าที่ได้จากการอินทริเกตสัญญาณของเมทิลเอสเทอร์ (3.7 ppm)

I_{TAG} คือ ค่าที่ได้จากการอินทริเกตสัญญาณ glyceridic ของไตรกลีเซอไรด์ (4.1-4.4 ppm) ตัวเลข 5 และ 9 ได้มาจากหมู่ glyceryl ของไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งมีโปรตอนจำนวน 5 ตัว และหมู่เมทิลเอสเทอร์ 3 หมู่จาก 1 โมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ (9 โปรตอน)

2.9 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี

ปี ค.ศ. 1959 นาโนเทคโนโลยีได้ถูกจุดประกายแนวคิดโดย ศาสตราจารย์ริชาร์ด ฟิลลิปส์ ฟายด์แมน (Richard Philips Feynman) นักฟิสิกส์ชาวอเมริกัน ในการประชุมประจำปีของสมาคมฟิสิกส์อเมริกา (American Physical Society) ในหัวข้อ “There’s plenty of room at the bottom”

(ข้างล่างยังมีที่ว่างอีกเยอะ) หลังจากนั้น ในปี ค.ศ. 1981 มีการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning tunneling electron microscope) และ ในปี ค.ศ. 1986 ได้มีการตีพิมพ์หนังสือที่เกี่ยวของกับนาโนเทคโนโลยี มีชื่อว่า จักรกมลแห่งการสร้างสรรค์: (Engines of Creation: The coming era of nanotechnology) แต่งโดย อีริก เดรกเลอร์ (Eric Drexler) ทำให้นักวิทยาศาสตร์ได้เริ่มให้ความสำคัญกับการศึกษาขนาดในระดับนาโนเมตร ในที่สุดนาโนเทคโนโลยีได้กลายเป็นเทคโนโลยีที่เป็นความหวังของมนุษยชาติที่จะนำไปสู่การแก้ปัญหาต่าง ๆ ต่อไป

มูลนิธิวิทยาศาสตร์แห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (National Science Foundation, NSF) ได้ให้นิยามความหมายของนาโนเทคโนโลยี 3 มุมมองด้วยกัน คือ

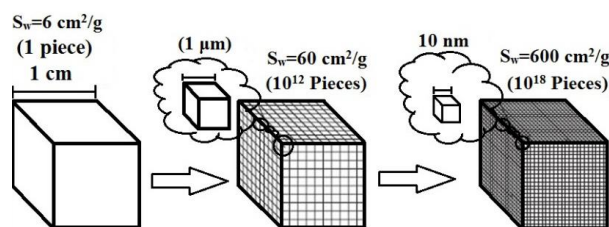
1. การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระดับอะตอม หรือโมเลกุลที่มีขนาดเล็กในช่วง 1-100 นาโนเมตร
2. การสร้างและการใช้ประโยชน์จากโครงสร้าง อุปกรณ์ หรือระบบต่าง ๆ ที่มีสมบัติและหน้าที่ใหม่ ๆ เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความเล็กในระดับนาโนของสิ่งนั้น ๆ
3. ความสามารถในการควบคุม และจัดการได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำในระดับอะตอม

2.10 วัสดุนาโน

วัสดุนาโน มีขนาดอยู่ในช่วง 1-100 นาโนเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่มีสมบัติระหว่างวัสดุ กลุ่มก้อน (bulk material) และวัสดุระดับอะตอมหรือโมเลกุล วัสดุนาโน สังกะสีขึ้นจากการออกแบบและควบคุมการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลในระดับนาโนเมตร ทำให้คุณสมบัติ และพฤติกรรมต่าง ๆ ของวัสดุที่มีขนาดเล็กเหล่านี้แตกต่างจากวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น ทองคำ มีสีเหลืองทอง มันทาว มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1336 เคลวิน และไม่มีสมบัติเชิงแม่เหล็ก เมื่อสัมผัสอากาศสีจะไม่หมองและไม่เกิดสนิม เมื่อทองคำมีขนาดอนุภาคเล็กลงในระดับนาโนเมตร สมบัติต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นกลับแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด เช่น เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กประมาณ 10 นาโนเมตร ทองคำดูดกลืนแสงสีเขียวทำให้เห็นเป็นสีแดง มีจุดหลอมเหลวลดลงอย่างมาก และเมื่อมีขนาดประมาณ 2-3 นาโนเมตร ทองคำกลับแสดงสมบัติเชิงแม่เหล็ก นอกจากนี้ยังมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีเยี่ยม การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบเนื่องจากขนาด (size effect) โดยเมื่อขนาดของอนุภาคลดลงจนกระทั่งต่ำกว่าขนาดวิกฤติ (critical size) สามารถส่งผลให้สมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเชิงแสง สมบัติ

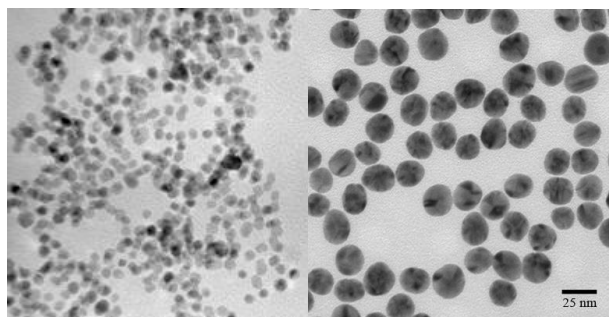
เชิงความร้อน สมบัติเชิงแม่เหล็ก และสมบัติทางเคมีแตกต่างจากสมบัติของวัสดุกลุ่มก้อน (bulk material) ซึ่งเป็นผลกระทบเชิงควอนตัมจากการจำกัดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (quantum confinement effect) และผลกระทบเชิงพื้นผิว (surface effect)

วัสดุนาโนมีพื้นที่ผิวสูงกว่าวัสดุกลุ่มก้อนที่มีมวลเท่ากันอย่างมหาศาล ปริมาณพื้นที่ผิวสามารถระบุในรูปพื้นที่ผิวทั้งหมดต่อหน่วยมวล (total surface area per unit of mass) เรียกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) อนุภาคนาโนมีพื้นที่ผิวต่อมวลสูงจึงมีปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมมาก เช่น รูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 1 cm^3 ซึ่งมีพื้นที่ผิวเท่ากับ $6 \text{ cm}^2/\text{g}$ เมื่อแบ่งออกเป็นขนาด 1 ไมโครเมตร จำนวนอนุภาคเพิ่มขึ้นเป็น 10^{12} อนุภาค และเมื่อแบ่งต่อไปจนถึงขนาด 10 นาโนเมตร มีจำนวนอนุภาคเพิ่มขึ้นเป็น 10^{18} อนุภาค และพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น $600 \text{ cm}^2/\text{g}$ ดังภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวจำเพาะเมื่อวัสดุมีขนาดเล็กลง (Aslani, 2012)

อนุภาคนาโน (nanoparticles) จัดเป็นวัสดุนาโนประเภทหนึ่งเกิดจากการรวมกันของอะตอมเป็นกลุ่ม (clusters) ปริมาณอะตอม และการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ต่างกันไป ทำให้อนุภาคนาโนมีขนาด และรูปร่างที่ต่างกันไป ตัวอย่างอนุภาคนาโนโลหะที่สำคัญได้แก่ นาโนโลหะเงิน นาโนโลหะทองคำ และตัวอย่างอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ที่สำคัญ ได้แก่ นาโนไทเทเนียมออกไซด์ นาโนซิงค์ออกไซด์ และนาโนซิลิกา



(ก)

(ข)

ภาพที่ 2-12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโน

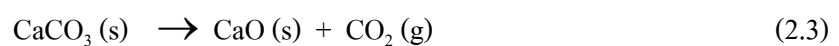
ก) โลหะแพลทินัม ข) โลหะซิลเวอร์

2.11 ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน

เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงต้องการตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็ก ในระดับนาโนเมตร หรือเรียกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานาโน ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมช่องว่างข้อดี และข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว และเนื้อผสม ด้วยลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโน คือ มีขนาดเล็ก อัตราส่วนพื้นผิวต่อปริมาตรสูง จึงช่วยเพิ่มพื้นผิวสัมผัสระหว่างสารตั้งต้น และตัวเร่งปฏิกิริยา และการกระจายตัวในรูปคอลลอยด์ในตัวกลาง ทำให้ง่ายต่อการแยกออกจากปฏิกิริยา เช่นเดียวกับตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม นอกจากนี้ประสิทธิภาพ และความจำเพาะในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยานาโนสามารถจัดการระดับอะตอม โดยการปรับแต่งสมบัติทางฟิสิกส์ และสมบัติทางเคมี เช่น ขนาด รูปร่าง องค์ประกอบ และลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Tedsree, 2013)

2.11.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์

โดยทั่ว ๆ ไปแคลเซียมออกไซด์สามารถเตรียมโดยวิธีการสลายตัวโดยใช้ความร้อน จากการเผาวัสดุใด ๆ ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นองค์ประกอบ ที่อุณหภูมิมากกว่า 825 องศาเซลเซียส และมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ตามสมการที่ 2.3



นอกจากนี้การเตรียมอนุภาคนาโนแคลเซียมออกไซด์ สามารถเตรียมโดยใช้หลักการสร้างสิ่งใหญ่ขึ้นมาจากสิ่งเล็ก ๆ ในระดับอะตอมหรือโมเลกุล หรือที่เรียกว่าวิธีล่างขึ้นบน (bottom-up approaches) เช่น การเตรียมอนุภาคนาโนโดยกระบวนการ โชล-เจล

กระบวนการ โชล-เจล (Ghiasi & Malekzadeh, 2012) เป็นการเตรียมวัสดุโดยการเปลี่ยนสถานะจากอนุภาคของแข็งขนาดเล็กแขวนลอยในของเหลวเรียกว่า “โชล” เป็นของแข็งที่เกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบเรียกว่า “เจล” สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการ โชล-เจล ได้แก่เกลือของโลหะ และสารประกอบโลหะอินทรีย์ เช่น โลหะแอลกอฮอล์ และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดหรือเบส กระบวนการ โชล-เจล ประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และปฏิกิริยาควบแน่น (condensation) ในขั้นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส หมู่แอลกอฮอล์ (OR) ของสารตั้งต้นจะถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำ และเกิดปฏิกิริยาควบแน่นของน้ำ หรือการควบแน่นของแอลกอฮอล์ ทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลเกิดเป็น โชลขึ้น การเติบโตของโชล และการชนกันเนื่องจากการเคลื่อนที่ทำให้เกิดการควบแน่น และเกิดเป็นอนุภาคนาโนใหญ่จนกระทั่งขาดความยืดหยุ่น และกลายเป็นเจล การขจัดน้ำหรือของเหลวอื่น ๆ ที่กักเก็บใน

โพรงออกจากโครงสร้างของเจล โดยการทำให้แห้งด้วยวิธีต่างกัน ทำให้ได้วัสดุนาโนที่มีโครงสร้างต่างกัน

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.12.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว

Yang, J., Xu, C., Li, B., Ren, G., and Wang, L. (2013) ได้ศึกษาออกแบบชุดการทดลองผลิตไบโอดีเซล เพื่อใช้ในการจัดการเรียนการสอนระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย เรื่อง ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยมีแนวคิดออกแบบการทดลองที่ง่าย สะดวกรวดเร็ว และ ผู้เรียนสามารถปฏิบัติได้ในเวลา 2 ชั่วโมง โดยศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันน้ำมัน ถั่วเหลือง น้ำมันงา และน้ำมัน ดอกคาโนลา ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตรร้อยละ 0.3, 0.5, 0.6, 0.8 และ 1.0 โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืช เท่ากับ 6:1 ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะเห็นการแยกชั้นของไบโอดีเซล และกลีเซอรอล สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าใช้หลักค่าความหนาแน่นของสารแต่ละชนิด ได้แก่ ไบโอดีเซล (0.85 g/cm^3) กลีเซอรอล (1.261 g/cm^3) เมทานอล (0.75 g/cm^3) น้ำมันพืช (0.919 g/cm^3) ในการพิจารณา และตรวจสอบปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค $^1\text{H-NMR}$ และยังพบว่าเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ทำให้เห็นชั้นของกลีเซอรอลมากขึ้น และเมื่อใช้น้ำมันต่างชนิดกันก็ให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน จากผลการทดลองจึงนำไปออกแบบการทดลองที่เน้นผู้เรียนเป็นศูนย์กลาง (Student-Centered Learning) เหมาะสมต่อการจัดการเรียนการสอนในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

Behnia, M. S., Emerson, D. W., Steinberg, S. M., Alwis, R. M., Duenas, J. A., and Serafino, J. O. (2011) ได้ศึกษาออกแบบการผลิตไบโอดีเซลที่ง่าย ปลอดภัย และเหมาะสม ในการจัดการเรียนการสอนเคมีอินทรีย์ และสามารถทำการทดลองได้ภายในเวลา 3 ชั่วโมง โดยศึกษาจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ไขมันถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลือง อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน เท่ากับ 6:1 มีโพแทสเซียมคาร์บอเนตปราศจากน้ำ (K_2CO_3) ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที ทำให้เป็นกลางโดยการค่อย ๆ เติมน้ำส้มสายชูลงไป นำไบโอดีเซลออกมาตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี - แมสสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (GC-MS) อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (IR) และทินเลเยอร์โครมาโทกราฟี (TLC) พบว่า เมื่อใช้น้ำมันถั่วลิสงได้ร้อยละของไบโอดีเซล เท่ากับ 90.7 และ 93.2 เมื่อใช้น้ำมันถั่วเหลือง

จากรายงานการจะเห็นได้ว่าสามารถนำการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้
เดี่ยว มาใช้ในการจัดการเรียนการสอน โดยปฏิกิริยาเกิดได้ในช่วงสั้นๆ ไม่เกิน 25 นาที ใช้อุณหภูมิ
ในช่วง 60-65 เซลเซียส และสามารถใช้ได้กับน้ำมันหลากหลาย

2.12.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้

Viriya-empikul, N., Krasae, P., Puttasawat, B., Yoosuk, B., Chollacoop, N., and Faungnawakij, K. (2009). ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ และเปลือกหอย โดยเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในเวลา 2-4 ชั่วโมง และได้นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้มาผลิตไบโอดีเซลในสภาวะที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลมากกว่า 90

Liu, X., He, H., Wang, Y., Zhu, S., and Piao, X. (2008) ศึกษาปฏิกิริยา
ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองเพื่อผลิตไบโอดีเซลโดยการใช้แคลเซียมออกไซด์เป็น
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสชนิดแข็ง ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ คือ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน
อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา และปริมาณน้ำในเมทานอล ผลการ
ศึกษาพบว่าในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ที่
อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 12:1 ได้ร้อยละ
ผลได้ของไบโอดีเซล เท่ากับ 95 และตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จะยังคงมีความว่องไวคงเดิมแม้ว่าจะมี
การใช้ซ้ำ 20 ครั้ง โดยไม่ส่งผลมากนักต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล

Kouzu, M., Kasuno, T., Tajika, M., Sugimoto, Y., Yamanaka, S., and Hidaka, J. (2008). สังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ผสมของแข็งแบบเบส ได้แก่
แคลเซียมออกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) สำหรับ
ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลือง การศึกษาในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า
แคลเซียมออกไซด์สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ร้อยละผลได้ เท่ากับ 93 แคลเซียม ไฮดรอกไซด์
ร้อยละ 12 และแคลเซียมคาร์บอเนต เท่ากับ 0 ภายใต้สภาวะเดียวกัน เมื่อนำแคลเซียมออกไซด์ ไป
ใช้กับน้ำมันพืชใช้แล้ว พบว่าสามารถผลิตไบโอดีเซลได้ร้อยละ 99 ในเวลา 2 ชั่วโมง แต่พบว่า
บางส่วนของแคลเซียมออกไซด์จะฟอร์มตัวเป็นสบู่แคลเซียม เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระ
ในน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

Ngamcharussrivichai, C., Totarat, P., and Bunyakiat, K. (2008) ใช้แคลเซียมออกไซด์ผสมกับซิงค์ออกไซด์ เร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง เท่ากับ 30:1 ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์มากกว่าร้อยละ 94

Meher, L. C., Kulkarni, M. G., Dalai, A. K., and Naik, S. N. (2006) ได้ศึกษาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน น้ำมันคาร์นิจา (karanja) ด้วยเมทานอลโดยใช้แคลเซียมออกไซด์ ผสมโลหะทั้งหมด 3 ชนิด คือ ลิเทียม (Li) โลหะโซเดียม (Na) และ โพแทสเซียม (K) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำมันคาร์นิจาที่ใช้มีปริมาณกรดไขมันอิสระ เท่ากับ 0.48-5.75% โดยจะศึกษาสภาวะต่าง ๆ เช่น ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา เวลา และอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมัน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ Li/CaO ความเข้มข้นร้อยละ 2 จะได้ไบโอดีเซลร้อยละ 94.9 ใช้เวลา 8 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ส่วนที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 12:1 ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์จะลดลงจากร้อยละ 94.9 เป็น 90.3 เมื่อกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.48 เป็น 5.75 ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา Na/CaO และ K/CaO ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมเหมือนกัน ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ตัวนี้ปฏิกิริยาจะเกิดช้ามาก แต่อย่างไรก็ตามร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่ได้มีค่าความเป็นกรด เท่ากับ 0.36 mg-KOH/g และได้ร้อยละผลได้เท่ากับ 98.6% ซึ่งค่าความเป็นกรดอยู่ในเกณฑ์ของน้ำมันไบโอดีเซลในแถบยุโรป

จากรายงานข้างต้นจะเห็นได้ว่า การผลิตไบโอดีเซลให้ได้มากกว่าร้อยละ 90 ต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 1 ชั่วโมงเป็นต้นไป บางรายงานใช้เวลามากถึง 8 ชั่วโมง และใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสูงถึงร้อยละ 8-10 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืช ใช้อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันพืชต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 และ 1:12 ส่วนใหญ่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิช่วง 60-65 องศาเซลเซียส เนื่องจากต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานาน ทำให้ยังไม่มีรายงานการนำตัวเร่งปฏิกิริยานี้มาจัดการเรียนการสอนไบโอดีเซลในระดับมัธยม

2.12.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน

Isahak, W., Ismail, M., Jahim, J. M., Salimon, J., and Yarmo, M.A. (2010) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืช โดยการเปรียบเทียบชนิดตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์ ที่ชื่อมาจากบริษัท ซิกม่า ออลดริช กับแคลเซียมออกไซด์ทั่วไป เปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และศึกษาปัจจัยอื่นด้วย ได้แก่ อัตราส่วนจำนวน โมลน้ำมันพืชต่อเมทานอล ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาของการทำปฏิกิริยา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล คือ อัตราส่วน จำนวนโมลของน้ำมันพืช

ต่อเมทานอล เท่ากับ 1:15 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2.5 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง ได้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล เท่ากับ 94 และ 90 ของตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์ กับแคลเซียมออกไซด์ทั่วไป ตามลำดับ

Reddy, C., Reddy, V., Oshel, R., and Verkade, J. G. (2006) ทดลองทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์ ขนาด 20 นาโนเมตร ที่ซื้อจากบริษัท NanoScale Materials จำกัด พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลให้ได้ไบโอดีเซลร้อยละ 99 คือ ใช้อัตราส่วนน้ำมันต่อเมทานอล เท่ากับ 1:27 ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.25 กรัม ในน้ำมัน 22 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Lianyuan, W. and Jichu, Y. (2006) ได้ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้นาโนแมกนีเซียมออกไซด์ (nano MgO) ในเมทานอลที่มีสถานะเหนือจุดวิกฤต โดยร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้นาโนแมกนีเซียมออกไซด์ 0.5-3 ร้อยละโดยมวล การเพิ่มอุณหภูมิมีผลให้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มมากขึ้น โดยอุณหภูมิต้องสูงถึง 533 เคลวิน และปฏิกิริยาจะเสร็จสมบูรณ์ที่ 10 นาที โดยใช้นาโนแมกนีเซียมออกไซด์ ร้อยละ 3 โดยมวล และอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง 36:1

ปัจจุบันมีรายงานการนำนาโนแคลเซียมออกไซด์มาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลไม่มากนักแต่จากรายงานข้างต้นเห็นได้ว่านาโนแคลเซียมออกไซด์สามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสำหรับการผลิตไบโอดีเซลได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ โดยสามารถผลิตไบโอดีเซลได้มากกว่าร้อยละ 90 โดยใช้เวลาที่สั้นกว่า และใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่า นอกจากนี้ สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับขนาด และโครงสร้างพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 แผนการดำเนินงาน

ชุดการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่ผู้วิจัยทำการออกแบบขึ้นเพื่อเป็นชุดการทดลอง และคู่มือชุดการทดลองที่สามารถนำไปใช้ในการจัดการเรียนการสอนนักเรียนในระดับมัธยมศึกษา ในการศึกษาค้นคว้าได้แบ่งดำเนินงานออกเป็น 3 ตอน ดังนี้

1. การศึกษาปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว และตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ออกแบบชุดการทดลอง

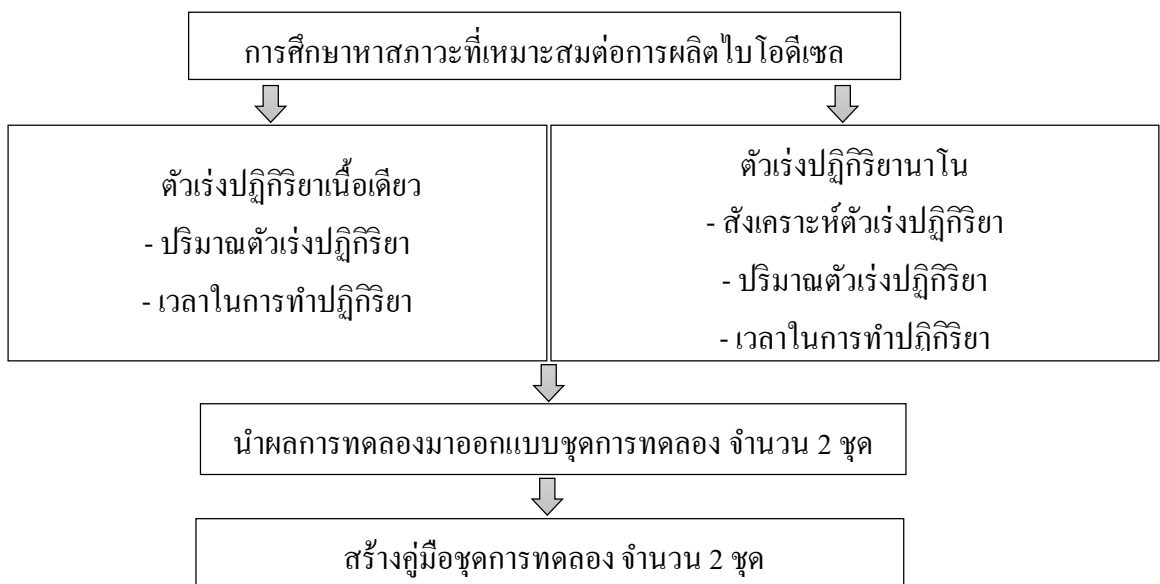
2. การออกแบบชุดการทดลอง แบ่งเป็น 2 ชุดการทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 1 เรื่องการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน:
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว

การทดลองที่ 2 เรื่องการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน:
ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน

3. การสร้างคู่มือการทดลอง (student handout)

แผนการดำเนินงานสามารถสรุปดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 แผนการดำเนินงาน

3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ อุปกรณ์และสารเคมี

3.2.1 เครื่องมือวิเคราะห์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน: Transmission electron microscope (TEM) ยี่ห้อ Phillips รุ่น TECNAI 20, Holloland
2. เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ รุ่น FTNMR บริษัท BRUKER 400 MHz

3.2.2. อุปกรณ์

1. ตู้อบลมร้อน (oven SL Shellab)
2. เตาเผาความร้อนสูง (carbolite, Science Promotion)
3. เตาแม่เหล็กความร้อน (magnetic stirrer hot plate) และเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Thermosatted, Hero Lab Equipment, Heto DT Hetotherm)
4. ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pumps, Millipore รุ่น wp 6222050)
5. เครื่องชั่งสาร (balance) ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
6. อ่างอัลตราโซนิค (ultrasonic cleaner manufacture expert)
7. กระดาษกรอง Whatman NO.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 mm.
8. เทอร์โมมิเตอร์ช่วงอุณหภูมิ 0-250±1 องศาเซลเซียส

3.2.3 สารเคมี

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์: sodium hydroxide (NaOH) Mw. 40.00 g mol⁻¹
2. เอทิลีน ไกลคอล: ethylene glycol (C₂H₆O₂) Cario Erba, Mw. 62.07 g mol⁻¹
3. เมทานอล: methanol (CH₄O) Mw. 32.04 g mol⁻¹, analytical grade
4. แคลเซียมไนเตรท เตตระไฮเดรต: calcium nitrate tetrahydrate (Ca(NO₃)₂•4H₂O Mw. 236.15 g mol⁻¹
5. โพลีไวนิลไพร์โรลิโดน: polyvinylpyrrolidone (C₆H₉NO)_x Mw. 112.8 g mol⁻¹
6. ฟีนอล์ฟทาลีน: phenolphthalein (C₂₀H₁₄O₄) Mw.318 g mol⁻¹)
7. พารา-ไนโตรอะนิลีน: p-nitroaniline (C₆H₆N₂O₂) Mw.138.13 g mol⁻¹
8. น้ำมันปาล์ม : Palm Oil (C₅₅H₉₈O₆) Mw. 856 g mol⁻¹ ยี่ห้อ ไซโย

3.3 การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื้อเดียว

ศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยควบคุมอัตราส่วนจำนวนโมลน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล (1:6) ปริมาณน้ำมันปาล์มที่ใช้ เท่ากับ 15 มิลลิลิตร และแปรเปลี่ยนปัจจัยอื่น ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา: ศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา โดยแปรเปลี่ยนปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อปริมาณน้ำมันเท่ากับร้อยละ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม
- 2) เวลาทำปฏิกิริยา: ศึกษาผลของเวลาที่ทำปฏิกิริยา 5, 10, 20 และ 30 นาที
- 3) อุณหภูมิ: ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา 45, 50, 55, 60 และ 65 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล มีดังนี้

1. ตวงน้ำมันปาล์ม 15.0 มิลลิลิตร ใส่ลงขวดสามคอขนาด 25 มิลลิลิตร
2. ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณตามที่ต้องการศึกษา ใส่ในบีกเกอร์ที่มีเมทานอล 4.0 มิลลิลิตร คนด้วยแท่งแก้วจนกระทั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลาย
3. เทสารละลายผสมที่เตรียมได้ในข้อ 2 ลงในขวดสามคอที่มีน้ำมัน นำไปรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิที่ต้องการศึกษา ปั่นกวนที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที ตามเวลาที่ต้องการศึกษา
4. เทสารผสมที่ได้จากการทำปฏิกิริยาลงในหลอดทดลอง ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที สังเกตการแยกชั้นของไบโอดีเซลกับกลีเซอรอล
5. นำไบโอดีเซลที่ได้ไปวิเคราะห์หาร้อยละผลการเปลี่ยนไปของไตรกลีเซอไรด์ ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ spectroscopy

3.4 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์

ตวงเอทิลีนไกลคอล 100.0 มิลลิลิตร ใส่ขวด 3 คอขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปรีฟลักซ์ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เติมแคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรท 48.00 กรัม ที่ผสมกับโพลีไวนิลไพร์โรลิโดน (PVP) 6.5 กรัม ปั่นกวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน ค่อย ๆ หยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 4.30 โมลาร์ ปริมาตร 48.0 มิลลิลิตร ด้วยอัตราเร็วประมาณ 3 มิลลิลิตร/นาที ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 10 นาที หยุดปั่นกวน และปล่อยให้ยู่หนึ่งที่อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 5 นาที สารละลายจะเริ่มเป็นเจลเกิดขึ้น กรองขณะร้อน ล้าง

ตะกอนด้วยน้ำ อบตะกอนที่ได้ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำของแข็งที่ได้มา บดให้ละเอียด แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.5 การทดสอบความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธี Hammett indicator

ชั่งตัวอย่างแคลเซียมออกไซด์ 2.5 มิลลิกรัม ใส่ในหลอดทดลอง เดิมเมทานอล ปริมาตร 4.0 มิลลิลิตร และหยดสารละลายอินดิเคเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ฟีนอล์ฟทาเลอิน และ p-nitroaniline ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร ลงในหลอด คนสารละลายให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของตัวเร่งปฏิกิริยา

3.6 การวิเคราะห์ขนาด มาตรฐาน และการกระจายตัวของอนุภาคนาโนแคลเซียมออกไซด์ โดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ทำโดยการนำตัวอย่างอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ ได้ มาทำให้กระจายตัวในรูปของคอลลอยด์ในน้ำ โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกประมาณ 15 นาที จากนั้นหยดสารแขวนลอยของตัวอย่างที่ได้ลงบน carbon film coated copper grid ทิ้งให้แห้งที่ อุณหภูมิห้องก่อนนำไปวิเคราะห์

3.7 การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน แคลเซียมออกไซด์

ศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยควบคุมอัตราส่วนโดยโมลน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 ปริมาณน้ำมันที่ใช้เท่ากับ 15 มิลลิลิตร และแปรเปลี่ยนปัจจัยอื่น ๆ ดังต่อไปนี้

1) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา: ศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการ เร่งปฏิกิริยาโดยแปรเปลี่ยนปริมาณนาโนแคลเซียมออกไซด์ต่อปริมาณน้ำมันปาล์ม เท่ากับ ร้อยละ 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 และ 4.0 ตามลำดับ

2) เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา: ศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ 10, 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ

3) อุณหภูมิ: ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา 50, 60 และ 65 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล มีดังนี้

1. ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์น้ำหนักตามที่ต้องการศึกษา ใสลงในขวดสามคอ ขนาด 25 มิลลิลิตร
2. เติมนีทานอล 4.0 มิลลิลิตร และน้ำมันปาล์ม 15.0 มิลลิลิตร นำไปรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิตามที่ต้องการศึกษา ปั่นกวนที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที ตามเวลาที่ต้องการศึกษา
3. เทสารผสมที่ได้จากการทำปฏิกิริยาลงในหลอดทดลอง ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที สังเกตการแยกชั้นของไบโอดีเซลกับกลีเซอรอล
4. นำไบโอดีเซลที่ได้ไปวิเคราะห์หาร้อยละผลการเปลี่ยนไปของไตรกลีเซอไรด์ ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$

3.8 การวิเคราะห์ร้อยละเอสเทอร์ของกรดไขมัน (% FAME) โดยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโทรสโกปี

วิเคราะห์ปริมาณการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันปาล์มเป็นไบโอดีเซล โดยใช้เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ โดยการวัดสัญญาณ $^1\text{H-NMR}$ การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ทำโดยชั่งไบโอดีเซล 0.03 กรัม ลงในหลอด NMR ละลายในตัวทำละลาย **ดีวเทอเรียม คลอโรฟอร์ม** (deuterated chloroform, CDCl_3) ความสูงประมาณ 5 เซนติเมตร

ร้อยละของการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็นเมทิลเอสเทอร์ สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของโปรตอนตรงหมู่เมทิลีน (2.3 ppm) และหมู่เมทอกซี (3.7 ppm) ดังสมการที่ 2.1 ตามวิธีของ Gelbard et al. (1995)

3.9 การออกแบบการทดลองในชั้นเรียน

3.9.1 เครื่องมือการทดลอง (แสดงในบทที่ 4)

3.9.2 คู่มือการทดลอง

1. คู่มือการทดลองชุดที่ 1 เรื่องการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน: ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้
 - 1) ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน กลไกการเกิดปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว
 - 2) คำถามก่อนการทดลอง
 - 3) อุปกรณ์ และสารเคมี

4) ขั้นตอนการทดลอง

5) อันตรายจากสารเคมี

2. คู่มือการทดลองชุดที่ 2 เรื่องการผลิตไบโอดีเซล

จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน: ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1) ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับอนุภาคนาโน และตัวเร่งปฏิกิริยานาโน หลักการสร้าง
วัสดุนาโน สมบัติทั่วไปของแคลเซียมออกไซด์ และนาโนแคลเซียมออกไซด์ ข้อดีข้อเสียเกี่ยวกับ
ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม และตัวเร่งปฏิกิริยานาโน

2) คำถามก่อนการทดลอง

3) อุปกรณ์ และสารเคมี

4) ขั้นตอนการทดลอง

5) อันตรายจากสารเคมี

บทที่ 4

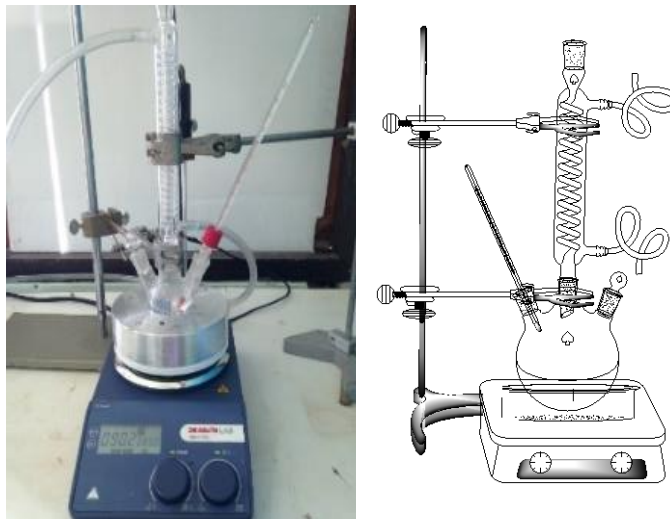
ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ทำการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เพื่อหาสภาวะและวิธีการที่เหมาะสมเพื่อนำไปออกแบบ และสร้างชุดการทดลอง พร้อมทั้งจัดทำคู่มือการทดลอง สำหรับนักเรียนในระดับมัธยมศึกษา ในการศึกษาครั้งนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ตอน คือ ตอนที่ 1 การผลิตไบโอดีเซล โดยโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว ตอนที่ 2 การผลิตไบโอดีเซล โดยโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม และตอนที่ 3 การออกแบบการทดลองและการสร้างคู่มือการทดลอง

ตอนที่ 1 การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวโซเดียมไฮดรอกไซด์

4.1 การออกแบบชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

การออกแบบชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เพื่อเป็นต้นแบบในการออกแบบการเรียนรู้ แสดงดังภาพที่ 4-1



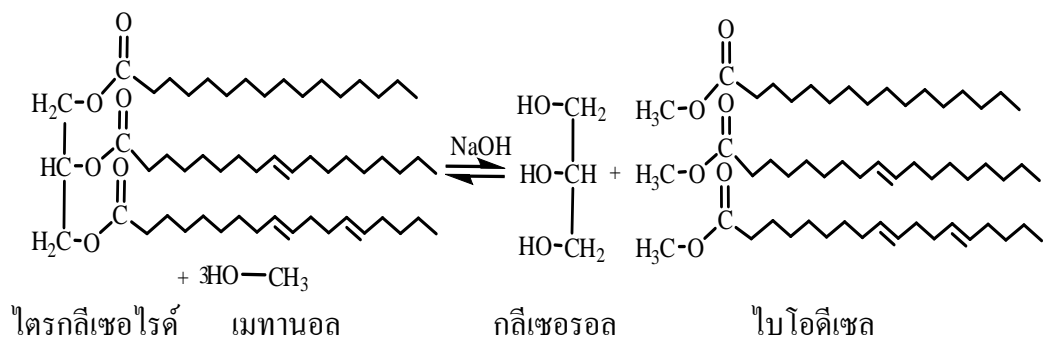
ภาพที่ 4-1 อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

จากภาพที่ 4-1 จะเห็นว่าอุปกรณ์ที่ออกแบบเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เป็นชุดรีฟลักซ์ขนาดเล็ก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณการใช้สารเคมี

และเพื่อความปลอดภัยในชั้นเรียน เนื่องจากการทดลองนี้มีการใช้เมทานอลซึ่งเป็นสารระเหยง่าย และมีจุดเดือดต่ำ ซูตริฟลักซ์ ประกอบด้วยขวดสามคอขนาด 25 มิลลิลิตร คอตรงกลางสำหรับต่อกับคอนเดนเซอร์แบบเกลียวเพื่อความแน่นเมทานอลส่วนที่ระเหยให้ความแน่นตกลงมาในขวดปฏิกิริยา และคอขวดด้านข้างทั้งสองสำหรับต่อกับเทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิในขวดปฏิกิริยา และสำหรับเติมสารลงในขวดปฏิกิริยา อุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนใช้แผ่นแม่เหล็กให้ความร้อนแก่แม่เหล็กสำหรับคนสาร และใช้หลุมให้ความร้อน แทนการใช้อ่างน้ำมัน เพื่อลดอันตรายที่อาจเกิดเนื่องจากการใช้น้ำมันที่ร้อน อย่างไรก็ตามข้อควรระวัง คือ อย่าสัมผัสกับบริเวณแผ่นให้ความร้อน

4.2 การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การทดลองนี้เลือกใช้น้ำมันปาล์มโอเลอิน ซึ่งสามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด เมื่อนำมาผสมกับเมทานอล ภายใต้สภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ และมีการให้ความร้อน ไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมัน จะเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์ หรือไบโอดีเซล และกลีเซอรอล ดังภาพที่ 4-2

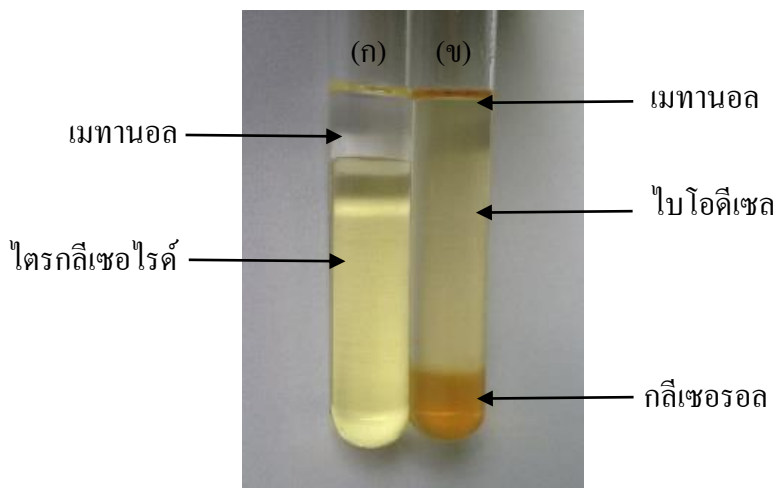


ภาพที่ 4-2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันน้ำมันปาล์ม

การทดลองนี้เลือกใช้แอลกอฮอล์ ชนิดเมทานอล แม้ว่าเมทานอลเป็นสารที่ก่อให้เกิดอันตรายมากกว่าเอทานอล โดยเฉพาะเมื่อสัมผัสกับดวงตา เนื่องจากเมทานอลมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำกว่า ใช้อุณหภูมิต่ำ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาสั้นกว่าเอทานอล ดังเช่นรายงานของ Hong, Park, Kim, & Lee, (2014) ซึ่งได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เมทานอล และเอทานอล โดยมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้ เมทานอล ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ได้ร้อยละของ

ไบโอดีเซล เท่ากับ 96.4 ส่วนสภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้เอทานอล ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 80 นาที ได้ร้อยละของไบโอดีเซล เท่ากับ 94.0 เมื่อพิจารณาข้อมูลจากรายงานแล้ว ควรจะเลือกใช้อีทานอลในการทำปฏิกิริยาเพราะมีความปลอดภัยมากกว่า แต่ไม่สามารถเลือกใช้อีทานอลได้ เนื่องจากข้อจำกัดของระยะเวลาในการจัดการเรียนการสอนมีระยะเวลาเพียง 120 นาที ถ้าใช้อีทานอลจะทำให้เสียเวลาถึง 80 นาที ทำให้ไม่สามารถจัดการเรียนการสอนได้ภายในระยะเวลา 2 ชั่วโมงได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้อีทานอลแทนเอทานอล แต่อย่างไรก็ตามชุดทดลองที่ออกแบบมาเป็นชุดรีฟลักซ์ ที่ต่อเข้ากับคอนเดนเซอร์แบบเกลียว เพื่อป้องกันไอระเหยของเมทานอลได้

จากภาพที่ 4-2 ตามอัตราส่วนปริมาณสัมพันธ์ไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล ทำปฏิกิริยาพอดีกับเมทานอล 3 โมล ได้เมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) 3 โมล และกลีเซอรอล 1 โมล อย่างไรก็ตามเนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ การเติมเมทานอลในปริมาณมากเกินไปจะช่วยผลักดันให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้าได้มากขึ้น การศึกษารายงานการค้นคว้าต่าง ๆ (Leung & Guo, 2006) พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม และไม่ใช่ปริมาณเมทานอลมากเกินไป การทดลองนี้จึงกำหนดให้ใช้ที่อัตราส่วนดังกล่าว และศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จากการทดลอง ๆ ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ผลลัพธ์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 5 นาที จะเริ่มเห็นการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรอล และไบโอดีเซล การแยกชั้นจะสมบูรณ์ภายใน 15 นาที โดยชั้นล่างเป็นชั้นของกลีเซอรอลมีสีเหลืองส้ม และชั้นบนจะเป็นชั้นของไบโอดีเซล มีสีเหลืองใส ดังภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 ภาพถ่าย ก) ก่อนทำปฏิกิริยา ข) หลังทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันน้ำมันปาล์ม

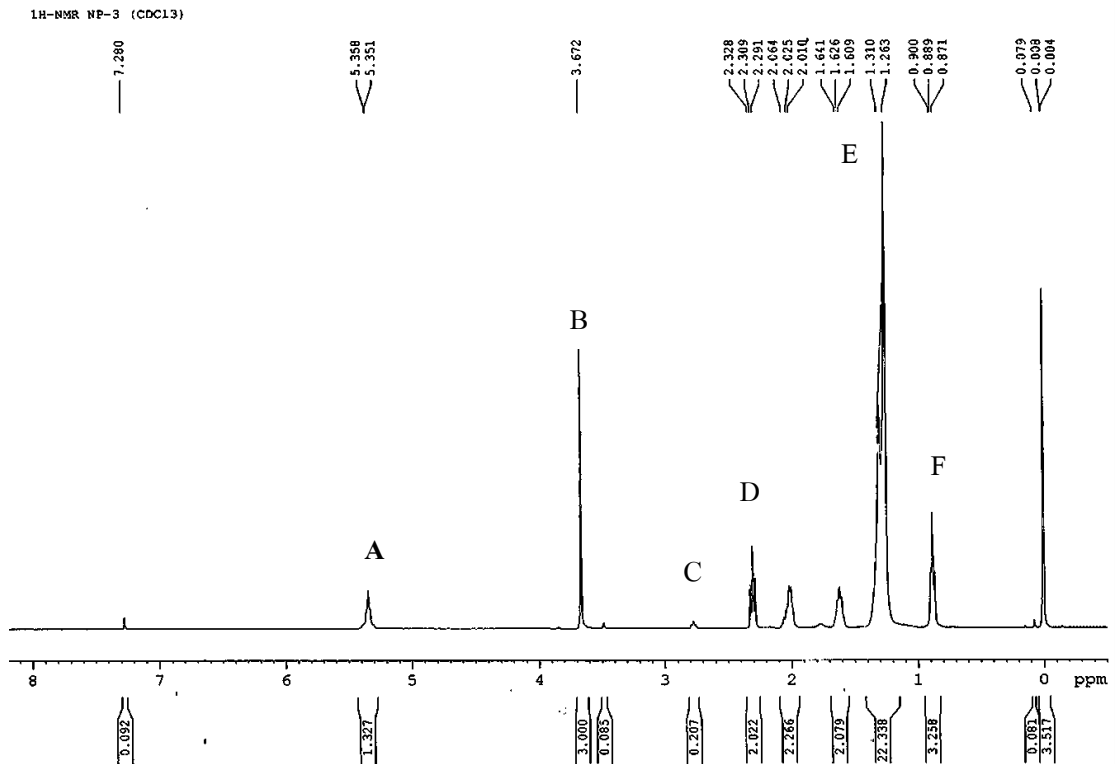
จากภาพที่ 4-3 เมื่อเปรียบเทียบภาพถ่ายก่อนกับหลังเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน พบว่าก่อนเกิดปฏิกิริยามethanol (ค่าความหนาแน่น 0.79 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) (Hong et al., 2014) จะลอยอยู่ด้านบน ส่วนไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันปาล์ม (ค่าความหนาแน่น 0.919 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) (Yang et al., 2013) อยู่ด้านล่างของหลอด หลังเกิดปฏิกิริยาจะเห็นการแยกชั้นออกเป็น 3 ส่วน ส่วนบนสุด คือ เมทานอลที่เหลือจากปฏิกิริยาซึ่งมีความหนาแน่นต่ำสุด สองชั้นล่างควรเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีสีที่แตกต่างกับสารตั้งต้นไบโอดีเซลซึ่งมีค่าความหนาแน่นประมาณ 0.91 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (Yang et al., 2013) จะลอยอยู่ด้านบนเหนือกลีเซอรอล (ค่าความหนาแน่น 1.261 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) (Yang et al., 2013) ซึ่งมีค่าความหนาแน่นสูงกว่า ดังนั้นในการเรียนรู้เกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในระดับมัธยมศึกษา สามารถนำหลักการความหนาแน่นที่แตกต่างมาใช้พิจารณาการเกิดไบโอดีเซลได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือ เช่น แก๊สโครมาโทกราฟี และนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ ซึ่งไม่มีในโรงเรียน

4.3 การหาลอยละของไบโอดีเซล โดย ^1H NMR สเปกโทรสโกปี

การหาลอยละของไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม เพื่อยืนยันผลการทดลองที่เกิดขึ้นจากการสังเกตด้วยตาเปล่า โดยนำไปวิเคราะห์หาลอยละการเปลี่ยนแปลงของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันปาล์มเป็นไบโอดีเซลด้วยเทคนิค ^1H NMR สเปกโทรสโกปี ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-1 และภาพที่ 4-4

ตารางที่ 4-1 ค่าเคมีเคิลชิฟ (chemical shift) ของไบโอดีเซล

ค่า chemical shift (ppm)	ตำแหน่งกราฟ	ชนิดของสารประกอบ
5.31-5.40 (multiplet)	A	Unsaturated hydrocarbon (-CH=CH-)
3.65 (singlet)	B	methoxy protons of methyl ester
2.8 (triplet)	C	allylic proton (C=C-CH ₃)
2.29 (multiplet)	D	α -methylene protons to ester (-CH ₂ -CO ₂ Me)
1.99-2.05 (multiplet)	E	α -methylene protons to double bond (-CH ₂ -C=C-)
0.85-0.88 (multiplet)	F	terminal methyl protons (C-CH ₃)



ภาพที่ 4-4 ¹H NMR สเปกตรัมของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์ม

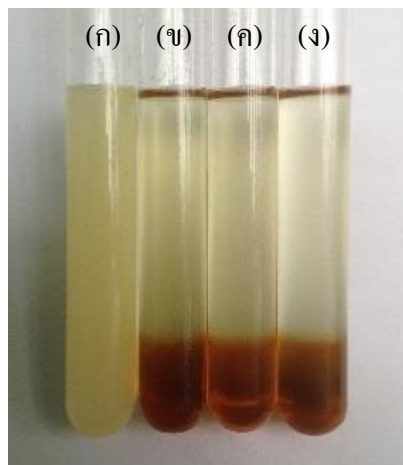
การหาล้อยละการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็นเมทิลเอสเทอร์ สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของโปรตอนตรงหมู่เมทิลีน (2.3 ppm) และหมู่เมทอกซี (3.7 ppm) ดังสมการที่ 2.1

4.4 การศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว

การผลิตไบโอดีเซล ร้อยละไบโอดีเซลที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับสภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง เช่น อัตราส่วนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา ดังนั้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ร้อยละไบโอดีเซลที่สูง รวมทั้งสามารถสังเกตการแยกชั้นของไบโอดีเซล และกลีเซอรอลได้อย่างรวดเร็ว เพื่อให้ผู้เรียนสามารถสังเกตเห็นได้ง่าย ชัดเจน และเหมาะสมกับเวลาในการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ ผลการศึกษาเมื่อแปรเปลี่ยนปัจจัยต่าง ๆ เป็นดังนี้

4.4.1 ผลของเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา

เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อร้อยละไบโอดีเซลที่ผลิตได้ โดยทั่วไปการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะทำให้เกิดร้อยละผลิตภัณฑ์สูงขึ้น แต่ด้วยข้อจำกัดด้านเวลาสำหรับการนำไปใช้ในห้องเรียน จึงต้องพิจารณาเวลาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่ทำให้ผู้เรียนสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน โดยผลการศึกษาดังกล่าวที่ 4-5

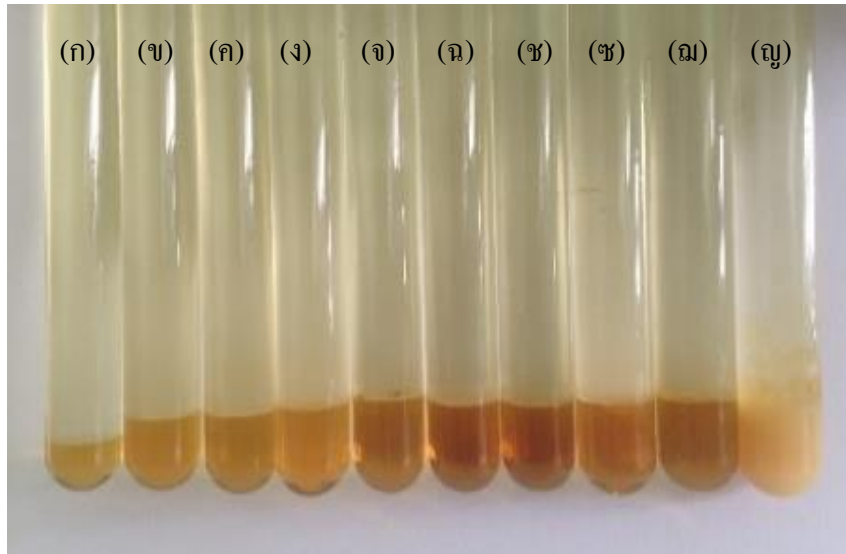


ภาพที่ 4-5 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่เวลา ก) 5 นาที ข) 10 นาที ค) 20 นาที และ ง) 30 นาที สภาวะที่ทดลอง: อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 4-5 การทำปฏิกิริยาเพียง 5 นาที พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะขุ่นขึ้น ไม่เกิดการแยกชั้นของไบโอดีเซล และกลีเซอรอลอิสระ อาจเนื่องมาจากเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาสั้นเกินไป ทำให้เกิดเพียงสารตัวกลาง ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ซึ่งมีความหนืดมากกว่า และมีไบโอดีเซลเกิดในปริมาณน้อยมาก จากนั้นเมื่อตั้งทิ้งไว้ 10 นาที ก็ยังไม่พบกลีเซอรอลที่ก้นหลอด ในขณะที่การทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 10 นาที จะเห็นการแยกชั้นของกลีเซอรอลอยู่ก้นหลอดทดลองอย่างชัดเจน ซึ่งมีสีเข้มอย่างชัดเจน และการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 20 และ 30 นาที ปริมาณกลีเซอรอลที่ก้นหลอดมีลักษณะ และปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาเพียง 10 นาที ทำให้ได้ไบโอดีเซล และกลีเซอรอลอิสระเกือบสมบูรณ์แล้ว การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตอน เอ็นเอ็มอาร์ สเปกโทรสโกปี เพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้จากการสังเกต พบว่าไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 10-20 นาที มีค่ามากกว่าร้อยละ 97 ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นบทปฏิบัติการเพื่อการเรียนรู้ไบโอดีเซลในชั้นเรียน

4.4.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม เมื่อแปรเปลี่ยนร้อยละ โดยน้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในช่วง 0.1 ถึง 1.0 ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4-6 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ ก) 0.1 ข) 0.2 ค) 0.3 ง) 0.4 จ) 0.5 ฉ) 0.6 ช) 0.7 ซ) 0.8 ฅ) 0.9 ฉ) 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม สภาวะที่ทดลอง: อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

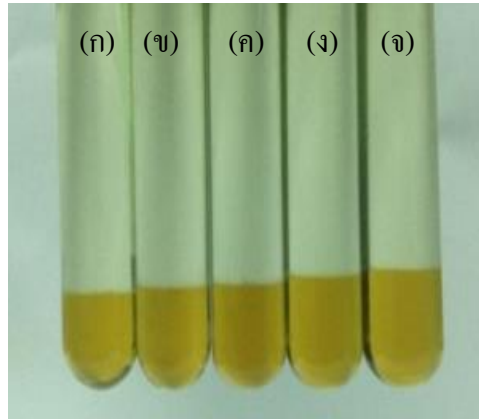
จากภาพที่ 4-6 เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 0.1-0.3 จะเห็นชั้นของกลีเซอรอลที่แยกออกมามีระดับสูงขึ้นตามลำดับ จนกระทั่งเริ่มคงที่เมื่อใช้ร้อยละ โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.4-1.0 การเพิ่มขึ้นของกลีเซอรอลเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณไบโอดีเซลที่เกิดขึ้น ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.4-0.9 ควรจะได้ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใกล้เคียงกัน และปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้สมบูรณ์หรือใกล้เคียงสมบูรณ์ ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค $^1\text{H NMR}$ สเปกโทรสโกปี พบว่ามีค่าในช่วงร้อยละ 97-99 และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นไบโอดีเซลที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 พบว่า เมื่อวิเคราะห์ปริมาณไบโอดีเซลที่เกิดขึ้น โดยใช้เทคนิค $^1\text{H NMR}$ สเปกโทรสโกปี ได้ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์เท่ากับ ร้อยละ 75, 97, 99 และ 99 ตามลำดับ ส่วนการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการแยกชั้นของกลีเซอรอล พบว่าการใช้

ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำกว่าในช่วง 0.1-0.4 ใช้เวลาในการเริ่มแยกชั้นประมาณ 15 นาที ในขณะที่ เมื่อใช้ร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 0.4-1.0 การแยกชั้นสามารถเกิดขึ้นได้ภายในเวลา 5 นาที แต่ เมื่อใช้ร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาสูงในช่วงที่ร้อยละ 0.7-0.9 จะเห็นชั้นกลีเซอรอลมีลักษณะเป็นเจล และพบว่ากลีเซอรอลเริ่มแข็งตัวเมื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 1.0 การแยกชั้นด้วยเวลาที่แตกต่างกันนี้ สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ แสดงว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.1-0.4 ยังต่ำเกินไปที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เกือบสมบูรณ์ในช่วงเวลา 10 นาที จึงยังคงมี ไคโตลิกเซอร์ไรด์ มอนอกลิเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ปนอยู่ในไบโอดีเซลทำให้การแยกชั้นใช้ เวลานานกว่า ในขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.4-0.6 ทำให้ปฏิกิริยาเกิดเป็นกลีเซอรอลอิสระ และไบโอดีเซลได้เกือบสมบูรณ์ เป็นปริมาณที่เหมาะสม ในกรณีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณ มากเกินไป ทำให้ปฏิกิริยามีความเป็นเบสสูง จะช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (saponification) หรือปฏิกิริยาการเกิดสบู่ ซึ่งเกิดเป็นปฏิกิริยาข้างเคียงได้ดีกว่าปฏิกิริยา ทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ทำให้เกิดเป็นสบู่ขึ้น

การใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูงเกินกว่าสภาวะที่เหมาะสม นอกจากจะทำให้ สิ้นเปลืองแล้ว ในขั้นตอนการล้างต้องใช้น้ำปริมาณมาก ทำให้เกิดน้ำเสียที่เป็นเบสจำนวนมาก ซึ่ง ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป นักเรียนสามารถนำไปคิดต่อได้ว่า ทำอย่างไรจึงจะสามารถลด ปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการผลิตไบโอดีเซล เช่น การเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถแยกออก ได้จากปฏิกิริยา และนำกลับมาใช้ใหม่ได้

4.4.3 ผลของอุณหภูมิต่อการผลิตไบโอดีเซล

การออกแบบการทดลองสำหรับนักเรียนมัธยมศึกษา สิ่งสำคัญที่ควรพิจารณา คือ ความปลอดภัย ดังนั้นเมื่อมีการให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้ไม่ควรจะสูงเกินไป ซึ่งเป็นข้อจำกัดประเด็นหนึ่ง อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาทำให้ ได้ผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงควรศึกษาผลของอุณหภูมิต่อเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสม ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4-7



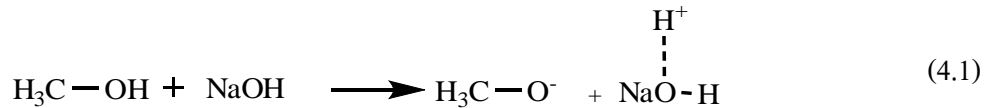
ภาพที่ 4-7 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์ที่ได้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ ก) 45 ข) 50 ค) 55 ง) 60 จ) 65 องศาเซลเซียส สภาวะที่ทดลอง: โซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 เป็นเวลา 10 นาที โดยค่าความคลาดเคลื่อนอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง ± 1 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 4-7 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปริมาณกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้น แต่มีแนวโน้มคงที่ที่อุณหภูมิในช่วง 60-65 องศาเซลเซียส การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 45-55 องศาเซลเซียส การแยกชั้นของไบโอดีเซลจะใช้เวลาานมากกว่า 15 นาที และสีของไบโอดีเซลไม่เหลืองใส ส่วนที่อุณหภูมิ 60 และ 65 องศาเซลเซียส จะเห็นชั้นของไบโอดีเซลมีสีเหลืองใส และเกิดการแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลกับกลีเซอรอลเกิดขึ้นชัดเจนภายในเวลา 5 นาที การวิเคราะห์ร้อยละไบโอดีเซลที่อุณหภูมิทั้งสองพบว่ามีความมากกว่า 98 ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการนำไปออกแบบการทดลองในห้องเรียนระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จึงเลือกที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพราะที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิใกล้จุดเดือดของเมทานอล (64.7 องศาเซลเซียส) (Hong et al., 2014) ทำให้เมทานอล กลายเป็นไอได้มากกว่า ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยต่อผู้เรียน และประหยัดพลังงาน จึงเลือกอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่สามารถเห็นผลการทดลองได้รวดเร็ว และชัดเจน

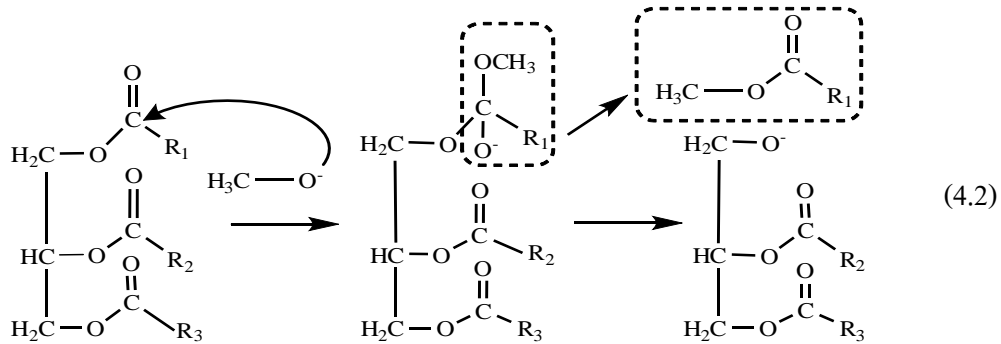
จากการทดลองศึกษาสภาวะที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม เพื่อนำผลการทดลองมาออกแบบการทดลอง ซึ่งจะต้องเห็นผลการทดลองอย่างรวดเร็ว ชัดเจน ดังนั้น จึงเลือกสภาวะ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 ใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที มาใช้ในการออกแบบการทดลองต่อไป

4.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว

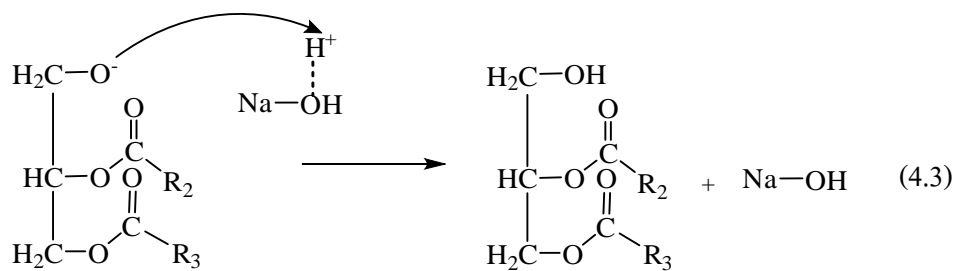
กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอลโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนแรก โซเดียมไฮดรอกไซด์จะเป็นตัวรับโปรตอนจากเมทานอลได้เมทอกไซด์ ดังสมการที่ 4.1



ขั้นตอนที่สอง เมทอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเป็นนิวคลีโอไฟล์เข้ามาจับกับหมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์ อยู่ในรูปเตตระฮีดรัลอินเตอร์มีเดียต (tetrahedral intermediate) และเกิดปฏิกิริยาต่อได้ไบโอดีเซล และไตรกลีเซอไรด์แอนไอออน ดังสมการที่ 4.2



ขั้นตอนที่สาม ไตรกลีเซอไรด์แอนไอออนจะดึงไฮโดรเจนไอออนจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ เกิดหมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอล เป็นโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ดังสมการที่ 4.3



ไตรกลีเซอไรด์ จะเกิดปฏิกิริยาต่อด้วยกลไกข้างต้น ได้ไบโอดีเซล และกลีเซอรอล จนกระทั่งปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์ (Lam et al., 2010)

ข้อดีของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวชนิดเบส ในการผลิตไบโอดีเซล คือ สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ด้วยร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง สามารถทำปฏิกิริยาในที่ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิไม่สูงมาก และ

ตัวเร่งปฏิกิริยานี้เนื้อเดียวมีราคาถูก หาซื้อได้ง่าย ต้นทุนในการผลิตต่ำ แต่อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้เนื้อเดียวนั้นพบปัญหาในการผลิตไบโอดีเซล ยังมีข้อจำกัด ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีสมบัติในการกักคร่อน ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Kuo et al., 2008) ขั้นตอนการกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากไบโอดีเซลต้องใช้ใช้น้ำปริมาณมากในการล้างเพื่อให้น้ำมันเป็นกลาง ทำให้เกิดน้ำเสียปริมาณมากตามไปด้วยซึ่งยากต่อการจัดการ อีกทั้งยังทำให้กลีเซอรอลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซลมีคุณภาพต่ำอีกด้วย (Reyero, Arzamendi, & Gandia, 2014) ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันแต่สามารถแยกออกได้จากปฏิกิริยาเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ

ตอนที่ 2 การผลิตไบโอดีเซลโดยตัวเร่งปฏิกิริยานี้อผสมนาโนแคลเซียมออกไซด์

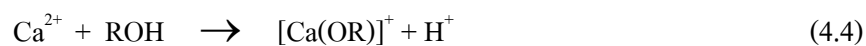
ด้วยข้อจำกัดของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้เนื้อเดียวสำหรับการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นเพื่อให้อัตราการผลิตไบโอดีเซลมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงควรหาทางเลือกในการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยานี้เนื้อเดียวเป็นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้อผสม ซึ่งสามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ลดขั้นตอนการกำจัดตัวเร่ง และไม่ก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมาก

แคลเซียมออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งเนื้อผสมที่มีการศึกษากันมากในการผลิตไบโอดีเซล เพราะมีราคาถูก (Kouzu & Hidaka, 2012) และมีความสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีในสถานะของการผลิตไบโอดีเซล (Boey, Pragas, & Hamid, 2011) มีการละลายในเมทานอลต่ำ ง่ายต่อการจัดการมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้เนื้อเดียว เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Ibrahim et al., 2013) และยังสามารถทำปฏิกิริยาได้ที่ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิต่ำ (Reddy, Reddy, Oshel, & Verkade, 2006) จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงทำให้แคลเซียมออกไซด์เป็นที่น่าสนใจเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล อีกทั้งเมื่อนำไปออกแบบการทดลองทำให้ผู้เรียนได้เห็นความแตกต่างของการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานี้อผสมจะขึ้นอยู่กับปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ ความแรงของเบส และความเข้มข้นของบริเวณเร่งปฏิกิริยา (Kouzu & Hidaka, 2012) ดังนั้นเพื่อให้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานี้อผสมมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงควรสังเคราะห์ให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร หรือที่เรียกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานาโนมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง และสามารถกระจายตัวในรูปคอลลอยด์ในตัวกลาง จึงช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมัน เมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน จึงทำหน้าที่เสมือนสะพานเชื่อมระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยานี้เนื้อเดียว และเนื้อผสม (Tedsree, 2013)

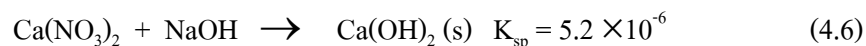
4.6 การสังเคราะห์ และการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคนาโนแคลเซียมออกไซด์

นาโนแคลเซียมออกไซด์ สามารถเตรียมโดยกระบวนการโซล-เจล ซึ่งประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ ปฏิกิริยาการแยกสลายน้ำหรือแอลกอฮอล์ (hydrolysis/alcoholysis) และ ปฏิกิริยาการควบแน่น (condensation)

การเตรียมนาโนแคลเซียมออกไซด์จะใช้เกลือแคลเซียมไนเตรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) เป็นโลหะฟริเคอเซอร์ ละลายในเอทิลีนไกลคอลทำหน้าที่เป็นสารตัวกลาง และเติมสารช่วยเสถียรพอลิเมอร์ พอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) เพื่อช่วยให้อนุภาคนาโนคอลลอยด์มีเสถียรภาพ โดยใช้ความเกาะเกาะของโมเลกุลขนาดใหญ่ป้องกันการรวมตัว และเมื่อเติมไฮดรอกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะเกิดปฏิกิริยาการแยกสลายแอลกอฮอล์ ดังสมการที่ 4.4 และเกิดปฏิกิริยาการควบแน่น ดังสมการที่ 4.5

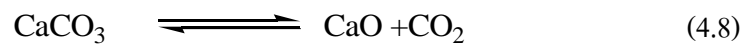
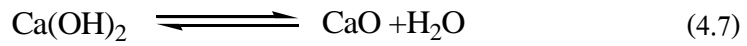


ค่า pH เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการควบคุมขนาดของอนุภาค ในกระบวนการโซล-เจล ปฏิกิริยาการควบแน่นจะเกิดได้ดีในสภาวะที่เป็นเบส ในขณะที่ปฏิกิริยาการแยกสลายแอลกอฮอล์ เกิดขึ้นได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด ในระหว่างการทดลองหากสารละลายเป็นเบสมากเกินไป ส่งผลให้มีความมากเกินไป K_{sp} จะทำให้เกิดตะกอนขาวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทันที ดังสมการที่ 4.6 มีขนาดใหญ่แทนที่จะได้เจลเกิดขึ้น ตามสมการที่ 4.4 และ 4.5 จึงควรค่อย ๆ หยดสารละลายเบส และคนอย่างแรงขณะหยด เพื่อให้เบสกระจายตัวสม่ำเสมอ

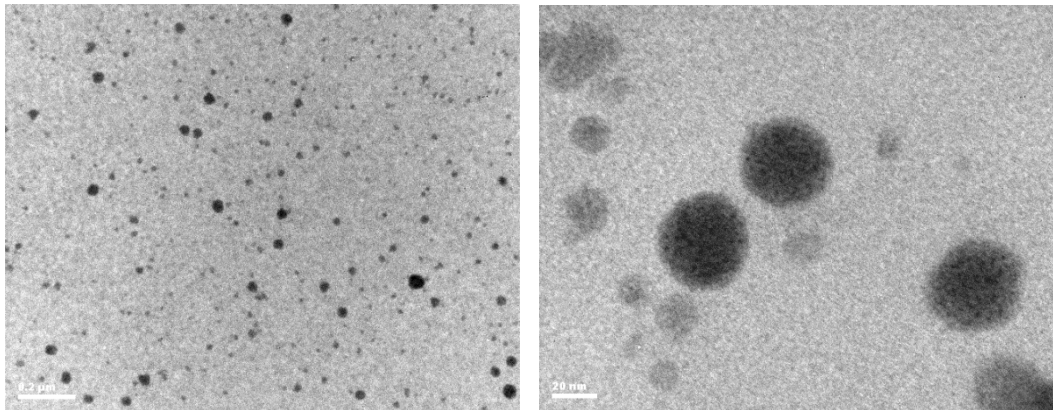


ระหว่างปฏิกิริยาควบแน่น ของผสมจะมีลักษณะเป็นเจลสีขาว เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา กรองของแข็งขณะร้อน นำตะกอนมาล้างตะกอนด้วยน้ำจำนวน 3 ครั้ง โดยใช้เครื่องเซนทริฟิวก์ ของแข็งที่ได้มีลักษณะเป็นผงสีขาว ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อระเหยน้ำที่กักเก็บในโพรง นำของแข็งที่ได้มาบด และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำออกจากโครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต ตามสมการที่ 4.7 และ 4.8 นอกจากนี้การเผาที่อุณหภูมิสูงยังสามารถช่วยกำจัดสารช่วยเสถียรพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน ที่เติมในช่วงการทำปฏิกิริยา

และยังมีส่วนช่วยให้อนุภาคที่ได้มีความพรุนสูงอีกด้วย อย่างไรก็ตามแคลเซียมออกไซด์เป็นสารประกอบที่ไม่เสถียรต่อความชื้น และคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้



ขนาดรูปร่าง และการกระจายตัวของแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมได้สามารถวิเคราะห์ได้โดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4-8

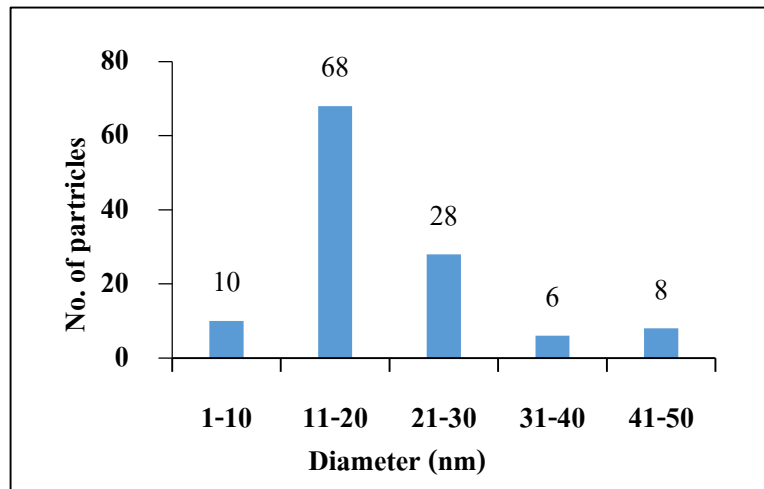


(ก)

(ข)

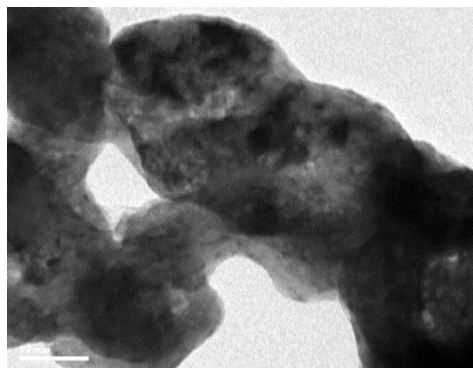
ภาพที่ 4-8 (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนแคลเซียมออกไซด์ (ข) ภาพขยายรูป (ก)

ภาพถ่ายในภาพที่ 4-8 มีลักษณะเป็นจุดสีดำรูปทรงกลมกระจายทั่วอยู่ทั่วไป ขนาดเล็กใหญ่ แตกต่างกัน ซึ่งแสดงถึงขนาดของอนุภาคนาโนแคลเซียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ ซึ่งมีการกระจายตัวของขนาดที่กว้าง เมื่อวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคจำนวนประมาณ 120 อนุภาคในบริเวณเดียวกัน พบว่ามีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 19.24 ± 9.93 นาโนเมตร กราฟการกระจายตัวของขนาดแสดงดังภาพที่ 4-9



ภาพที่ 4-9 กราฟการกระจายตัวของขนาดของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากหินปูน เตรียมได้จากการเผาหินปูน (CaCO_3) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่ามีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนในระดับไมโครเมตร ดังภาพที่ 4-10 ไม่สามารถวัดขนาดของอนุภาคเดี่ยว ๆ ได้



ภาพที่ 4-10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของแคลเซียมออกไซด์จากหินปูน

4.7 การวิเคราะห์ความเป็นเบสบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

สมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งถูกกำหนดโดยปริมาณ และความแรงของบริเวณที่เป็นเบส สมบัติความเป็นเบสของแคลเซียมออกไซด์ สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้การเปรียบเทียบสีของอินดิเคเตอร์ ซึ่งเปลี่ยนสีตามความแรงของเบสที่พื้นผิวและค่า pK_{BH} ของอินดิเคเตอร์ แสดงในรูปฟังก์ชันความเป็นกรด (H_-) ตามสมการของ Hammett ดังสมการที่ 4.9

$$H_- = -pK_{BH} + \log[B^-]/[BH] \quad (4.9)$$

H_- = พังค์ชันความเป็นกรด Hammett ของอินดิเคเตอร์

B และ $[BH]$ คือ ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ และคู่เบส $[B^-]$

pK_{BH} คือ ค่า logarithm ของค่าคงที่การแตกตัวของอินดิเคเตอร์

การทดสอบความเป็นเบสโดยใช้แฮมเมตอินดิเคเตอร์ (Hammett indicator) ทำโดยการเติมเมทานอลลงในแคลเซียมออกไซด์ เพื่อทำปฏิกิริยา และเกิดโลหะอัลคอกไซด์ ความเป็นกรดเบสจะพิจารณาจากความสามารถของหมู่อัลคอกซีในการรับโปรตอนจากไฮโดรเจนของอินดิเคเตอร์ โดยการเปรียบเทียบของอินดิเคเตอร์ ความแรงของตำแหน่งที่เป็นเบสบนพื้นผิว ทดสอบโดยเปรียบเทียบกับอินดิเคเตอร์ตัวอื่นที่มีความเป็นเบสมากกว่า และรายงานผลเป็นช่วงของความเป็นเบส

สำหรับแฮมเมตอินดิเคเตอร์ มีอินดิเคเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาของการทดลองนี้ คือ โบรโมฟีนอลบลู ($H_- = 7.2$) ฟีนอล์ฟทาลีน ($H_- = 9.8$) และ 2,4-ไดไนโตรอนิซีน ($H_- = 15$) (Qiu, Li, Yang, Li, & Sun, 2011) แฮมเมตอินดิเคเตอร์จะเป็นตัวบ่งบอกถึงความแรง ถ้าแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนสี คือ มีความแรงที่มากกว่าอินดิเคเตอร์ที่ใช้ แต่ถ้าไม่มีการเปลี่ยนสีแสดงว่ามีความแรงน้อยกว่าอินดิเคเตอร์ที่ใช้ จากการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ผลลัพธ์การเปลี่ยนสีของแฮมเมตอินดิเคเตอร์ที่ใช้ทั้ง 3 ชนิด

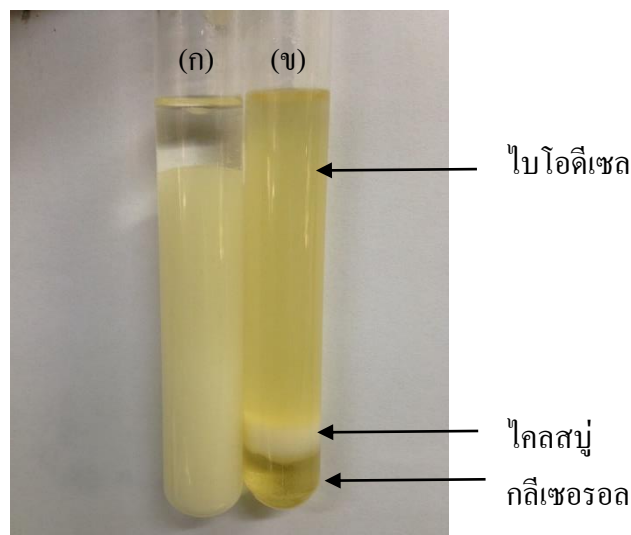
อินดิเคเตอร์	สี	ความแรงของเบส	ผลลัพธ์
โบรโมฟีนอลบลู	เหลือง-น้ำเงิน	$H_- > 7.2$	น้ำเงิน
ฟีนอล์ฟทาลีน	ใสไม่มีสี-สีชมพู	$H_- > 9.3$	สีชมพู
2,4-ไดไนโตรอนิซีน	เหลือง-ม่วง	$H_- > 15.0$	เหลืองส้ม

โบรโมฟีนอลบลู ให้ผลเป็นสีน้ำเงิน และฟีนอล์ฟทาลีนให้ผลการทดสอบเป็นสีชมพู แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์มีความแรงของเบสมากกว่า 9.8 ให้ผลเป็นสีส้มเมื่อทดสอบด้วย 2,4 ไดไนโตรอนิซีน แสดงว่ามีความแรงของเบสน้อยกว่า 15.0 ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์มีค่าความแรงของเบสมากกว่า 9.3 แต่น้อยกว่า 15.0 แสดงโดย $9.3 < H_- < 15.0$ โดยค่าความแรงสูงสุดของแคลเซียมออกไซด์ที่พบรายงานโดย Zhu et al. (2006) เท่ากับ $26.5 < H_-$ ซึ่งโดยส่วนมาก

มีรายงานในช่วง $15.0 < H_2 < 18$ (Kouzu and Hidaka, 2012) อย่างไรก็ตามการได้ค่าเบสต่ำอาจเนื่องจากในระหว่างขั้นตอนการทดสอบไม่สามารถป้องกันพื้นผิวไม่ให้ทำปฏิกิริยากับอากาศได้

4.8 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมนาโนแคลเซียมออกไซด์

การศึกษาทำโดยนำน้ำมันปาล์มทำปฏิกิริยากับเมทานอลโดยมีนาโนแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 ที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา เทของผสมลงในหลอดทดลอง ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 5-10 นาที จะเริ่มเห็นการแยกชั้น ดังภาพที่ 4-11



ภาพที่ 4-11 ภาพถ่าย ก) ของผสมระหว่างน้ำมันปาล์ม แคลเซียมออกไซด์ และเมทานอล ก่อนให้ความร้อน ข) หลังให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

จากภาพที่ 4-11 จะเห็นได้ว่าก่อนให้ความร้อนเมื่อผสม น้ำมันปาล์ม แคลเซียมออกไซด์ และเมทานอล ของผสมที่ได้อยู่ในลักษณะที่มีแคลเซียมไดออกไซด์กระจายอยู่ทั่วไปในน้ำมัน และมีเมทานอลแยกชั้นออกมา หลังจากให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยา และตั้งทิ้งไว้ประมาณ 15-20 นาที จะเห็นมีการแยกชั้น ๆ ที่แตกต่างจากก่อนให้ความร้อน เนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยชั้นล่างสุดซึ่งมีสีเหลืองเข้มกว่าเป็นกลีเซอรอล ชั้นถัดมาเป็น

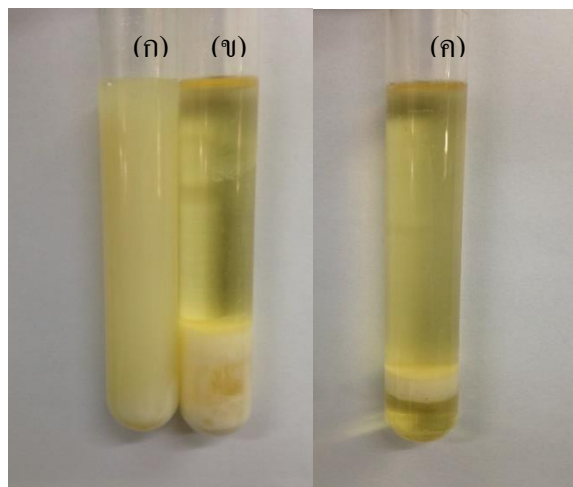
อิมัลชันของไคลสบู ส่วนชั้นบนสุดซึ่งมีสีเหลืองใสเป็นชั้นของไบโอดีเซล จากการทดลองจะเห็นว่า หลังจากให้ความร้อน มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอย่างชัดเจน แสดงว่ามีปฏิกิริยาเกิดขึ้น ซึ่งก็คือ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ทำให้ผู้เรียนสามารถเปรียบเทียบได้ว่าเมื่อนำสารตั้งต้น ได้แก่ น้ำมันปาล์ม เมทานอล มาทำปฏิกิริยากัน โดยมีนาโนแคลเซียมออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะสามารถเปลี่ยนสารตั้งต้นให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้เมื่อพิจารณาจะคล้ายกับการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว ซึ่งใช้ค่าความหนาแน่นของสารในการสังเกตการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ เช่นกัน แต่สิ่งที่แตกต่างกันที่สามารถสังเกตได้ระหว่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว และ เนื้อผสม คือ ไบโอดีเซลที่ใช้ตัวเร่งเนื้อเดียวจะสังเกตเห็นการแยกชั้นเพียงแค่ 2 ชั้นเท่านั้น (ไม่รวม เมทานอล) ได้แก่ ชั้นของไบโอดีเซล และชั้นกลีเซอรอล ส่วนไบโอดีเซลที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื้อผสม จะเห็นการแยกชั้นออกเป็น 3 ชั้น ที่แตกต่างกัน คือ ชั้นของไคลสบูจะมีชั้นสบู่เกิดขึ้นซึ่ง ในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวจะไม่เห็นชั้นสบู่เกิดขึ้น และที่แตกต่างอีกจะเป็นสีของกลีเซอรอล เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวกลีเซอรอลจะมีสีส้ม เป็นกลีเซอรอลที่คุณภาพ ต่ำ ส่วนกลีเซอรอลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม กลีเซอรอลมีสีเหลืองซึ่งเป็นกลีเซอรอลที่มี คุณภาพ

4.9 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม

การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมที่แตกต่างกัน ได้แก่ นาโนแคลเซียม ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ โคล-เจล กับแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการนำ หินปูนไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมาใช้เป็นตัวเร่งผลิตไบโอดีเซล จากน้ำมันปาล์ม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ได้ผลการ ทดลองดังภาพที่ 4-12

จากภาพที่ 4-12 จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากหินปูน 1% ไม่เกิดการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ได้ ส่วนไบโอดีเซลที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จาก หินปูน 7% โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา และตั้งทิ้งไว้ 15 นาที ไม่สามารถเห็นการแยกชั้น ได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง สามารถมองเห็นการแยกชั้นได้เป็น 4 ชั้น ได้แก่ ชั้นบนสุด เป็นชั้นของไบโอดีเซล ถัดมาเป็นชั้นของสบู่ ถัดมาอีกชั้นเป็น กลีเซอรอล และชั้นสุดท้ายเป็นชั้น ของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเหลือที่ก้นหลอดทดลองเป็นจำนวนมากจึงทำให้ไม่สามารถมองเห็น กลีเซอรอลได้ชัดเจน การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งแคลเซียมออกไซด์นาโน 1% พบว่า เมื่อ สิ้นสุดปฏิกิริยา ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที สามารถเห็นการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ได้อย่างชัดเจน แยกออกเป็น 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นบนสุดเป็นชั้นของไบโอดีเซล ถัดมาเป็นชั้นของสบู่ และชั้นสุดท้ายเป็น

กลีเซอรอล เมื่อเปรียบเทียบความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จาก หินปูนและแคลเซียมออกไซด์นาโนที่ได้จากกระบวนการ โขล-เจด พบว่านาโนแคลเซียมออกไซด์ สามารถเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลได้ดีกว่าแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากหินปูน ทำให้การผลิต ไบโอดีเซลที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่า และมี พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาสูง จึงมีบริเวณเร่งปฏิกิริยามากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Isahak, Ismail, Jahim, Salimon, and Yarmo (2010) ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่น้อย และได้ ร้อยละของไบโอดีเซลมากกว่า ร้อยละ 90 การแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ชัดเจนในระยะเวลาอันสั้นเมื่อ ใช้นาโนแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ ในการนำมาใช้กับการเรียนการสอนในระดับมัธยมศึกษาได้ เนื่องจากสามารถเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลได้ภายในระยะเวลาอันสั้น และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณน้อย ดังนั้นจึงได้ศึกษา สภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา นาโนแคลเซียมออกไซด์



ภาพที่ 4-12 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ก) ใช้แคลเซียมออกไซด์จาก หินปูน 1% ข) ใช้แคลเซียมออกไซด์จากหินปูน 7% ค) ใช้แคลเซียมออกไซด์นาโน 1% สภาวะที่ทดลอง: อัตราส่วน โดยโมลน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:6 ทำปฏิกิริยาที่ อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

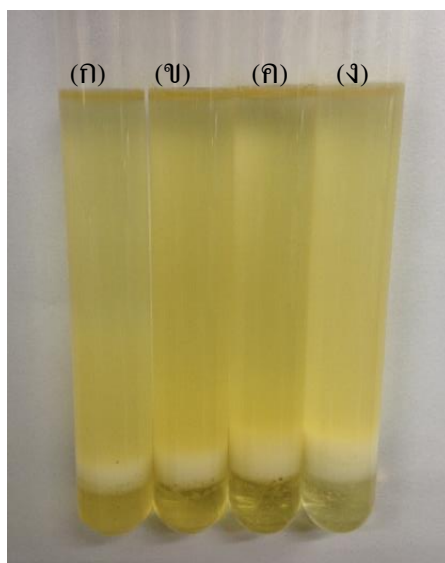
4.10 การศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม

เพื่อให้ผู้เรียนสังเกตเห็นผลการทดลองได้ง่าย เหมาะสำหรับการจัดการเรียนรู้ใน ห้องเรียน การทดลองนี้ ได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยา และหาสภาวะที่

เหมาะสม เพื่อนำไปใช้ในห้องเรียน โดยศึกษาการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ และปริมาณร้อยละ ไบโอดีเซลที่ได้เมื่อแปรเปลี่ยนปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

4.10.1 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

การพิจารณาผลการทดลองเพื่อนำไปออกแบบการทดลองให้เหมาะสมสำหรับการจัดการเรียนการสอนในชั้นเรียนต้องใช้ระยะเวลาสั้น และเห็นการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน จึงต้องมีการคำนึงถึงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อีกทั้งระยะเวลายังเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อร้อยละไบโอดีเซลที่ผลิตได้ โดยทั่วไปการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะทำให้เกิดร้อยละของไบโอดีเซลสูงขึ้น แต่ด้วยข้อจำกัดด้านเวลาสำหรับการนำไปใช้ในห้องเรียน ให้มีความเหมาะสม ดังนั้นจึงมีการศึกษาผลของเวลา ทำโดยแปรเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ในช่วงเวลา 10-40 นาที เปรียบเทียบระยะเวลาในการแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลกับกลีเซอรอล หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ 15 นาที ผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-13



ภาพที่ 4-13 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่เวลา ก) 10 นาที ข) 20 นาที ค) 30 นาที และ ง) 40 นาที สภาวะที่ทดลอง: อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 6:1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 4-13 เมื่อใช้เวลาทำปฏิกิริยาเพียง 10 นาที ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณกลีเซอรอลเกิดน้อยที่สุด เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาแล้วต้องตั้งทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง จึงเห็นการแยกชั้นระหว่าง

ไบโอดีเซล และกลีเซอรอล อาจเนื่องมาจากเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาสั้นเกินไป ทำให้เกิดเพียงสารตัวกลางไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ปะปนอยู่ทำให้มีความหนืดมากกว่า และยังมีตัวเร่งปฏิกิริยาตกลงมาที่ก้นหลอดทดลอง และสีของไบโอดีเซลที่ได้ไม่ใส ในขณะที่การทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 20, 30 และ 40 นาที ปริมาณกลีเซอรอลที่ก้นหลอดทดลองมีลักษณะ และปริมาณใกล้เคียงกัน แต่พบว่าที่เวลา 20 นาที เมื่อสิ้นสุดการทดลองไม่สามารถมองเห็นการแยกชั้นของไบโอดีเซล และกลีเซอรอลได้ภายในเวลา 10-15 นาที ต้องใช้ระยะเวลาในการตั้งทิ้งไว้มากกว่า 1 ชั่วโมง จึงจะเห็นการแยกชั้นได้อย่างชัดเจน ส่วนการทำปฏิกิริยาที่เวลา 30 และ 40 นาที เมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเทสารผสมจากขวด 3 ขวดลงในหลอดทดลองจะเห็นการแยกชั้นของกลีเซอรอล และไบโอดีเซลได้ทันที โดยกลีเซอรอลที่เห็นมีลักษณะใส เมื่อตั้งทิ้งไว้ 10-15 นาที จะเห็นการแยกชั้นได้อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาใช้เวลาเพียง 30 นาที ทำให้ได้ไบโอดีเซล และกลีเซอรอลอิสระเกือบสมบูรณ์ เมื่อยืนยันผลที่ได้จากการสังเกตโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค โพรตอน เอ็น เอ็ม อาร์ สเปกโทรสโกปี ได้ผลดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ร้อยละของไบโอดีเซลที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างกัน

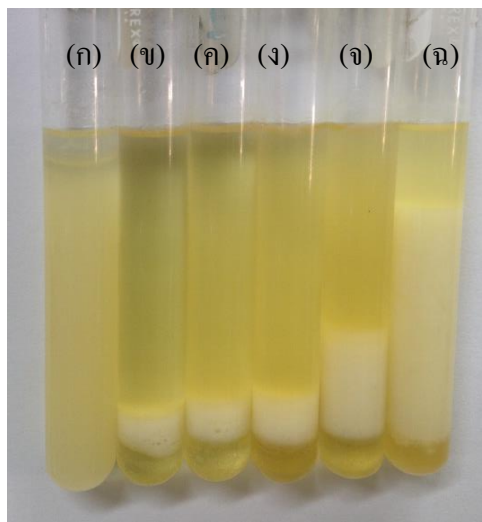
เวลาทำปฏิกิริยา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนไปของไบโอดีเซล
10	96
20	96
30	98
40	99

จากตารางที่ 4-3 พบว่า ไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 30-40 นาที มีค่ามากกว่าร้อยละ 98 ดังนั้นระยะเวลาในช่วงดังกล่าวจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นบทปฏิบัติการ เพื่อการเรียนรู้การผลิตไบโอดีเซลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมในชั้นเรียน

มีรายงานการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์ในการผลิตไบโอดีเซล แต่จะใช้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เช่น Isahak et al. (2010) ใช้เวลา 2.5 ชั่วโมง ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช มีตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 2.5 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละของไบโอดีเซลเท่ากับ 94 และ Reddy et al. (2006) ได้ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 20 นาโนเมตร อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันต่อเมทานอล เท่ากับ 1:27 ได้ไบโอดีเซลร้อยละ 99

4.10.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้เอง พบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณไบโอดีเซลที่เกิดขึ้น สภาวะที่เหมาะสมใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ถ้าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยเกินไปจะทำให้ได้ไบโอดีเซลน้อย ถ้าใช้ปริมาณมากเกินไปจะทำให้สิ้นเปลือง และเกิดสบู่ขึ้นได้ สำหรับการศึกษผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้เองผสมนาโนแคลเซียมออกไซด์ ในช่วงร้อยละ 0.25-4.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ได้ผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-14



ภาพที่ 4-14 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ ก) 0.25 ข) 0.5 ค) 1.0 ง) 2.0 จ) 3.0 และ ฉ) 4.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม สภาวะที่ทดลอง: อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

จากภาพที่ 4-14 เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ไม่พบการแยกชั้นของกลีเซอรอล และไบโอดีเซล อีกทั้งยังสามารถสังเกตเห็นชั้นของเมทานอลลอยอยู่ด้านบนสุด อาจเนื่องมาจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้น้อยเกินไป ปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดได้สมบูรณ์ จึงไม่พบกลีเซอรอลที่ก้นหลอดทดลอง ในขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงร้อยละ 0.5-4.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม จะเห็นชั้นกลีเซอรอลที่แยกออกมา มีระดับความสูงคงที่ใกล้เคียงกัน โดยมีความสูงของชั้นกลีเซอรอล เท่ากับ 1.2-1.3 เซนติเมตร ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5-4.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ควรจะได้

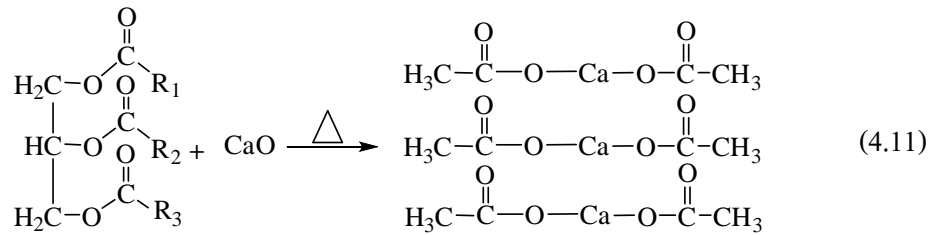
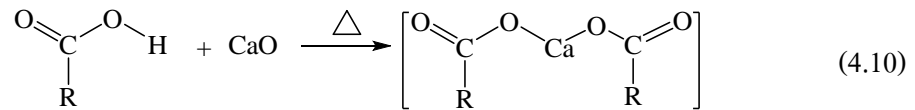
ร้อยละไบโอดีเซลที่ใกล้เคียงกัน และปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้สมบูรณ์หรือใกล้เคียงสมบูรณ์ เมื่อนำไปวิเคราะห์ และยืนยันร้อยละการเปลี่ยนไปของไตรกลีเซอไรด์เป็นไบโอดีเซล ด้วยเทคนิค ¹H NMR พบว่ามีค่าในช่วงร้อยละ 90-99 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการแยกชั้นของกลีเซอรอล ปริมาณไคลสบู่ และปริมาณกลีเซอรอลที่เกิดขึ้น แสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ความสูงของชั้นกลีเซอรอล และชั้นสบู่จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม)	เวลาที่ใช้ใน การแยกชั้น (นาที)	ความสูง ชั้นกลีเซอรอล (เซนติเมตร)	ความสูง ชั้นสบู่ (เซนติเมตร)	ร้อยละ ไบโอดีเซล
0.25	~15	-	-	75
0.5	<10-15	1.2	0.7	90
1.0	<10-15	1.3	0.8	99
2.0	<10-15	1.3	1.1	98
3.0	>15	1.3	2.5	97
4.0	>15	1.3	5.4	97

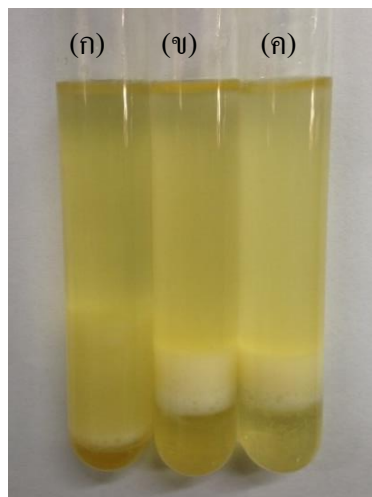
จากตารางที่ 4-4 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ได้ปริมาณกลีเซอรอลอิสระ และปริมาณไบโอดีเซลสูงขึ้น แต่การเติมมากเกินไป ทำให้มีโอกาสเกิดสบู่ได้มากขึ้น และสบู่ที่เกิดขึ้นทำให้การแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ช้าลง ระยะเวลาการแยกชั้นที่ต่างกัน และความสูงของชั้นสบู่ที่ต่างกัน สามารถเป็นตัวบ่งชี้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้ โดยที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ยังน้อยเกินไปที่จะทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ภายในระยะเวลา 30 นาที จึงยังมีมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ปนอยู่ในผลิตภัณฑ์จึงทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการแยกชั้นนานขึ้น หรืออาจเกิดจากปริมาณเมทานอลที่เหลือจากปฏิกิริยาจึงทำให้กลีเซอรอลละลายได้ดีขึ้น ในขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5-2.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ทำให้เกิดกลีเซอรอลอิสระ และไบโอดีเซลได้เกือบสมบูรณ์ ส่วนในกรณีที่ใช้ตัวเร่งในปริมาณร้อยละ 3.0-4.4 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม จะทำให้มีสถานะความเป็นเบสที่สูง แคลเซียมไอออน (Ca²⁺) ที่เกิดการละลายออกจากพื้นผิว (leaching) จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาสะaponนิฟิเคชัน (saponification) กับกรดไขมันอิสระได้ไคลสบู่ ดังสมการที่ 4.10

นอกจากนี้สภาวะที่เป็นเบสสูงมาก ไตรกลีเซอไรด์สามารถเกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันได้เช่นกัน ดังสมการที่ 4.11



4.10.3 ผลของอุณหภูมิต่อการผลิตไบโอดีเซล

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสม เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการออกแบบการทดลอง บทปฏิบัติการเรื่องการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อผสม จึงทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ ในช่วง 50 ถึง 65 องศาเซลเซียส ผลการศึกษา ดังภาพที่ 4-15



ภาพที่ 4-15 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิ

ก) 50±1 ข) 60±1 และ ค) 65±1 องศาเซลเซียส สภาวะที่ทดลอง:

นาโนแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำปาล์ม อัตราส่วนน้ำมันต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 ทำปฏิกิริยา 30 นาที

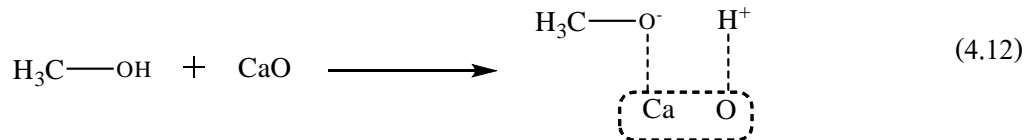
จากภาพที่ 4-15 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างเห็นได้ชัด ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะสังเกตเห็นปริมาณกลีเซอรอลน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส และการแยกชั้นของไบโอดีเซลจะเวลานานกว่า 45 นาที และยังคงเกิดชั้นสบู่ในปริมาณสูง ส่วนที่อุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส จะเกิดการแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลกับกลีเซอรอลเกิดขึ้นชัดเจนภายในเวลา 5-10 นาที การวิเคราะห์ร้อยละไบโอดีเซลที่อุณหภูมิทั้งสองพบว่ามีความมากกว่า 98 ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยต่อผู้เรียน และประหยัดพลังงาน จึงเลือกที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ทดลองในชั้นเรียน

ผลการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เช่น ผลของเวลาทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา พบว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับนำมาออกแบบชุดการทดลอง คือ ใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ได้ร้อยละไบโอดีเซล เท่ากับ 99 จะเห็นได้ว่ามีการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้อย ใช้ระยะเวลาสั้น อีกทั้งอุณหภูมิไม่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับรายงานการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์ ของ Isahak et al. (2010) ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2.5 ใช้อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันพืชต่อเมทานอล เท่ากับ 1:15 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง จากผลการทดลองที่ศึกษาได้ มีจุดเด่น คือ ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาสั้นกว่า อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันต่อเมทานอลน้อยกว่า และยังใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้อยกว่าอีกด้วย ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันของนาโนแคลเซียมออกไซด์อาจมาจาก กระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการทดลองนี้สามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาได้ขนาดเล็กประมาณ 19.24 ± 9.93 นาโนเมตร นอกจากนี้อนุภาคยังมีลักษณะการกระจายตัวที่ดี ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงในการเกิดปฏิกิริยา สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ในระยะเวลาสั้น ๆ แม้ว่าจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณต่ำก็ตาม จากผลการทดลองข้างต้นจึงมีความเป็นไปได้ในการที่จะนำสภาวะที่เหมาะสมไปออกแบบชุดการทดลองผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ผสมสำหรับจัดการเรียนรู้ในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายได้

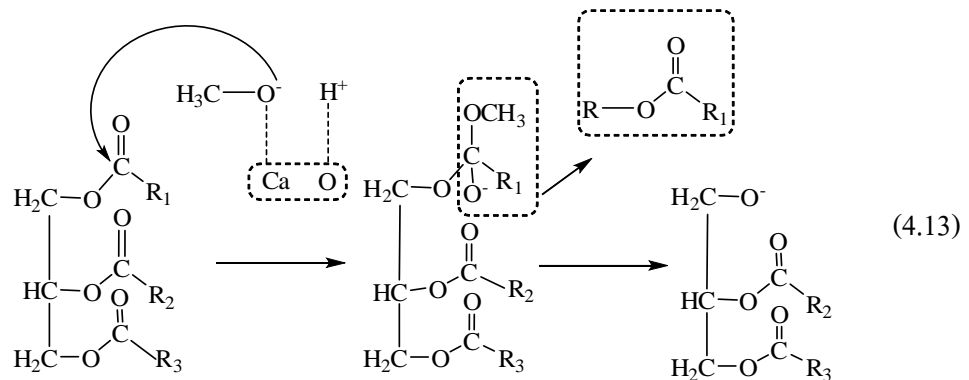
4.11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ โดยมีสารตั้งต้นเป็นไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันปาล์ม และเมทานอล มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

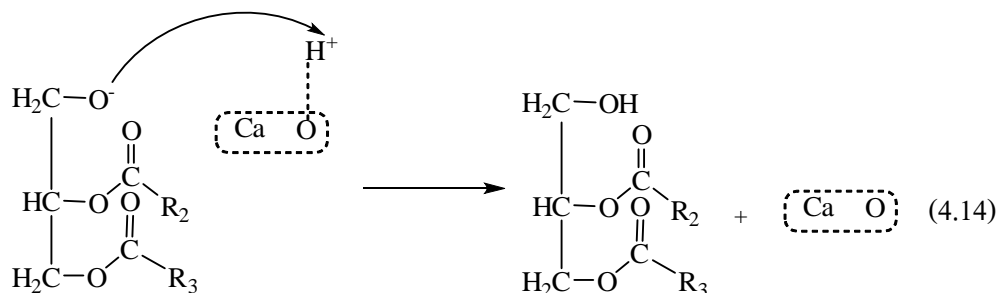
การเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นจากพื้นผิวที่มีสมบัติเป็นเบสของแคลเซียมออกไซด์ ดึงโปรตอนจากเมทานอลทำให้เกิดเป็นแคลเซียมเมทอกไซด์แอนไอออน (Lam et al., 2010) แสดงดังสมการ 4.12



จากนั้นแคลเซียมเมทอกไซด์แอนไอออน จะเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งคาร์บอนิลคาร์บอนใน โมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ เกิดเป็นสารเมทอกไซด์คาร์บอนิลอินเทอร์มีเดียต และเกิดปฏิกิริยาต่อไป ได้ ไบโอดีเซล และไดกลีเซอไรด์แอนไอออน ดังสมการที่ 4.13



ขั้นตอนต่อไป ไดกลีเซอไรด์แอนไอออนจะดึงไฮโดรเจนไอออนจากแคลเซียมออกไซด์ เกิดหมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอล เป็น โมเลกุลของไดกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์จะเกิดปฏิกิริยาต่อกันด้วยกลไกตามเดิม ในที่สุดจะได้ไบโอดีเซล และกลีเซอรอล ดังสมการ 4.14



ตอนที่ 3 การจัดทำคู่มือชุดการทดลอง และการใช้คู่มือการทดลอง

4.12 แนวคิดในการจัดทำคู่มือชุดการทดลอง และการใช้คู่มือการทดลอง

คู่มือปฏิบัติการทดลองการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน จัดทำขึ้น เพื่อให้ผู้เรียน ได้เกิดทักษะการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21 (Wagner, 2008) ดังนี้

- 1) การคิดวิเคราะห์ และการแก้ปัญหา
- 2) การร่วมมือกันทำงาน และความเป็นผู้นำ
- 3) ความคล่องตัว และการปรับตัว
- 4) ความคิดริเริ่ม และการสร้างสรรค์สิ่งใหม่
- 5) การสื่อสารด้วยภาษาพูด และภาษาเขียนอย่างมีประสิทธิภาพ
- 6) การเข้าถึง และการวิเคราะห์ข้อมูล
- 7) ความอยากรู้อยากเห็น และจินตนาการ

ซึ่งทั้งหมดล้วนเป็นทักษะที่ต้องส่งเสริมให้เกิดกับผู้เรียนในศตวรรษที่ 21 เพื่อเป็นพื้นฐานของการดำรงชีวิตในปัจจุบัน โดยใช้วิธีการจัดการเรียนรู้ผ่านชุดการทดลองการผลิตไบโอดีเซล อีกทั้งการทดลองนี้ผู้เรียนยังได้รับความรู้เรื่องพลังงานทางเลือก ซึ่งไบโอดีเซลเป็นพลังงาน ทางเลือกหนึ่งที่มีการสนับสนุนให้หันมาใช้กันในปัจจุบัน เป็นการส่งเสริมให้ผู้เรียนตระหนักถึงปัญหาการขาดแคลนพลังงาน และการหาแนวทางแก้ไข เกิดความรับผิดชอบต่อสังคม มีจิตสำนึกต่อสิ่งแวดล้อม เป็นส่วนหนึ่งของการสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน และสิ่งแวดล้อมด้วยการออกแบบการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์โดยใช้ชุดการทดลองแบ่งเป็น 2 การทดลอง ได้แก่

การทดลองที่ 1 เรื่องการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน: ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว

การทดลองนี้เหมาะสำหรับนักเรียนระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย เน้นการผลิตไบโอดีเซลเบื้องต้น มีขั้นตอนที่ง่าย ไม่ยุ่งยาก เห็นผลการทดลองชัดเจน สามารถจัดการเรียนการสอนได้ในระยะเวลาสั้น ซึ่งผู้เรียนสามารถที่จะเรียนรู้ในเรื่องต่อไปนี้

- 1) ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เพื่อใช้ในการผลิตโอดีเซล
- 2) ปริมาณสารสัมพันธ์ ในการคำนวณสารเคมีในการทดลอง
- 3) ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน ปฏิกิริยาการเกิดสบู่
- 4) ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา
- 5) เทคนิคการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์

การทดลองที่ 2 เรื่องการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน: ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน

จากชุดการทดลองที่ 1 ผู้เรียนจะมีความรู้เรื่องการผลิตไบโอดีเซล โดยทราบหลักการของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน สารตั้งต้น และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยใช้หลักการพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้โดยอาศัยความแตกต่างค่าความหนาแน่นของสาร ส่วนในการทดลองที่ 2 จัดการเรียนการสอนการผลิตไบโอดีเซลคล้ายกับชุดที่ 1 แต่เน้นที่การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว และของแข็งเนื้อผสมในด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม และการให้ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติที่พิเศษของวัสดุนาโน ผู้เรียนสามารถที่จะเรียนรู้ในเรื่องต่อไปนี้

- 1) ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม
- 2) ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน
- 3) วัสดุนาโน
- 4) สมบัติของวัสดุนาโน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน สำหรับการผลิตไบโอดีเซล ภายใต้สภาวะที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวและตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม เพื่อนำไปออกแบบการทดลองสำหรับใช้จัดการเรียนรู้ที่สามารถตอบสนองการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ของนักเรียนในยุคศตวรรษที่ 21 โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว ตอนที่ 2 การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม และตอนที่ 3 การออกแบบการทดลองและการสร้างคู่มือการทดลอง

จากการศึกษาสภาวะที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 98 ที่สภาวะนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการแยกชั้นอย่างชัดเจนระหว่างไบโอดีเซล และกลีเซอรอล สามารถนำหลักการความหนาแน่นที่แตกต่างมาใช้พิจารณาการเกิดไบโอดีเซลได้ โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือ เช่น แก๊สโครมาโทกราฟี และนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ ซึ่งไม่มีในโรงเรียน นอกจากนี้ปริมาณกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นพบว่าความสัมพันธ์กับปริมาณไบโอดีเซลที่ได้สามารถใช้ระดับกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นในหลอดทดลองเป็นตัวแทนในการบ่งชี้ปริมาณไบโอดีเซลที่เกิดขึ้น จึงเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบการทดลองในชั้นเรียน

สามารถเตรียมนาโนแคปซูลออกไซด์ โดยกระบวนการโซล-เจล ในตัวทำละลายเอทิลีนไกลคอล โดยใช้เกลือแคลเซียมไนเตรต เป็นโลหะพรีเคอร์เซอร์ควบคุมสภาวะให้เป็นเบส โดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเติมสารช่วยเสถียรพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) เมื่อนำมาวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่เตรียมได้มีขนาด 19.24 ± 9.93 นาโนเมตร และศึกษาความแรงของเบส โดยใช้ Hammett อินดิเคเตอร์ คือ ฟีนอล์ฟทาลีน และ 4-ไนโตรอนิลีน พบว่ามีค่าความแรงของเบสในช่วง $9.8 < H_- < 15$ การทดลองศึกษาสภาวะที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล พบว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับนำมาออกแบบชุดการทดลอง คือ ใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ได้ร้อยละไบโอดีเซล เท่ากับ 99

จากนั้นนำสภาวะที่เหมาะสมมาใช้เป็นแนวทางการออกแบบบทปฏิบัติการสำหรับนักเรียนในระดับมัธยมศึกษาต่อไป โดยเน้นการทดลองที่ง่าย ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาสั้น และสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาได้อย่างชัดเจนมาออกแบบการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์โดยใช้ชุดการทดลองและสร้างคู่มือการทดลองแบ่งเป็น 2 การทดลอง ได้แก่

การทดลองที่ 1 เรื่องการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน:

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว

การทดลองที่ 2 เรื่องการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน:

ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน

การทดลองที่ออกแบบเป็นการส่งเสริมทักษะการเรียนรู้ให้เกิดขึ้นกับผู้เรียนในศตวรรษที่ 21 เพื่อเป็นพื้นฐานของการดำรงชีวิตในปัจจุบัน ทำให้ให้ผู้เรียนตระหนักถึงปัญหาการขาดแคลนพลังงาน และการหาแนวทางแก้ไข เกิดความรับผิดชอบต่อสังคม มีจิตสำนึกต่อสิ่งแวดล้อม เป็นส่วนหนึ่งของการสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน และสิ่งแวดล้อมด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ไม่เสถียรเมื่อสัมผัสกับอากาศเป็นระยะเวลานาน ๆ ต้องมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ความเสถียรต่อสิ่งแวดล้อมทั่วไป
2. ควรมีการศึกษากับน้ำมันชนิดอื่น ๆ เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันรำข้าว เป็นต้น

บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2558). *ร่างรายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม ปี 2557*.
- กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2555). *แผนจัดการคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2555-2559*. สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- คณะกรรมการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร. (2545). *พลังงานทดแทน เอทานอลและไบโอดีเซล*. กรุงเทพฯ: แปลน พรินติ้ง
- จตุพร วิชาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. (2547). *การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐาน และการประยุกต์*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- นิธิยา รัตนานนท์. (2553). *เคมีอาหาร*. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ระวีวรรณ สิทธิโอสด. (2555). *เคมีอินทรีย์พื้นฐาน* (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. *สถานการณ์พลังงานไทย ปี 2557*. วันที่ค้นข้อมูลวันที่ 8 สิงหาคม 2558 เข้าถึงได้จาก <http://www.eppo.go.th>
- Aslani, A. (2012). Microscopy Methods in Nanochemistry. *Current Microscopy Contributions to Advances in Science and Technology*, 1291-1311.
- Azonano. (2013). *Calcium Oxide (CaO) Nanoparticles-Properties, Applications*. Retrieved form <http://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3365>.
- Behnia, M. S., Emerson, D. W., Steinberg, S. M., Alwis, R. M., Duenas, J. A., & Serafino, J. O. (2011). A Simple, Safe Method for Preparation of Biodiesel. *Journal of chemical education*, 88, 1290-1292.
- Boey, P., Pragas, M. G., & Hamid, S. (2011). Performance of calcium oxide as a heterogeneous catalyst in biodiesel production: a review. *Chemical Engineering Journal*. 168, 15-22.
- Fukada, H., Kondo, A., & Noda, H. (2001). Review biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92, 405-416.
- Gelbard, G., Bre's, O., Bargas, R. M., Vielfaure, F., & Schuchardt, U. F. (1995) ¹H nuclear magnetic resonance determination of the yield of the transesterification of rapeseed oil with methanol. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 72(10), 1239-1241.

- Gerpen, J. V. (2005). Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*, *86*, 1097-1107.
- Ghias, M. & Malekzadeh, A. (2012). Synthesis of CaCO₃ nanoparticles via citrate method and sequential preparation of CaO and Ca(OH)₂ nanoparticles. *Crystal Research and Technology*, *47*, 471-478.
- Hong, I. K., Park, J. W., Kim, H., & Lee, S. B. (2014). Alcoholysis of canola oil using a short-chain (C1-C3) alcohols. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *20*, 3689-3694.
- Ibrahim, H., Ahmed, A. S., Bugaje, I. M., Mohammed, D., & Ugwumma, C. D. (2013). Synthesis of Bulk Calcium Oxide (CaO) Catalyst and its Efficacy for Biodiesel Production. *Journal of Energy Technologies and Policy*, *3*(12), 14-16.
- Isahak, W., Ismail, M., Jahim, J. M., Salimon, J., & Yarmo, M. A. (2010) Transesterification of Palm oil using nanocalcium oxide as a solid base catalyst. *World Applied Sciences Journal*, *9*, 17-22.
- Knothe, G. (2000). Monitoring a progressing transesterification reaction by fiber-optic color near infrared spectroscopy with correlation to ¹H nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *77*, 489-493.
- Kondo, A. & Noda, H. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Bioscience and Bioengineering*, *92*, 405-416.
- Kouzu, M., Kasuno, T., Tajika, M., Sugimoto, Y., Yamanaka, S., & Hidaka, J. (2008). Calcium oxide as a solid base catalyst for transesterification of soybean oil and its application to biodiesel production. *Fuel*, *87*, 2798-2806.
- Kouzu, M., Kasuno, T., Tajika, M., Yamanaka, S., & Hidaka, J. (2008). Active phase of calcium oxide used as solid base catalyst for transesterification of soybean oil with refluxing methanol. *Applied Catalysis A: General*, *334*, 357-365.
- Kouzu, M. & Hidaka, J. (2012). Transesterification of vegetable oil into biodiesel catalyzed by CaO: A review. *Fuel*, *93*, 1-12.
- Lam, M. K., Lee, K. T., & Mohamed, A. R. (2010). Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review. *Biotechnology Advances*, *28*, 500-518.

- Leung, D. Y. C. & Guo, Y. (2006). Transesterification of neat and used frying oil: Optimization for biodiesel production. *Fuel Processing Technology*, 87(10), 883-890.
- Liu, X., He, H., Wang, Y., Zhu, S., & Piao, X. (2008). Transesterification of soybean oil to biodiesel using CaO as a solid base catalyst. *Fuel*, 87, 216-221.
- Lianyuan, W. & Jichu, Y. (2006). Transesterification of soybean oil with nano MgO in supercritical and subcritical methanol. *Fuel*, 86(3), 328-333.
- Meher, L. C., Kulkarni, M. G., Dalai, A. K., & Naik, S. N. (2006). Transesterification of karanja (*Pongamia pinnata*) oil by solid basic catalysts. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 108(5), 389-397.
- Ngamcharussrivichai, C., Totarat, P., & Bunyakiat, K. (2008). Ca and Zn mixed oxide as a heterogeneous base catalyst for transesterification of palm kernel oil. *Applied Catalysis A: General*. 341, 77-85.
- Phornphisutthimas, S. (2013). Learning Management of Science in 21st Century. *Journal of Research. Unit on Science and Technology and Environment for Learning*, 4(1), 55-63.
- Pohl, N. B., Streff, J. M., & Brokman, S. (2012). Evaluating sustainability: soap versus biodiesel production from plant oils. *Journal of chemical education*, 89, 1053-1056.
- Qiu, F., Li, Y., Yang, D., Li, X., & Sun, P. (2011). Heterogeneous solid base nanocatalyst: Preparation, characterization and application in biodiesel production. *Bioresource Technology*, 102, 4150-4156.
- Reddy, C., Reddy, V., Oshel, R., & Verkade, J. G. (2006). Room temperature conversion of soybean oil and poultry fat to biodiesel catalyzed by nanocrystalline calcium oxides. *Energy & Fuels*, 20, 1310-1314.
- Refaat, A. A. (2011). Biodiesel production using solid metal oxide catalyst. *Journal of Environmental Science and Technology*, 8(1), 203-221.
- Reyero, I., Arzamendi, G., & Gandia, L. M. (2014). Heterogenization of the biodiesel synthesis: CaO and novel calcium compounds as transesterification catalysts. *Chemical Engineering Research and Design*, 92, 1519-1530.
- Satyarthi, J. K., Srinivas, D., & Ratnasalmy, P. (2009). Estimation of Free Fatty Acid content in oils, fats, and biodiesel by ¹H-NMR spectroscopy. *Energy & Fuels*, 23, 2273-2277.

- Tay, B., Ping, Y., & Yusof, M. (2009). Characteristics and Properties of Fatty Acid Distillates from Palm Oil. *Oil Palm Bulletin*, 59, 5-11.
- Tedsree, K. (2013). Nanocatalyst: Next generation of catalytic technology. *Burapha science journal*, 18(2) 274-280.
- Toplis, R., (2011). *How Science Works: Exploring Effect Pedagogy and Practice*. (ed.) New York: Routledge.
- Virginie, M. (2011). *OECD Environmental Outlook to 2050*. The OECD Environment Directorate (ENV) and the PBL Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL).
- Viriya-empikul, N., Krasae, P., Puttasawat, B., Yoosuk, B., Chollacoop, N., & Faungnawakij, K. (2009). Waste shell of mollusk and egg as biodiesel production catalysts. *Bioresource technology*, 101, 3765-3767.
- Wagner, T. (2008). *The Global Achievement Gap: When Even Our Best Schools Don't Teach the New Survival Skills Our Children Need and What We Can Do about It*. New York: Basic Books.
- Yang, J., Xu, C., Li, B., Ren, G., & Wang, L. (2013). Synthesis and determination of biodiesel: an experiment for high school chemistry laboratory. *Journal of chemical education*, 90, 1362-1364.
- Zhu, H., Wu, Z., Chen, Y., Zhang, P., Duan, S., & Liu, X. (2006) Preparation of biodiesel catalyzed by solid super base of calcium oxide and its refining process. *Chinese Journal of Catalysis*, 27, 391-396.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

คู่มือการทดลองชุดที่ 1

เรื่อง การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน : ตัวเร่งปฏิกิริยาการเร่งแบบเนื้อเดียว

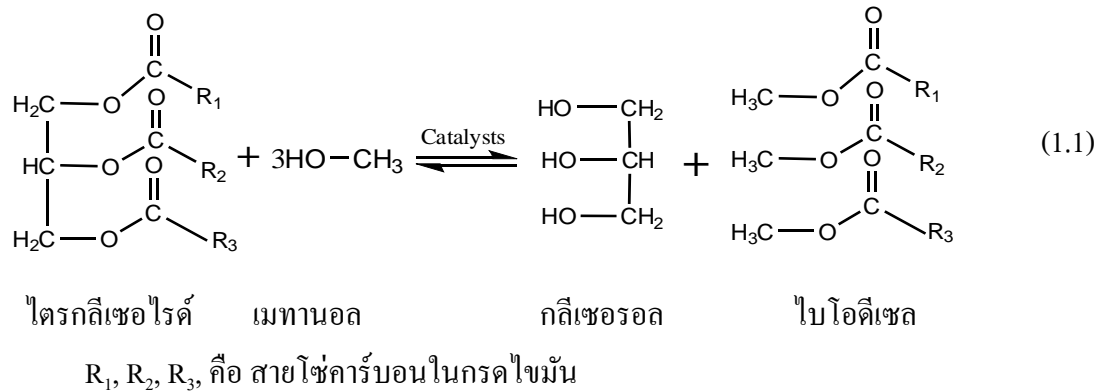
Biodiesel Production from Transesterification Reaction: Homogeneous Catalysis

บทนำ

ปัจจุบันทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย กำลังเผชิญกับปัญหาการขาดแคลนพลังงาน และปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการใช้พลังงาน โดยทั่วไปเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ให้พลังงานได้แก่ เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งได้จากน้ำมัน ถ่าน และแก๊สธรรมชาติ ซึ่งจัดเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของประชากรโลกอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับการพัฒนาทางด้านวิทยาการและเทคโนโลยี ตลอดจนการขยายตัวของเศรษฐกิจ และอุตสาหกรรมต่าง ๆ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทำให้ความต้องการใช้พลังงานของมนุษย์เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคตข้างหน้าจึงทวีคูณขึ้น การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เพื่อกำเนิดพลังงานซึ่งใช้หลักการเผาไหม้ ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา จากการปลดปล่อยควัน เหม่า และแก๊สพิษ เช่น ไนโตรเจนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ยังเป็นสาเหตุหนึ่งของภาวะโลกร้อนเนื่องจากการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของปัญหาโลกร้อน (Global warming) ปัญหาการขาดแคลนพลังงาน และปัญหาโลกร้อนจึงเป็นปัญหาที่มนุษยชาติจะต้องเผชิญ แนวทางการแก้ไขก็คือ การหาแหล่งพลังงานใหม่เพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล และที่สำคัญต้องเป็นแหล่งพลังงานสะอาด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงจะทำให้เกิดความยั่งยืนด้านพลังงาน และสิ่งแวดล้อมควบคู่กัน เพื่อเป็นการแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล จึงมีการสนับสนุนส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทางเลือกอื่น ๆ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม รวมทั้งพลังงานหมุนเวียนจากชีวมวล ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้ได้ไม่มีวันหมด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นวิธีหนึ่งในการสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน และสิ่งแวดล้อม เป็นการรักษาเงินตราต่างประเทศ สร้างความมั่นคง และสามารถพึ่งพาตนเองด้านพลังงานได้

ไบโอดีเซล (biodiesel) เป็นพลังงานทางเลือกที่ผลิตได้จากแหล่งชีวมวล เช่น ไขมัน หรือน้ำมัน ปัจจุบันทั่วโลกมีการสนับสนุนให้มีการนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล สำหรับประเทศไทยได้มีการจัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ส่งเสริมให้มีการผลิตไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทดแทน 25% ใน 10 ปี (พ.ศ. 2555-2564)

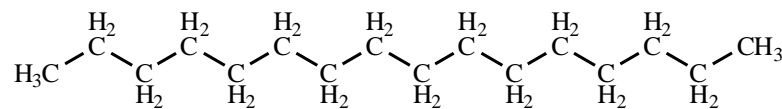
ไบโอดีเซลผลิตได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมัน สัตว์กับแอลกอฮอล์ โดยมีไตรกลีเซอไรด์เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ และกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไตรกลีเซอไรด์ในไขมันหรือน้ำมันจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกลีเซอรอล และ แอลคิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล (Yang et.al, 2013; Garpen, 2005) ดังสมการที่ 1.1 (Yang et.al, 2013)



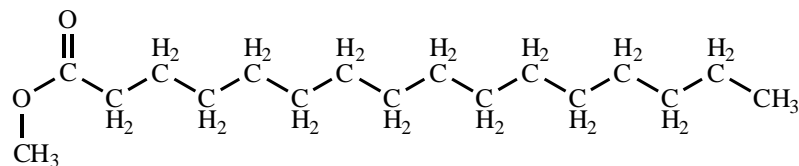
จากสมการที่ 1.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันใช้ไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบ ในน้ำมันปาล์ม (ค่าความหนาแน่น 0.919 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) เป็นสารตั้งต้น 1 โมล ทำปฏิกิริยากับเมทานอล (ค่าความหนาแน่น 0.79 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) 3 โมล เกิดผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซล (ค่าความหนาแน่น 0.91 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) จำนวน 3 โมล และกลีเซอรอล (ค่าความหนาแน่น 1.261 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) 1 โมล การเกิดปฏิกิริยาได้นั้นต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กัน เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นต้น นอกจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการเกิดไบโอดีเซลแล้วนั้นยังมีปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อปริมาณการเกิดของไบโอดีเซล ได้แก่ อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เวลาการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิ เป็นต้น ถ้าปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ เมื่อตั้งทิ้งไว้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเกิดการแยกชั้นสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า สำหรับการพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ว่าส่วนใดเป็นไบโอดีเซลหรือกลีเซอรอลนั้น จะอาศัยหลักค่าความหนาแน่นของสารแต่ละชนิด นอกจากนั้นปริมาณของกลีเซอรอลยังสามารถเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณของไบโอดีเซลได้อีกด้วย เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ถ้าปริมาณกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากแสดงว่ามีปริมาณของไบโอดีเซลเกิดขึ้นมากด้วย จากสมการหากปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์ 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์จะได้ไบโอดีเซล 3 โมล และกลีเซอรอล 1 โมล เป็นผลิตภัณฑ์

ไบโอดีเซลมีโครงสร้างคล้ายกับน้ำมันดีเซลจึงสามารถใช้ได้ในเครื่องยนต์น้ำมันดีเซลทุกชนิด การใช้ไบโอดีเซลสามารถใช้ได้ 100% ที่เรียกว่า ไบโอดีเซล B100 เป็นไบโอดีเซลที่ไม่มีส่วนผสมกับน้ำมันดีเซลเลย หรืออาจมีการผสมกับน้ำมันดีเซลเป็นสูตรต่าง ๆ เช่น ไบโอดีเซล สูตร B5 จะผสมไบโอดีเซลร้อยละ 5 เข้ากับน้ำมันดีเซลร้อยละ 95 และไบโอดีเซล สูตร B20 จะผสมไบโอดีเซลร้อยละ 20 และน้ำมันดีเซลร้อยละ 80 นอกจากนี้ยังสามารถเติมไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซลสลับไปมาได้โดยไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์

อย่างไรก็ตาม น้ำมันดีเซล และไบโอดีเซล มีองค์ประกอบ และมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 1.1



ก) น้ำมันดีเซล



ข) ไบโอดีเซล

ภาพที่ 1.1 ก) โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันดีเซล ข) โครงสร้างของไบโอดีเซล

จากภาพที่ 1.1 ไบโอดีเซลมีโครงสร้าง โมเลกุลที่คล้ายกับน้ำมันดีเซลบางส่วน และแตกต่างกันบางส่วน ส่งผลให้ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล ซึ่งบางคุณสมบัติเป็นข้อได้เปรียบ และบางคุณสมบัติเป็นข้อเสียเปรียบ เมื่อนำไบโอดีเซลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ที่ได้จากเชื้อเพลิงปิโตรเลียม (คณะกรรมการสิทธิการ สภาผู้แทนราษฎร, 2545) ได้ดังนี้

1. ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ทำให้ไอเสียที่ปล่อยออกจากเครื่องยนต์ไม่ก่อให้เกิดภาวะฝนกรด เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เมื่อถูกเผาไหม้แล้ว กำมะถันในน้ำมันดีเซล จะเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดซัลฟิวริก เกิดเป็นมลพิษทางอากาศ

2. น้ำมันดีเซล ไม่มีออกซิเจนอยู่ใน โครงสร้าง โมเลกุล และมีองค์ประกอบของสาร Aromatic compound ถึงร้อยละ 20-40 ขณะที่ไบโอดีเซลไม่มีสารประกอบประเภท Aromatic

compound แต่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลถึงร้อยละ 10-12 ทำให้เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ไอเสียที่เกิดขึ้นมีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก และมีวันดำต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซล สามารถลดควันดำได้มากกว่าร้อยละ 40

3. ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงมีค่าการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ต่ำกว่า น้ำมันดีเซล และมีความปลอดภัยในการขนส่ง

4. ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ได้ดี

5. ไบโอดีเซลป้องกันการน็อกของเครื่องยนต์ได้ดีกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากมีค่าซีเทนสูงกว่าน้ำมันดีเซล

จากข้อดีของไบโอดีเซลจึงทำให้สามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลโดยไม่ส่งผลกระทบต่อเครื่องยนต์และสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามการใช้ไบโอดีเซล มีข้อจำกัดคือ ทำให้เครื่องยนต์มีกำลังต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซล ประมาณร้อยละ 3 จึงต้องมีการสิ้นเปลืองพลังงานเพิ่มขึ้น และรถยนต์ที่ใช้ไบโอดีเซลจะมีการบำรุงรักษาดีกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล

การจัดกิจกรรมการทดลอง

คำชี้แจง

1. นักเรียนศึกษาเอกสารคู่มือการทดลอง เรื่องการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน
2. นักเรียนแบ่งกลุ่ม 10 กลุ่ม โดยในกลุ่มประกอบไปด้วยนักเรียน เก่ง ปานกลาง อ่อน
3. นักเรียนแต่ละกลุ่มร่วมกันอภิปรายเรื่องพลังงานทดแทน เพื่อจะนำเข้าสู่เรื่องไบโอดีเซล

วัตถุประสงค์การทดลอง

เพื่อศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว

คำถามก่อนการทดลอง

1. ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลใช้สารใดเป็นสารตั้งต้น และได้สารใดเป็นผลิตภัณฑ์ (แนวตอบ ในการผลิตไบโอดีเซล จะใช้ไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบในไขมันหรือน้ำมัน ทำปฏิกิริยากับ แอลกอฮอล์ เกิดผลิตภัณฑ์เป็น ไบโอดีเซล และกลีเซอรอล)

2. สารใดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล
(แนวตอบ โซเดียมไฮดรอกไซด์)
3. ปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อปริมาณไบโอดีเซลที่เกิดขึ้น
(แนวตอบ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ เวลาทำปฏิกิริยา)
4. นักเรียนทราบได้อย่างไรว่ามีไบโอดีเซลเกิดขึ้น และมีปริมาณมากน้อยเพียงใด
(แนวตอบ สังเกตชั้นกลีเซอรอล เพราะกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซล และวัดความสูงของชั้นกลีเซอรอล ถ้าความสูงของชั้นกลีเซอรอลมากแสดงว่ามีไบโอดีเซลมากด้วย)
5. นักเรียนใช้หลักการใดในการยืนยันผลการทดลองว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นไบโอดีเซล

(แนวตอบ หลักความหนาแน่นของสาร สารใดที่มีความหนาแน่นสูงจะอยู่ชั้นล่าง สารใดที่มีความหนาแน่นต่ำจะลอยอยู่ด้านบน โดยความหนาแน่นของเมทานอล (0.79 g/cm^3) มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำมันปาล์ม ($0.91 - 0.925 \text{ g/cm}^3$) จึงทำให้เห็นชั้นของเมทานอลลอยอยู่ชั้นบนเหนือน้ำมันปาล์ม ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นไบโอดีเซล ($0.85 - 0.90 \text{ g/cm}^3$) มีความหนาแน่นน้อยกว่ากลีเซอรอล (1.26 g/cm^3) จึงทำให้เห็นชั้นของไบโอดีเซลลอยอยู่เหนือชั้นกลีเซอรอล)

อุปกรณ์และสารเคมี

อุปกรณ์

1. ชุดรีฟลักซ์ขนาดเล็ก ประกอบด้วยขวดก้นกลม 3 คอ ขนาด 25 มิลลิลิตร คอนเดนเซอร์ เทอร์โมมิเตอร์ เต้าแม่เหล็กให้ความร้อน พร้อมหมุมให้ความร้อน แท่งแม่เหล็ก สำหรับคนสาร และเครื่องตรวจวัด (probe) ควบคุมอุณหภูมิ และปั้มน้ำขนาดเล็กเพื่อใช้เป็นระบบทำความเย็น
2. กระจกบอควง (cylinder) ขนาด 10 มิลลิลิตร จำนวน 2 อัน
3. หลอดทดลองขนาดกลาง (test tube) จำนวน 2 หลอด
4. บีกเกอร์ (beaker) ขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 1 ใบ.
5. เครื่องชั่งสาร (analytical balance) จำนวน 1 เครื่อง
6. แท่งแก้วคนสาร (starring rod) จำนวน 1 อัน
7. ช้อนตักสาร (spatula) จำนวน 1 อัน

สารเคมี

1. น้ำมันปาล์ม (palm oil) น้ำหนัก 817.00 กรัมต่อ โมล
2. เมทานอล (methanol; CH_3OH) เป็นของเหลวใสไม่มีสี น้ำหนัก 32.00 กรัมต่อ โมล ความหนาแน่น 0.79 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร จุดเดือด 64.7 องศาเซลเซียส
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide; NaOH) ของแข็งสีขาว น้ำหนัก 40.00 กรัมต่อ โมล

สารเคมีอันตราย: เมทานอล ติดไฟได้ และเป็นพิษต่อตา จึงควรสวมแว่นตากันสารเคมี โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารทำให้เกิดการระคายเคือง และกัดกร่อน จึงควรหลีกเลี่ยงการสัมผัส และควรสวมถุงมือขณะทำการทดลอง

คำนวณก่อนการทดลอง

1. อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม _____
2. จำนวนโมลของน้ำมันปาล์มที่ใช้ทำปฏิกิริยา _____
3. ปริมาตรของน้ำมันปาล์มที่ใช้ทำปฏิกิริยา (cm^3) _____
4. น้ำหนักของน้ำมันปาล์มที่ใช้ทำปฏิกิริยา (g) _____
5. จำนวนโมลของเมทานอลที่ใช้ทำปฏิกิริยา _____
6. ปริมาตรของเมทานอลที่ใช้ทำปฏิกิริยา (cm^3) _____
7. น้ำหนักของเมทานอลที่ใช้ทำปฏิกิริยา (g) _____
8. น้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ทำปฏิกิริยา (g) _____

ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล มีดังนี้

สถานะที่ใช้ในการทดลอง

อัตราส่วน โดยโมลน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6

ปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่ละกลุ่มแตกต่างกันดังนี้

กลุ่มที่	ปริมาณ NaOH (% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม)	กลุ่มที่	ปริมาณ NaOH (% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม)
1	0.1	6	0.6
2	0.2	7	0.7

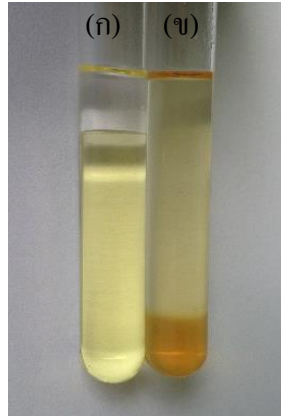
กลุ่มที่	ปริมาณ NaOH (% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม)	กลุ่มที่	ปริมาณ NaOH (% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม)
3	0.3	8	0.8
4	0.4	9	0.9
5	0.5	10	1.0

1. จัดเตรียมอุปกรณ์ชุดรีฟลักซ์ และระบบน้ำหล่อเย็น โดยใช้ปั๊มน้ำขนาดเล็กสำหรับตู้ปลา ดังภาพที่ 1.2



ภาพที่ 1.2 ชุดรีฟลักซ์

2. ตวงน้ำมันปาล์ม 15.0 มิลลิลิตร ใส่ลงขวดสามคอขนาด 25.0 มิลลิลิตร
3. ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามน้ำหนักที่กำหนด ใส่ในบีกเกอร์ เดิมเมทานอล ปริมาตร 4.0 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนสารจนกระทั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายหมด
4. เทสารละลายผสมที่เตรียมได้ในข้อ 3 ลงในขวดสามคอที่มีน้ำมันปาล์ม นำไปรีฟลักซ์ โดยปั่นกวนที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
5. เมื่อครบ 10 นาที เทสารผสมที่ได้จากการทำปฏิกิริยาลงในหลอดทดลอง ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที สังเกตการแยกชั้นของไบโอดีเซลกับกลีเซอรอล ดังภาพ 1.3



ภาพที่ 1.3 ภาพถ่าย ก) ก่อนทำปฏิกิริยา ข) หลังทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันน้ำมันปาล์ม

6. วัดความสูงของชั้นกลีเซอรอล บันทึกผลการทดลอง

7. ล้างอุปกรณ์การทดลอง และเก็บเข้าที่เดิมให้เรียบร้อย

7. นักเรียนเขียนรายงานการทดลอง บันทึกผลการทดลอง อภิปรายผลการทดลอง และสรุปผลการทดลองของแต่ละกลุ่ม

8. นักเรียนแต่ละกลุ่มนำเสนอหน้าชั้นเรียน โดยนำหลอดทดลองที่มีไบโอดีเซลมาเปรียบเทียบกันทุกกลุ่มพร้อมทั้งร่วมกันอภิปรายผลการทดลองที่เกิดขึ้น

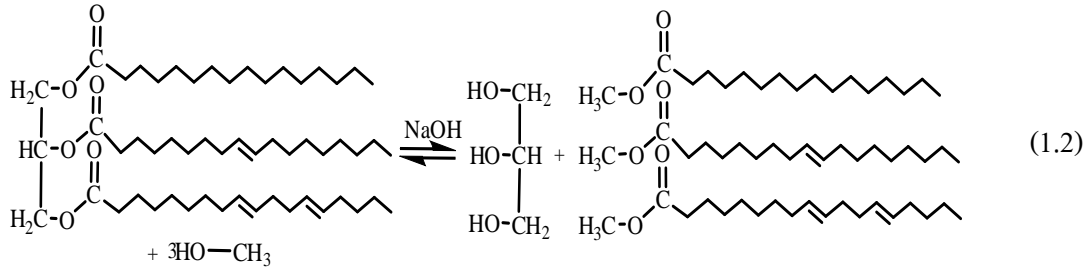
ข้อเสนอแนะในการทดลอง

ในการทำการทดลองไม่ควรให้อุณหภูมิสูงเกิน 65 องศาเซลเซียส เนื่องจากจุดเดือดของเมทานอล เท่ากับ 64.7 องศาเซลเซียส จะทำให้มีโอกาที่ไอของเมทานอลที่ไม่ถูกควบแน่นออกมาได้มากขึ้น

ตารางบันทึกผลการทดลอง

สาร	ผลการเปลี่ยนแปลง	ความสูงชั้นกลีเซอรอล (cm)
น้ำมันปาล์ม + เมทานอล		

การคำนวณหาปริมาณไบโอดีเซล



จากสมการที่ 1.2 ตามปริมาณสารสัมพันธ์จะใช้อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:3 โดยไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล ทำปฏิกิริยาพอดีกับ เมทานอล 3 โมล ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซล 3 โมล และกลีเซอรอล 1 โมล อย่างไรก็ตาม เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ การเติมเมทานอลในปริมาณมากเกินไปจะช่วยผลักดันให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้าได้มากขึ้น จึงใช้อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 ดังนั้นไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันปาล์มจึงเป็นสารกำหนดปริมาณ

กำหนดค่า ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์ม 0.919 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
ความหนาแน่นของกลีเซอรอล 1.261 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

หาผลได้ตามทฤษฎี

จากสมการ ไตรกลีเซอไรด์ 856 กรัม	เกิดกลีเซอรอล 92 กรัม
ถ้าไตรกลีเซอไรด์ 13.785 กรัม (15 cm ³)	เกิดกลีเซอรอล 1.48 กรัม

หาผลได้จากการทดลอง

คำนวณหาปริมาณของกลีเซอรอลจากการวัดความสูงของชั้นกลีเซอรอลในหลอดทดลอง แล้วนำมาคำนวณหาปริมาตรกลีเซอรอล แล้วเปลี่ยนปริมาตรให้เป็นน้ำหนัก (กรัม)

เช่น วัดความสูงของชั้นกลีเซอรอลในหลอดทดลองได้ เท่ากับ 1.3 เซนติเมตร ขนาดรัศมีของหลอดทดลอง เท่ากับ 0.55 เซนติเมตร

คำนวณจากสูตรการหาปริมาตรทรงกระบอก

$$\text{ปริมาตรทรงกระบอก} = \pi r^2 h$$

เมื่อ r คือ รัศมีทรงกระบอก

h คือ ความสูงของทรงกระบอก

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ปริมาตรกลีเซอรอล} &= (3.14)(0.53\text{cm})^2(1.3\text{cm}) \\ &= 1.15 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

เปลี่ยนจากปริมาตรให้เป็นมวล โดยใช้ค่าความหนาแน่น จะได้

$$\begin{aligned} \text{มวลของกลีเซอรอล (กรัม)} &= (1.15 \text{ cm}^3)(1.261 \text{ g/cm}^3) \\ &= 1.45 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้นจากการทดลองมีกลีเซอรอลเกิดขึ้น เท่ากับ 1.55 กรัม
หาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์} &= \frac{\text{ผลได้จริง}}{\text{ผลได้ตามทฤษฎี}} \times 100 \\ &= \frac{1.45}{1.48} \times 100 \\ &= 97.98 \\ &\approx 98 \end{aligned}$$

ดังนั้นมีร้อยละการเกิดของไบโอดีเซล เท่ากับ ร้อยละ 97.98 หรือ \approx ร้อยละ 98 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าร้อยละการเปลี่ยนไปของไตรกลีเซอไรด์เป็นไบโอดีเซลที่วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ที่มีค่าร้อยละของไบโอดีเซล เท่ากับ 99

คำถามหลังการทดลอง

- นักเรียนทราบได้อย่างไรว่ามีไบโอดีเซลเกิดขึ้น
(แนวตอบ เห็นการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น)
- ถ้านักเรียนเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาให้มากกว่า 10 นาที ผลจะเป็นอย่างไร
(แนวตอบ เกิดไบโอดีเซลมากขึ้น จนกระทั่งเกิดสมบูรณ์หรือเกือบสมบูรณ์)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่ใดในการผลิตไบโอดีเซล
(แนวตอบ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา)
- ปัจจัยใดที่มีผลต่อปริมาณไบโอดีเซลที่เกิดขึ้น
(แนวตอบ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้าใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เหมาะสมจะเห็นกลีเซอรอลปริมาณสูง และกลีเซอรอลเป็นตัวที่บ่งบอกถึงปริมาณไบโอดีเซลที่เกิดขึ้น)
- นักเรียนใช้หลักการใดในการยืนยันผลการทดลองว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นไบโอดีเซล
(แนวตอบ หลักความหนาแน่นของสาร สารใดที่มีความหนาแน่นสูงจะอยู่ชั้นล่าง สารใดที่มีความหนาแน่นต่ำจะลอยอยู่ด้านบน โดยความหนาแน่นของเมทานอล (0.79 gcm^{-3}) มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำมันปาล์ม ($0.91\text{-}0.925 \text{ gcm}^{-3}$) จึงทำให้เห็นชั้นของเมทานอลลอยอยู่ชั้นบนเหนือ

น้ำมันปาล์ม ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นไบโอดีเซล ($0.85-0.90 \text{ gcm}^{-3}$) มีความหนาแน่นน้อยกว่า กลีเซอรอล (1.26 gcm^{-3}) จึงทำให้เห็นชั้นของไบโอดีเซลลอยอยู่เหนือชั้นกลีเซอรอล)

6. นักเรียนจะนำความรู้เรื่องไบโอดีเซลไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้อย่างไร
(แนวตอบ นำความรู้ไปผลิตไบโอดีเซลอย่างง่ายเพื่อใช้ในเครื่องยนต์ เช่น เครื่องปั้มน้ำในการเกษตร เป็นต้น)

เอกสารอ้างอิง

คณะกรรมการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร.(2545). *พลังงานทดแทน เอทานอล และไบโอดีเซล*. กรุงเทพฯ: แปลน พรินติ้ง

Gerpen, J., V. (2005). Biodiesel processing and production. *Fuel. Process. Technol*, 86, 1097-1107.

Yang, J., Xu, C., Li, B., Ren, G. & Wang, L. (2013). Synthesis and determination of biodiesel: an experiment for high school chemistry laboratory. *Journal of chemical education*, 90, 1362-1364.

คู่มือการทดลองชุดที่ 2

เรื่อง การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน : ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน

Biodiesel Production from Transesterification Reaction: Nanocatalyst

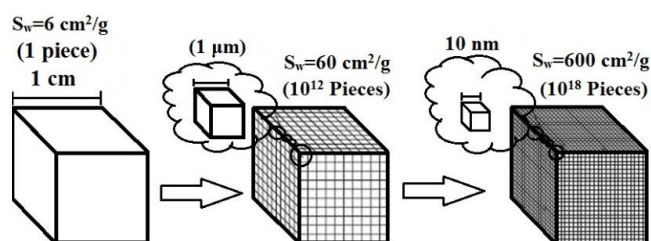
บทนำ

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลผลิตที่เร็ว และ สมบูรณ์ขึ้น ปัจจุบัน โซเดียมไฮดรอกไซด์ ได้รับการยอมรับว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพ สูงในการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังกล่าว ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา โดยก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมาก เนื่องจากการล้างตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากไบโอดีเซล นอกจากนี้ยังไม่สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ได้ ในขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อผสมมีข้อดี คือ สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจาก ไบโอดีเซลได้ง่าย สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และเป็นมิตรกับระบบนิเวศวิทยา ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื้อผสมที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และสังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น เนื่องจากโลหะออกไซด์เหล่านี้มีสมบัติเป็นเบส แคลเซียม ออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมชนิดหนึ่งที่มีการศึกษากันมากในการผลิตไบโอดีเซล มีราคา ถูก และมีความสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีในสภาวะของการผลิตไบโอดีเซล (Boey et al., 2011; Kouzu et al., 2008) มีการละลายในเมทานอลต่ำ ง่ายต่อการจัดการมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา เนื้อเดียว เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Ibrahim et al., 2013) และยังสามารถทำปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิต่ำ ที่ความดันบรรยากาศ (Reddy et al., 2006) แต่มีข้อจำกัดในเรื่องประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมจะไม่สามารถละลายเป็นเฟสเดียวกับน้ำมันได้เหมือนกับตัวเร่งปฏิกิริยา เนื้อเดียว ปฏิกิริยาจึงเกิดได้เฉพาะที่บริเวณพื้นผิว ทำให้ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณมาก สิ้นเปลือง และอาจเกิดผลข้างเคียงต่อปฏิกิริยาได้ ดังนั้นเพื่อจะลดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และยังคง สามารถทำให้เกิดไบโอดีเซลได้ดี ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรมีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งทำได้โดยการลดขนาด อนุภาคให้อยู่ในระดับนาโนเมตร โดยการทดลองนี้จะให้ผู้เรียนได้เปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา เนื้อผสม แคลเซียมออกไซด์ 2 แบบ ได้แก่ อนุภาคขนาดใหญ่ และอนุภาคนาโน ผู้เรียนจะได้ เรียนรู้เกี่ยวกับสมบัติพิเศษของวัสดุนาโน โดยเฉพาะสมบัติในการเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน สามารถทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมช่องว่างระหว่างข้อดี และข้อเสีย ของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว และเนื้อผสม ด้วยลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโน คือ มีขนาดเล็ก อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง (surface to volume ratio) จึงช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างสารตั้งต้น

และตัวเร่งปฏิกิริยา และการกระจายตัวในรูปคอลลอยด์ในตัวกลาง ทำให้ง่ายต่อการแยกออกจากปฏิกิริยา เช่นเดียวกับตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม นอกจากนี้ประสิทธิภาพ และความจำเพาะในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยานาโนสามารถจัดการระดับอะตอมโดยการปรับแต่งสมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติทางเคมี เช่น ขนาด รูปร่าง องค์ประกอบ และลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Tedsree, 2013)

ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน จัดเป็นวัสดุนาโน (Nanomaterials) ประเภทหนึ่ง โดยทั่วไปมีขนาดเล็กในช่วง 1-100 นาโนเมตร สัณฐานที่ขึ้นจากการออกแบบ และควบคุมการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลในระดับนาโนเมตร ทำให้คุณสมบัติ และพฤติกรรมต่าง ๆ ของวัสดุที่มีขนาดเล็กเหล่านี้แตกต่างจากวัสดุนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ วัสดุนาโนมีพื้นที่ผิวสูงกว่าวัสดุกลุ่มก่อนที่มีมวลเท่ากันอย่างมหาศาล ปริมาณพื้นที่ผิวสามารถระบุในรูปพื้นที่ผิวทั้งหมดต่อหน่วยมวล (total surface area per unit of mass) เรียกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) อนุภาคนาโนมีพื้นที่ผิวต่อมวลสูงจึงมีปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมมาก เช่น รูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 1 cm^3 ซึ่งมีพื้นที่ผิวเท่ากับ $6 \text{ cm}^2/\text{g}$ เมื่อแบ่งออกเป็นขนาด 1 ไมโครเมตร จำนวนอนุภาคเพิ่มขึ้นเป็น 10^{12} อนุภาค และเมื่อแบ่งต่อไปถึงขนาด 10 นาโนเมตร มีจำนวนอนุภาคเพิ่มขึ้นเป็น 10^{18} อนุภาค และมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น $600 \text{ cm}^2/\text{g}$ ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวจำเพาะเมื่อวัสดุมีขนาดเล็กลง (Aslani, 2012)

การมีพื้นที่ผิวสูงมาก ทำให้สมบัติต่าง ๆ ที่ขึ้นกับปริมาณของอะตอมพื้นผิว เช่น ทองคำมีสีเหลืองทอง มันทาว มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1336 เคลวิน และไม่มีสมบัติเชิงแม่เหล็ก เมื่อสัมผัสอากาศสีจะไม่หมองและไม่เกิดสนิม เมื่อทองคำมีขนาดอนุภาคเล็กลงในระดับนาโนเมตร สมบัติต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นกลับแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด เช่น เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กประมาณ 10 นาโนเมตร ทองคำดูคล้ำแสงสีเขียวทำให้เห็นเป็นสีแดง มีจุดหลอมเหลวลดลงอย่างมาก และเมื่อมีขนาดประมาณ 2-3 นาโนเมตร ทองคำกลับแสดงสมบัติเชิงแม่เหล็ก นอกจากนี้ยังมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีเยี่ยม การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบเนื่องจากขนาด (size effect) โดยเมื่อขนาดของอนุภาคลดลงจนกระทั่งต่ำกว่าขนาดวิกฤติ (critical

size) ซึ่งโดยทั่วไปต่ำกว่า 100 นาโนเมตร สามารถส่งผลให้สมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเชิงแสง สมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงแม่เหล็ก และสมบัติทางเคมีแตกต่างจากสมบัติของ วัสดุกลุ่มก้อน

ปัจจุบันมีการนำวัสดุนาโนมาใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับ ชีวิตประจำวันมากมาย เช่นการ การใช้นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดกลิ่น แบคทีเรีย การ ผสมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในผงซักฟอก และอื่น ๆ ทำให้นาโนเทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาททำให้ ชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก เพื่อให้นักเรียนในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายมีความรู้เรื่องนาโน เทคโนโลยีในระดับพื้นฐาน โดยเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิว และ สมบัติของวัสดุนาโน โดยผ่านการทดลองเรื่อง ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนเพื่อการผลิตไบโอดีเซล จะช่วย ให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้เทคโนโลยีใหม่ ๆ ตอบสนองต่อการสร้างทักษะการเรียนรู้ทางวิทยาศาสตร์ ในยุคศตวรรษที่ 21 ต่อไป

การจัดกิจกรรมก่อนการทดลอง (30 นาที)

กิจกรรมก่อนการทดลองเป็นกิจกรรมที่จุดประกายความคิดเพื่อให้ผู้เรียน ได้มีความรู้ ความเข้าใจในเรื่องลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโน ที่ผู้เรียนสามารถจินตนาการถึงอนุภาคนาโนได้

กิจกรรมที่ 1 เรื่องอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface to Volume Ratio)

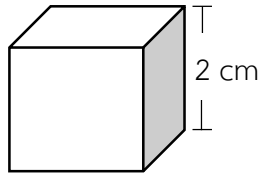
จุดประสงค์ เพื่อศึกษาอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของวัสดุนาโน

วัสดุอุปกรณ์

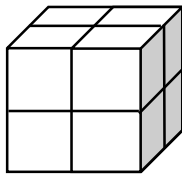
- 1) ดินน้ำมัน
- 2) มีดคัตเตอร์

วิธีการ

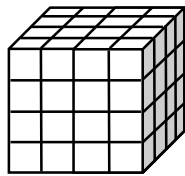
1. นักเรียนแบ่งกลุ่ม 8 กลุ่ม
2. นักเรียนแต่ละกลุ่มปั้นดินน้ำมันเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 2 เซนติเมตร พร้อมหา พื้นที่ผิว และปริมาตรของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์



3. ใช้มีดคัตเตอร์ตัดก้อนดินน้ำมันจากข้อที่ 2 ออกเป็น 8 ก้อน ที่มีขนาดเท่ากัน พร้อมทั้งหาพื้นที่ผิว และปริมาตรของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์



4. ใช้มีดคัตเตอร์ตัดก้อนดินน้ำมันจากข้อที่ 3 ออกเป็นก้อนละ 8 ก้อน ขนาดเท่ากัน จะได้ทั้งหมด 64 ก้อน พร้อมทั้งหาพื้นที่ผิว และปริมาตรของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์



5. นักเรียนวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของก้อนดินน้ำมัน (อนุภาค) กับอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร

ตารางบันทึกผลการทำกิจกรรม

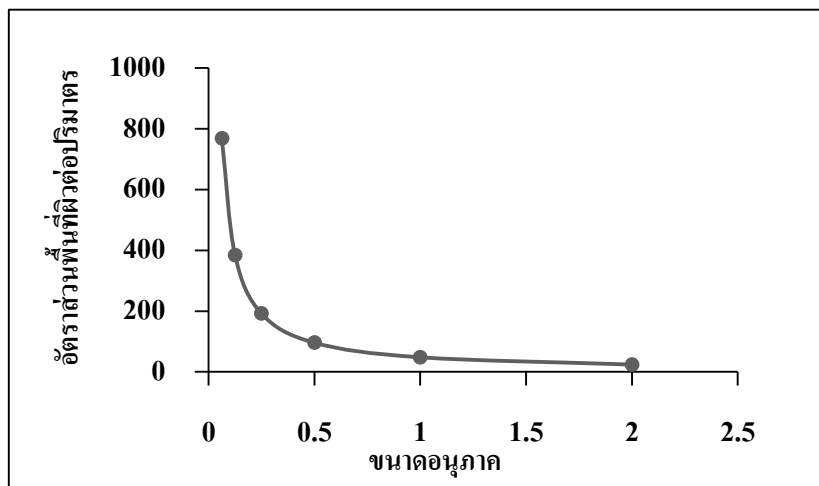
จำนวนก้อนดินน้ำมัน (ก้อน)	ขนาดก้อนดินน้ำมัน (cm)	พื้นที่ผิว (cm ²)	ปริมาตร (cm ³)	หมายเหตุ
1	2.0000	24	8	
8	1.0000	48	8	
64	0.5000	96	8	
512	0.2500	192	8	ได้จากการคำนวณ
4,096	0.1250	384	8	ได้จากการคำนวณ
32,768	0.0625	768	8	ได้จากการคำนวณ

สูตรการหาพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส พื้นที่ = (ด้าน)²

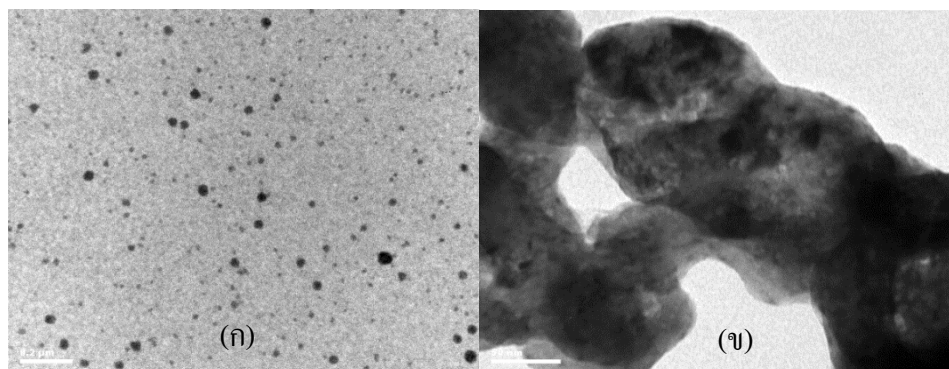
สูตรการหาปริมาตรสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ปริมาตร = (ด้าน)³

จากตารางบันทึกผลการทำกิจกรรม แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค การลดขนาดอนุภาคลงเรื่อย ๆ จะทำให้อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยปริมาตรหรือมวลคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลง เมื่ออนุภาคมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น จะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้น โดยเฉพาะปฏิกิริยาเคมีที่เกิดที่พื้นผิว

จากกิจกรรมนี้จะทำให้ผู้เรียนสามารถเกิดแนวคิดเรื่องอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของวัสดุนาโน ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้อธิบายสมบัติที่ขึ้นกับขนาด และรูปร่างของวัสดุ คือ อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค การลดขนาดอนุภาคในระดับนาโนทำให้อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น เมื่อผ่านขนาดวิกฤตอัตราส่วนพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นมหาศาล ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรและอนุภาคนาโนรูปทรงกลม



ภาพที่ 2.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของ ก) นาโนแคลเซียมไดออกไซด์จากการสังเคราะห์ ข) แคลเซียมไดออกไซด์จากหินปูน

จากภาพที่ 2.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแคลเซียมออกไซด์จากการสังเคราะห์ มีขนาดอนุภาคเล็กอยู่ในช่วงประมาณ 19.24 ± 9.93 นาโนเมตร และมีการกระจายตัวที่ดี ในขณะที่แคลเซียมออกไซด์จากหินปูนมีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ไม่สามารถวัดขนาดในระดับนาโนเมตรได้

การจัดกิจกรรมการทดลอง

คำชี้แจง

1. นักเรียนศึกษาเอกสารคู่มือการทดลอง เรื่องตัวเร่งปฏิกิริยานาโนเพื่อการผลิตไบโอดีเซล
2. นักเรียนแบ่งกลุ่ม จำนวน 8 กลุ่ม ดังนี้
กลุ่มที่ 1-4 ทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่มาจากหินปูน
กลุ่มที่ 5-8 ทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์

กลุ่มที่	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม)	กลุ่มที่	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม)
1	0.5	5	0.5
2	1.0	6	1.0
3	3.0	7	3.0
4	5.0	8	5.0

3. นักเรียนแต่ละกลุ่มร่วมกันอภิปรายเรื่องการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวที่ได้ทดลองผ่านมาในชุดการทดลองที่ 1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม และตัวเร่งปฏิกิริยานาโน

วัตถุประสงค์การทดลอง

เพื่อศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว

คำถามก่อนการทดลอง

1. สารใดทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล
(แนวตอบ นาโนแคลเซียมออกไซด์)
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมต่างกับตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวอย่างไร
(แนวตอบ ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมเป็นของแข็ง มีสถานะต่างกับน้ำมันพืช ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวสามารถละลายได้ในเมทานอลจึงทำให้มีสถานะเป็นของเหลวเหมือนน้ำมันพืช)
3. ปัจจัยใดที่มีผลต่อปริมาณไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม
(แนวตอบ พื้นที่ผิวสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยา)
4. ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนมีลักษณะพิเศษอย่างไร
(แนวตอบ มีขนาดเล็ก อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง)

อุปกรณ์และสารเคมี

อุปกรณ์

1. ชุดรีฟลักซ์ขนาดเล็ก ประกอบด้วยขวดก้นกลม 3 ขอ ขนาด 25 มิลลิลิตร คอนเดนเซอร์ เทอร์โมมิเตอร์ เตาแม่เหล็กให้ความร้อน พร้อมหลุมให้ความร้อน แท่งแม่เหล็ก สำหรับคนสาร และเครื่องตรวจวัด (probe) ควบคุมอุณหภูมิ และปั้มน้ำสำหรับตู้ปลาขนาดเล็ก สำหรับระบบน้ำหล่อเย็น

2. เครื่องชั่งสาร (analytical balance) จำนวน 1 เครื่อง
3. กระบอกตวง (cylinder) ขนาด 10 มิลลิลิตร จำนวน 2 อัน
4. หลอดทดลองขนาดกลาง (test tube) จำนวน 2 หลอด
5. บีกเกอร์ (beaker) ขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 1 ใบ.
6. แท่งแก้วคนสาร (starring rod) จำนวน 1 อัน
7. ช้อนตักสาร (spatula) จำนวน 1 อัน

สารเคมี

1. น้ำมันปาล์ม (palm oil) น้ำหนักต่อโมล 817.00 กรัมต่อโมล
2. เมทานอล (methanol; CH_3OH) เป็นของเหลวใสไม่มีสี น้ำหนักต่อโมล 32.00 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 0.79 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดเดือด 64.7 องศาเซลเซียส
3. แคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมจากหินปูน และนาโนแคลเซียมออกไซด์ ที่เตรียมจากการสังเคราะห์ มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว

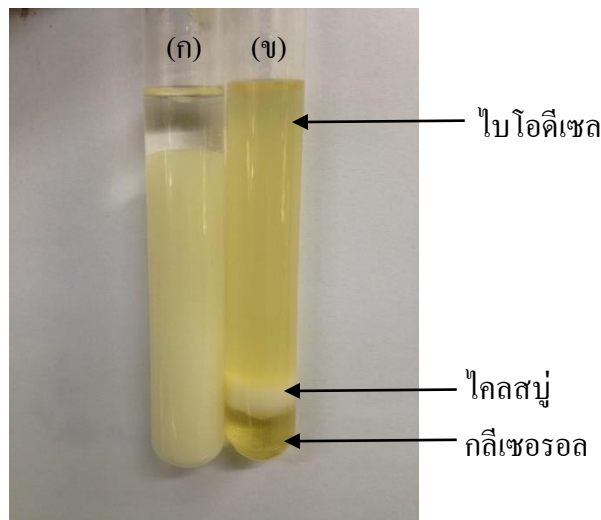
สารเคมีอันตราย: เมทานอลติดไฟได้ และเป็นพิษต่อตา จึงควรสวมแว่นตากันสารเคมี

ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล มีดังนี้

สถานะที่ใช้ในการทดลอง

อัตราส่วน โดยโมลน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6

1. จัดเตรียมชุดรีฟลักซ์ และระบบน้ำหล่อเย็น โดยใช้ปริมาณน้ำขนาดเล็กสำหรับตู้ปลา
2. ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยา (น้ำหนักตามที่กำหนดให้แต่ละกลุ่ม) ใส่ลงขวดสามคอขนาด 25 มิลลิลิตร เติมเมทานอล 4.0 มิลลิลิตร และเติมน้ำมันปาล์ม 15 มิลลิลิตร
3. นำไปรีฟลักซ์ โดยปั่นกวอยู่ที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
4. เทสารผสมที่ได้จากการทำปฏิกิริยาลงในหลอดทดลอง ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที สังเกตการเปลี่ยนแปลง ดังภาพ 2.3



ภาพที่ 2.3 ภาพถ่าย ก) ของผสมระหว่างน้ำมันปาล์ม นาโนแคลเซียมออกไซด์ และเมทานอลก่อนให้ความร้อน ข) หลังให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

5. วัดความสูงของชั้นกลีเซอรอล และชั้นสบู่ บันทึกผลการทดลอง
6. ล้างอุปกรณ์การทดลอง และเก็บเข้าที่เดิมให้เรียบร้อย
7. นักเรียนเขียนรายงานการทดลอง บันทึกผลการทดลอง อภิปรายผลการทดลอง และสรุปผลการทดลองของแต่ละกลุ่ม
8. นักเรียนแต่ละกลุ่มนำเสนอหน้าชั้นเรียน และนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกัน ทุกกลุ่ม พร้อมทั้งร่วมกันอภิปรายผลการทดลองที่เกิดขึ้น

ข้อเสนอแนะในการทดลอง

ในการทำทดลองไม่ควรให้อุณหภูมิสูงเกิน 65 องศาเซลเซียส เนื่องจากจุดเดือดของเมทานอล เท่ากับ 64.7 องศาเซลเซียส จะทำให้มีโอกาที่ไอของเมทานอลที่ไม่ถูกควบแน่นออกมาได้มากขึ้น

ตารางบันทึกผลการทดลอง

สาร	ผลการเปลี่ยนแปลง	ความสูงชั้นกลีเซอรอล (cm)
น้ำมันปาล์ม + เมทานอล		

คำถามหลังการทดลอง

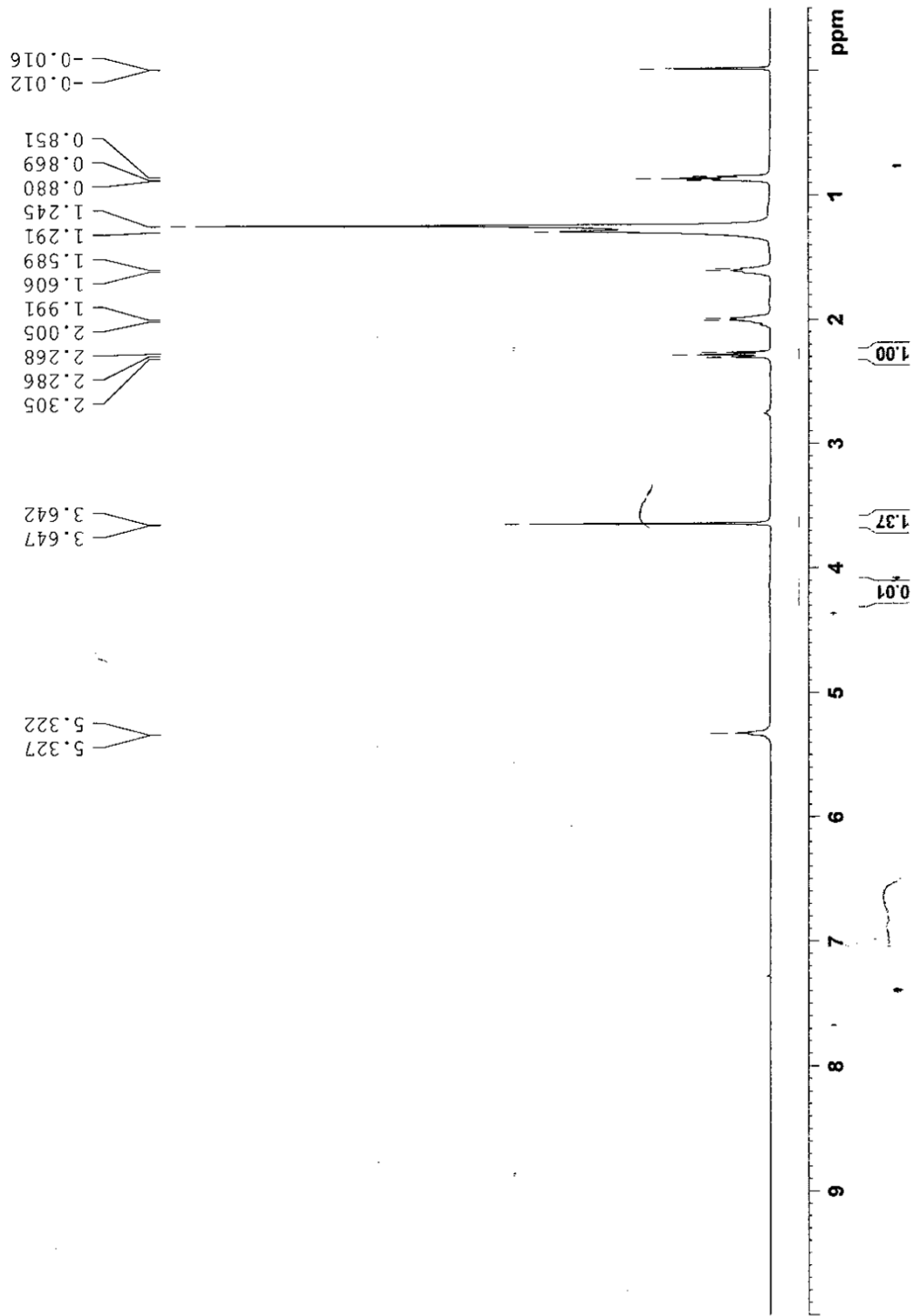
- นักเรียนทราบได้อย่างไรว่ามีไบโอดีเซลเกิดขึ้น
(แนวตอบ เห็นการแยกชั้นของสารเป็น 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นไบโอดีเซล ชั้นสบู่ และชั้นกลีเซอรอล)
- นักเรียนทราบได้อย่างไรว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใดเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่ากัน
(แนวตอบ สังเกตความสูงของชั้นไบโอดีเซล)
- ให้นักเรียนเปรียบเทียบผลการทดลองการผลิตไบโอดีเซลระหว่างใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียวกับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อผสม
(แนวตอบ การแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่ได้ต่างกัน ถ้าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียวจะเกิดแยกชั้นของสารเป็น 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นไบโอดีเซล และชั้นกลีเซอรอล ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อผสม จะเกิดการแยกชั้นของสารเป็น 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นไบโอดีเซล ชั้นสบู่ และชั้นกลีเซอรอล)
- ผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมแคลเซียมออกไซด์อนุภาคขนาดใหญ่ นาโนแคลเซียมออกไซด์ ต่างกันอย่างไร
(แนวตอบ ถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์ จะสังเกตเห็นชั้นกลีเซอรอลชัดเจน ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยามาปน ส่วนการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ขนาดใหญ่ จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่หมดจึงทำให้เหลือตกลงมาปนกับกลีเซอรอล)
- เพราะเหตุใดตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์จึงเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมทั่วไป
(แนวตอบ เพราะตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์มีพื้นที่ผิวมากกว่า)

เอกสารอ้างอิง

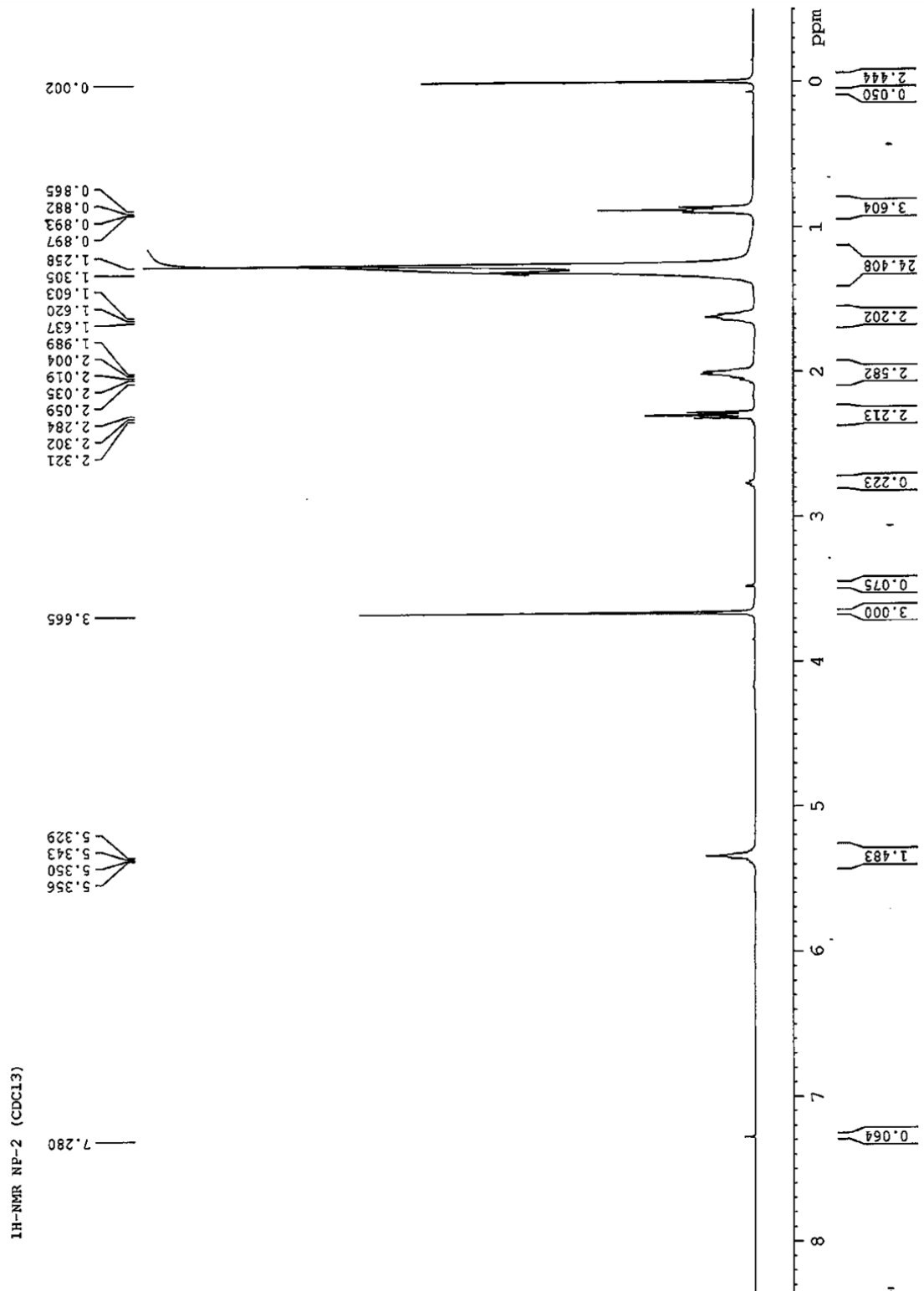
- Aslani, A. (2012). Microscopy Methods in Nanochemistry. *Current Microscopy Contributions to Advances in Science and Technology*, 1291-1311.
- Boey, P.-L., Pragas Maniam, G., Abd Hamid, S., (2011). Performance of calcium oxide as a heterogenous catalyst in biodiesel production: a review. *Chem. Eng. J.* 168, 15-22.
- Ibrahim H, Ahmed A. S, Bugaje I.M, Mohammed Dabo & Ugwumma C. D. (2013). Synthesis of Bulk Calcium Oxide (CaO) Catalyst and its Efficacy for Biodiesel Production. *Journal of Energy Technologies and Policy.* 3(12), 14-16.
- Kouzua, M., Kasunob, T., Tajika, M., Sugimoto Y, Yamanaka, S., & Hidakac, J. (2008). Calcium oxide as a solid base catalyst for tranesterification of soybean oil and its application to biodiesel production. *Fuel*, 87, 2798-2806.
- Reddy, C., Reddy, V., Oshel, R. and Verkade, J.G. (2006). Room temperature conversion of soybean oil and poultry fat to biodiesel catalyzed by nanocrystalline calcium oxides. *Energy & Fuels.* 20, 1310-1314.
- Tedsree, K. (2013). Nanocatalyst: Next generation of catalytic technology. *Burapha Sci. J.*, 18(2) 274-280.

ภาคผนวก ข

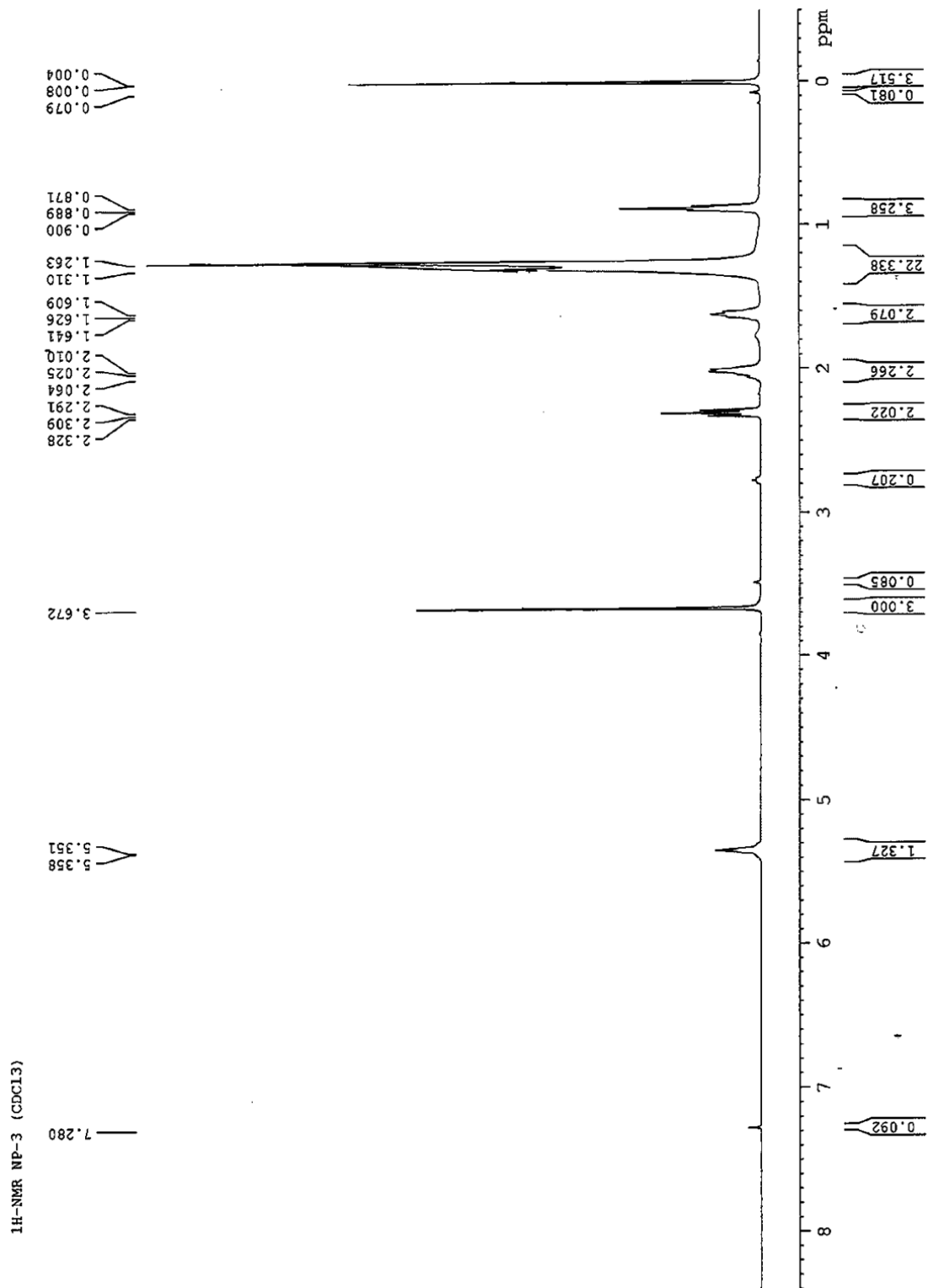
B-0.5NOPPORN 1H-NMR 400MHz in CDCl3



ภาพผนวก ข-1 ¹H NMR สเปกตรัมของไบโอดีเซล: สภาวะที่ทดลอง อัตราส่วนโดยโมลน้ำมัน
ปาล์มต่อเมทานอล 1:6 โซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ทำปฏิกิริยา
ที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



ภาพผนวก ข-2 ¹H NMR สเปกตรัมของไบโอดีเซล: สภาวะที่ทดลอง อัตราส่วน โดยโมลน้ำมัน
 ปาล์มต่อเมทานอล 1:6 นาโนแคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ทำ
 ปฏิบัติที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



ภาพผนวก ข-3 ¹H NMR สเปกตรัมของไบโอดีเซล: สภาวะที่ทดลอง อัตราส่วนโดยโมลน้ำมัน
 ปาล์มต่อเมทานอล 1:6 นาโนแคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม
 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ภาคผนวก ค

การคำนวณหาปริมาณร้อยละของไบโอดีเซล

ร้อยละของการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็นเมทิลเอสเทอร์ สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของโปรตอนตรงหมู่เมทิลีน (2.3 ppm) และหมู่เมทอกซี (3.7 ppm) ดังสมการ

$$C = 100 \times \frac{2A_{Me}}{3A_{CH_2}}$$

โดย

ค่า C คือ ค่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น

A_{Me} คือ พื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการอินทิเกรตพีคของโปรตอนตรงหมู่เมทอกซี

A_{CH_2} คือ พื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการอินทิเกรตพีคของโปรตอนตรงหมู่เมทิลีน

ส่วนตัวเลข 2 และ 3 คือจำนวนโปรตอนของหมู่เมทิลีน และหมู่เมทอกซีตามลำดับ

แทนค่า

ตัวอย่างใช้ข้อมูลจากภาพ ภาพผนวก ข-3

พื้นที่ใต้กราฟของโปรตอนตรงหมู่เมทิลีน (2.3 ppm) มีค่า เท่ากับ 2.022

พื้นที่ใต้กราฟของโปรตอนตรงหมู่เมทอกซี (3.7 ppm) มีค่า เท่ากับ 3.000

$$\begin{aligned} C &= 100 \times \frac{2(3.000)}{3(2.022)} \\ &= 99 \end{aligned}$$

ดังนั้นร้อยละของการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็น ไบโอดีเซล เท่ากับ ร้อยละ 99