

การสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตจากกลีเซอรอลและยูเรียโดยใช้  
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

SYNTHESIS OF GLYCEROL CARBONATE FROM GLYCEROL  
AND UREA USING CALCIUM HYDROXIDE CATALYST  
FROM EGGSHELL



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF GLYCEROL CARBONATE FROM GLYCEROL  
AND UREA USING CALCIUM HYDROXIDE CATALYST  
FROM EGGSHELL



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตจากกลีเซอรอลและยูเรียโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา  
Synthesis of glycerol carbonate from glycerol and urea using calcium hydroxide catalyst from eggshell

ชื่อนักศึกษา

นางสาวศิริลักษณ์ สงวนศักดิ์ รหัสนักศึกษา 58050550

นางสาวสุวิมล ขำเนตร รหัสนักศึกษา 58050565

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

คณะ

วิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)

ปีการศึกษา

2561

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการคุมสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล ประธานกรรมการ	
ดร.พัชราภรณ์ วีระชนะศักดิ์ กรรมการ	
ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेटจากกลีเซอรอลและยูเรีย โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
ชื่อนักศึกษา	นางสาวศิริลักษณ์ สงวนศักดิ์ รหัสนักศึกษา 58050550 นางสาวสุวิมล ขำเนตร รหัสนักศึกษา 58050565
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेट โดยมีกลีเซอรอลกับยูเรียเป็นสารตั้งต้นและใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์  $[Ca(OH)_2]$  ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) ทำปฏิกิริยาในเครื่องไมโครเวฟ (Microwave) โดยทำการศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา  $Ca(OH)_2$  จากเปลือกไข่ด้วยการพิสูจน์เอกลักษณ์ XRD TGA และ ATR-FTIR และผลของตัวแปรต่างๆในการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेट ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ เวลา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่า การสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेटโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ เวลา 60 นาที จะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลสูงถึง 98.72 เปอร์เซ็นต์ และค่าการเลือกเกิดของกลีเซอรอลคาร์บอนेट 37.43 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेटโดยใช้  $Ca(OH)_2$  ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา  $Ca(OH)_2$  2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกลีเซอรอล เป็นเวลา 40 นาที จะให้การเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลสูงถึง 97.90 เปอร์เซ็นต์ และค่าการเลือกเกิดของกลีเซอรอลคาร์บอนेट 52.46 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ซึ่งเป็นของเสียจากธรรมชาติ ซึ่งสามารถช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น และได้ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอนेटเพิ่มมากขึ้น

**คำสำคัญ :** กลีเซอรอล, ยูเรีย, กลีเซอรอลคาร์บอนेट, แคลเซียมไฮดรอกไซด์, เปลือกไข่,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มุ่งเน้นการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Synthesis of glycerol carbonate from glycerol and urea using calcium hydroxide catalyst from eggshell
Students	Miss. Sirilak Sanguansak Student ID 58050550 Miss. Suwimon Kamnet Student ID 58050565
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2018
Advisor	Asst. Prof. Pesak Rungrojchaipon (Ph.D.)

### Abstract

This research study on the synthesis of glycerol carbonate from glycerol and urea using calcium hydroxide  $[Ca(OH)_2]$  as the catalyst produced from eggshell. The experiments were conducted in a batch reactor by using microwave irradiation. In this study the synthesis of  $Ca(OH)_2$  catalyst from eggshell and the variables affected on synthesis of glycerol carbonate were investigated including glycerol/urea molar ratio, microwave power, reaction time and catalyst weight %. The obtained  $Ca(OH)_2$  catalysts were characterized by several techniques, namely XRD, TGA and ATR-FTIR. The results for the synthesis of glycerol carbonate without using catalyst for glycerol/urea with molar ratio of 1:1, microwave power of 450 watts and at 60 minutes reaction time showed the highest optimums conditions with the glycerol conversion of 98.72% and glycerol carbonate selectivity of 37.43%. Furthermore, the results of the synthesis of glycerol carbonate using  $Ca(OH)_2$  as catalyst obtained from eggshell with the condition of glycerol/urea molar ratio of 1:1, microwave power of 450 watts,  $Ca(OH)_2$  amount of 2 wt% of glycerol and 40 minutes reaction time give the highest of the glycerol conversion of 97.90% and glycerol carbonate selectivity of 52.46%. Therefore, using  $Ca(OH)_2$  as a catalyst produced from the eggshell, which is a natural waste, has induced more faster reaction time and increased more glycerol carbonate yield.

เอกสาร **Keywords** : สังกlycerol, ริก urea, ึ่ง glycerol คี carbonate, ไม้ calcium หัน hydroxide, ย eggshell, ุค้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อักั microwave irradiation และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือและความร่วมมือของบุคคลหลายๆ ฝ่าย

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ได้เป็นอย่างดีมาตลอด

ขอขอบคุณ ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล และ ดร.พัชราภรณ์ วีระชวณะศักดิ์ ผู้เป็นคณะกรรมการให้กับโครงการพิเศษนี้ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำถึงประเด็นต่างๆ ในการศึกษาและชี้แนวทางในการแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการตรวจสอบและแก้ไขเพิ่มเติม เพื่อให้โครงการพิเศษฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณท่านคณาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา พร้อมทั้งให้คำแนะนำต่างๆ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่อำนวยความสะดวก คอยช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือเพื่อการวิจัยทางวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือต่างๆ เพื่อตรวจวิเคราะห์ผลของตัวอย่างในโครงการพิเศษ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณมารดา-บิดาที่ให้โอกาสได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดู และอบรมสั่งสอน เป็นกำลังใจสำคัญ รวมทั้งเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอบคุณเพื่อนๆ รวมถึงบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมาที่คอยให้ความช่วยเหลือต่างๆ คณะผู้จัดทำโครงการพิเศษขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ศิริลักษณ์ สงวนศักดิ์

สุวิมล ขำเนตร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 กลีเซอรอล.....	8
2.1.1 ข้อแตกต่างของกลีเซอรินกับกลีเซอรอล.....	8
2.1.2 แหล่งที่มาของกลีเซอรอล.....	9
2.1.3 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอล.....	10
2.1.4 ประโยชน์ของกลีเซอรอล.....	11
2.2 ยูเรีย.....	11
2.2.1 ชนิดของปุ๋ยยูเรีย.....	12
2.2.2 ประโยชน์ของยูเรีย.....	14
2.2.3 กรรมวิธีการผลิตปุ๋ยยูเรีย.....	14
2.3 กลีเซอรอลคาร์บอเนต.....	15
2.3.1 ประโยชน์ของกลีเซอรอลคาร์บอเนต.....	15
2.4 ปฏิกริยาการเกิดกลีเซอรอลคาร์บอเนตโดยมีกลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้น.....	16
2.4.1 เปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์กลีเซอรอลคาร์บอเนตที่ได้โดย การใช้สารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยา และสภาวะที่ต่างกัน.....	19
2.5 เปลือกไข่.....	23
2.5.1 ลักษณะของเปลือกไข่.....	24
2.5.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของเปลือกไข่.....	24

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 แคลเซียมไฮดรอกไซด์ .....	27
2.7 การให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยา .....	28
2.7.1 การให้ความร้อนแบบทั่วไป .....	28
2.7.2 การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ .....	28
2.8 คลื่นไมโครเวฟ.....	30
2.8.1 คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ.....	30
2.8.2 ประโยชน์ของคลื่นไมโครเวฟ.....	31
2.8.3 ผลกระทบของคลื่นไมโครเวฟต่อร่างกายมนุษย์.....	33
2.8.4 การถ่ายเทความร้อนของคลื่นไมโครเวฟ .....	33
2.8.5 การเกิดความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ.....	34
2.8.6 รูปแบบการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ.....	34
2.9 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	35
2.9.1 เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (TGA).....	35
2.9.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	35
2.9.3 เครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (FTIR).....	38
2.9.4 เทคนิคการตรวจวัดโดยใช้ Gas Chromatography.....	40
2.9.4.1 เทคนิค Gas Chromatography - Mass Spectrometry (GC-MS)....	41
2.9.4.2 เทคนิค Gas Chromatography - Flame Ionization Detector (GC-FID).....	42
2.9.5 เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (Infrared Thermometer) .....	43
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	45
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>51</b>
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	51
3.2 สารเคมี .....	52
3.3 วิธีการทดลอง.....	53
3.3.1 การหาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO <sub>3</sub> ) ในเปลือกไข่.....	53
3.3.1.1 การเตรียมเปลือกไข่.....	53
3.3.1.2 การหาปริมาณ CaCO <sub>3</sub> ในเปลือกไข่.....	53
3.3.2 การสังเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ [Ca(OH) <sub>2</sub> ] จากเปลือกไข่.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3 การทดสอบเพื่อกำหนดกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟที่ ให้อุณหภูมิเหมาะสมที่กำลังไฟฟ้า 100, 300 และ 450 วัตต์ .....	54
3.3.4 การทดลองการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนต .....	58
3.3.4.1 การทดลองการสังเคราะห์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ ในสถานะต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา .....	58
3.3.4.2 การทดลองการสังเคราะห์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ ในสถานะต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ .....	59
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....	60
4.1 ผลการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเปลือกไข่ .....	60
4.1.1 การหาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO <sub>3</sub> ) ในเปลือกไข่ .....	60
4.1.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (TGA) .....	61
4.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ จากเปลือกไข่ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) .....	62
4.1.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จาก เปลือกไข่ด้วยเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) .....	63
4.2 ผลการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา .....	66
4.2.1 การทดสอบเพื่อกำหนดกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟที่ให้อุณหภูมิเหมาะสม สำหรับปฏิกิริยาสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนต .....	66
4.2.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) .....	66
4.2.3 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง Gas Chromatography- Flame Ionization Detector (GC-FID) .....	71
4.2.4 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเครื่อง Gas Chromatography - Mass Spectrometry (GC-MS) .....	74
4.3 ผลการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ....	75
4.3.1 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) .....	75
4.3.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง Gas Chromatography- Flame Ionization Detector (GC-FID) .....	79

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.3 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเครื่อง Gas Chromatography - Mass Spectrometry (GC-MS).....	81
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	83
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	83
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	84
เอกสารอ้างอิง .....	85
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก.....	91
ภาคผนวก ข.....	95
ภาคผนวก ค.....	102



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอล.....	10
2.2 เปรียบเทียบลักษณะ ปุ๋ยยูเรียเม็ดโพลัม ปุ๋ยยูเรียเม็ดสาคุ.....	13
2.3 คุณสมบัติของกลีเซอรอลคาร์บอเนต.....	15
2.4 ปริมาณผลิตภัณฑ์กลีเซอรอลคาร์บอเนตโดยใช้สารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน.....	19
2.5 แสดงเปอร์เซ็นต์โดยมวลขององค์ประกอบต่าง ๆ ทางเคมีในเปลือกไข่.....	24
2.6 คุณสมบัติของแคลเซียมไฮดรอกไซด์.....	27
2.7 แสดงข้อดีข้อเสียของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ.....	29
3.1 ตารางแสดงสถานะที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าลึงไฟฟ้าที่ให้อุณหภูมิเหมาะสม.....	55
3.2 ตารางแสดงสถานะที่ใช้ในการทดลองเพื่อสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตโดย ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	58
3.3 ตารางแสดงสถานะที่ใช้ในการทดลองเพื่อสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตโดย ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	59
4.1 แสดงปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO <sub>3</sub> ) ในเปลือกไข่.....	60
4.2 การสั้นของหมู่ฟังก์ชันที่เลขคลื่นต่างๆ ของกลีเซอรอล ยูเรีย และกลีเซอรอลคาร์บอเนต.....	67
4.3 แสดงผลการทดลองการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนต โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	71
4.4 ตารางแสดงผลการทดลองการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนต โดยใช้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของการผลิตไบโอดีเซล .....	1
1.2 แสดงแนวโน้มการผลิตและการใช้ไบโอดีเซลของโลก .....	2
1.3 แสดงปริมาณการผลิตไบโอดีเซลทั่วโลกและราคาของกลีเซอรอลตั้งแต่ปี 2003-2020.....	2
1.4 แสดงปฏิกริยาระหว่างกลีเซอรอลและยูเรีย .....	4
2.1 โครงสร้างของกลีเซอรอล.....	8
2.2 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของการผลิตไบโอดีเซล .....	9
2.3 โมเลกุลปุ๋ยยูเรีย .....	12
2.4 ปุ๋ยยูเรียเม็ดโพม.....	12
2.5 ปุ๋ยยูเรียเม็ดเล็กหรือเม็ดสาคุ.....	13
2.6 โครงสร้างของโมเลกุลกลีเซอรอลคาร์บอนเนต .....	15
2.7 แสดงกลไกการเกิดปฏิกริยาคาร์บอนิลเลชันของกลีเซอรอลกับยูเรีย .....	18
2.8 ส่วนประกอบของไข่.....	25
2.9 วัฏจักรของแคลเซียมคาร์บอนเนต.....	27
2.10 (a) การให้ความร้อนตามปกติ (Conventional heating) (b) การให้ความร้อนโดย ไมโครเวฟ (Microwave heating) (c) การให้ความร้อนแบบไฮบริด (Hybrid heating)...	29
2.11 (a) การส่องผ่าน (b) การสะท้อน (c) การดูดกลืน.....	29
2.12 แสดงการผ่านมายังชั้นบรรยากาศโลก ประเภท ความยาว ระดับความยาวโดยประมาณ ความถี่ และอุณหภูมิของวัตถุที่แผ่รังสีออกมาของคลื่นแต่ละชนิด .....	30
2.13 แสดงการใช้ประโยชน์ของคลื่นไมโครเวฟในการสื่อสาร .....	31
2.14 แสดงการใช้ประโยชน์ของคลื่นไมโครเวฟในการตรวจจับวัตถุทางอากาศ.....	31
2.15 แสดงส่วนต่างๆ ของเครื่องไมโครเวฟ.....	32
2.16 เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน.....	35
2.17 แสดงการเกิดรังสีเอ็กซ์.....	37
2.18 แสดงส่วนประกอบและการทำงานของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ .....	38
2.19 อินฟราเรดสเปกตรัมก่อนและหลังผลการแปลงฟูเรียร์.....	38
2.20 ส่วนประกอบของเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	39
2.21 ส่วนประกอบของเครื่อง Gas Chromatography.....	40
2.22 ส่วนประกอบของเครื่อง GC-MS.....	41
2.23 เครื่อง MS ที่ต่อกับ GC .....	42

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 องค์ประกอบของ Flame ionization detector (FID) .....	43
2.25 สารประกอบที่ไม่ไวต่อ Detector ชนิด Flame ionization detector (FID) .....	43
2.26 เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด .....	44
2.27 ระบบการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ.....	44
3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ในการทำปฏิกิริยาเพื่อหากำลังไฟฟ้าที่ให้อุณหภูมิเหมาะสม.....	55
4.1 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จาก เปลือกไข่ด้วยเครื่อง TGA.....	61
4.2 ดิฟแฟรกโทแกรมของเปลือกไข่ (Eggshell) และ JCPDS standard ของ CaCO <sub>3</sub> .....	62
4.3 ดิฟแฟรกโทแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [Ca(OH) <sub>2</sub> ] ที่สังเคราะห์ได้จาก เปลือกไข่ และ JCPDS standard ของ Ca(OH) <sub>2</sub> .....	63
4.4 ATR-FTIR spectrum ของเปลือกไข่เปรียบเทียบกับ CaCO <sub>3</sub> .....	64
4.5 ATR-FTIR spectrum ของ Ca(OH) <sub>2</sub> เกรดวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ Ca(OH) <sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่.....	65
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องไมโครเวฟ .....	66
4.7 ATR-FTIR spectrum ของกลีเซอรอล ยูเรีย และกลีเซอรอลคาร์บอนเนต .....	67
4.8 ATR-FTIR spectrum ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง กลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:0.5 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 30 และ 45 นาที โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา .....	68
4.9 ATR-FTIR spectrum ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง กลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 30, 45 และ 60 นาที โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	69
4.10 ATR-FTIR spectrum ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง กลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:2 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 30, 45 และ 60 นาที โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	70
4.11 แสดง % Conversion Selectivity และ Yield ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:0.5 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 30 และ 45 นาทีโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	72
4.12 แสดง % Conversion Selectivity และ Yield ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ เวลา 30 45 และ 60 นาทีโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	72

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 แสดง % Conversion Selectivity และ Yield ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:2 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 45 และ 60 นาทีโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	73
4.14 แสดงแมสสเปกตรัมขององค์ประกอบกลีเซอรอลคาร์บอนเนตในสารมาตรฐานกลีเซอรอลคาร์บอนเนต .....	74
4.15 แสดงแมสสเปกตรัมขององค์ประกอบสารตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยาที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ เป็นเวลา 60 นาที โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	75
4.16 ATR-FTIR spectrum ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 20, 30 และ 40 นาที โดยใช้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่สังเคราะห์ได้เป็นตัวเร่งปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์.....	76
4.17 ATR-FTIR spectrum ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 40 นาทีโดยใช้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปริมาณ 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์.....	77
4.18 ATR-FTIR spectrum ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 40 นาทีโดยใช้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เกรดวิเคราะห์เป็นตัวเร่งปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์.....	78
4.19 แสดง % Conversion Selectivity และ Yield ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 20 30 และ 40 นาทีโดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 2% ของกลีเซอรอล และเวลา 40 นาทีของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 5% ของกลีเซอรอล.....	79
4.20 แสดง % Conversion Selectivity และ Yield ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 40 นาทีโดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่และตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เกรดวิเคราะห์ 2% ของกลีเซอรอล.....	80
4.21 แสดงแมสสเปกตรัมขององค์ประกอบสารตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยาที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ เป็นเวลา 40 นาทีโดยใช้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	82

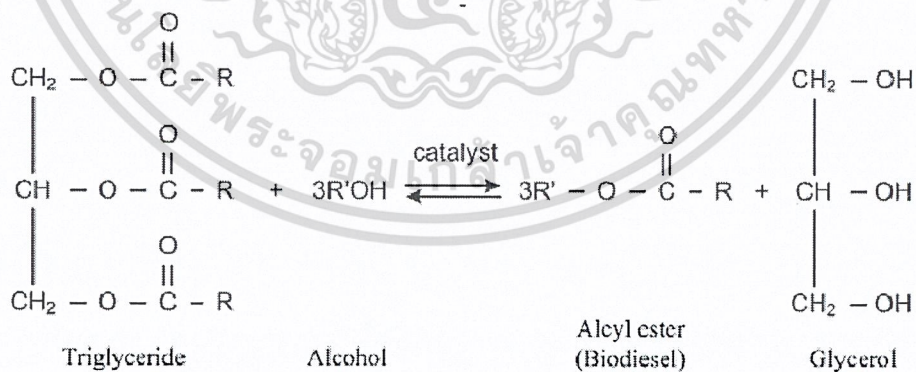
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

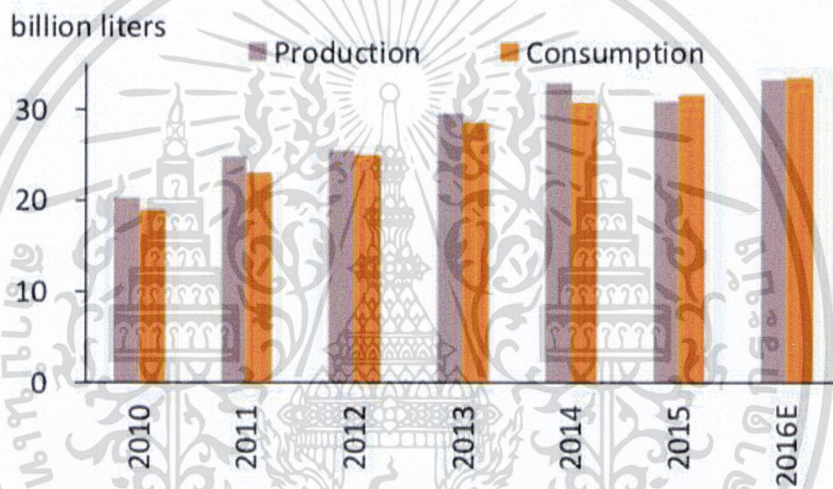
ปัจจุบันพลังงานทดแทนกำลังเป็นที่สนใจของทั่วโลก เนื่องจากพลังงานหลักที่ใช้กันอยู่อย่างพลังงานที่ได้จากปิโตรเลียม ถ่านหิน ฟอสซิล และแก๊สธรรมชาติ เริ่มเกิดปัญหาการขาดแคลนเพราะเป็นพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว จากความต้องการที่เพิ่มมากขึ้นของประชากรโลก เพื่อลดการพึ่งพาพลังงานจากปิโตรเลียม และตอบสนองความต้องการทางด้านพลังงานรวมถึงด้านสิ่งแวดล้อม จึงมีการพัฒนาเชื้อเพลิงทางเลือกหรือพลังงานทดแทนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หนึ่งในพลังงานทดแทนที่ได้รับความสนใจจากหลายประเทศรวมทั้งประเทศไทย คือ ไบโอดีเซล (Biodiesel) เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานสะอาด ใช้ชีวมวลเป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิง การผลิตไบโอดีเซลผลิตจากการนำน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือน้ำมันที่เหลือใช้จากการปรุงอาหาร มาผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ (Ethanol หรือ Methanol) ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดแก่ หรือ เบสแก่ ปฏิกิริยานี้เป็นการทำให้โมเลกุลเล็กลง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์ (Ester) และผลพลอยได้ (By-product) คือ กลีเซอรอล (Glycerol) ซึ่งเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นสามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้ จึงช่วยลดการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศเป็นการเพิ่มความมั่นคงด้านพลังงาน และส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนจากพืชซึ่งเป็นผลผลิตภายในประเทศไทย [1,2,3]



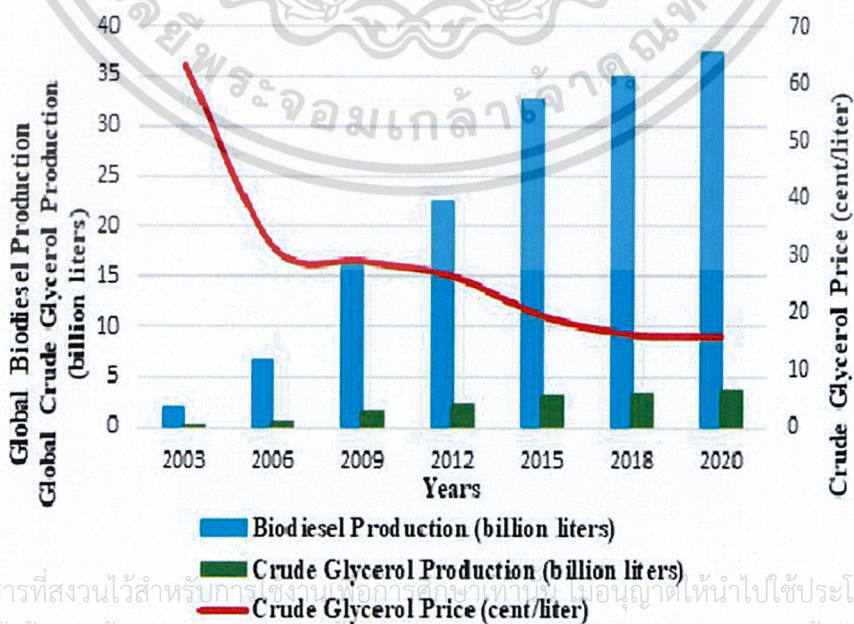
รูปที่ 1.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของการผลิตไบโอดีเซล [1]

และจากกราฟรูปที่ 1.2 แสดงแนวโน้มการผลิตและการใช้ไบโอดีเซลของโลก เห็นได้ว่าความต้องการใช้ไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้น ทำให้การผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้เกิดปัญหาตามมา คือ ปริมาณกลีเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้นั้นเพิ่มมากขึ้น เป็นภาระต่อผู้ผลิตไบโอดีเซลที่ต้องจัดหาระบบ

มาจัดการกับกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นได้ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตไบโอดีเซล กลีเซอรอลดิบยังมีการนำไปใช้ประโยชน์ไม่มากนัก นอกจากการนำไปกลั่นเพื่อใช้ประโยชน์ในรูปของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ทำให้ปริมาณกลีเซอรอลดิบในอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นเกินความต้องการของตลาด แต่หากพิจารณาจากกราฟรูปที่ 1.3 พบว่าราคากลีเซอรอลดิบกลับมีแนวโน้มสวนทางกัน โดยกลีเซอรอลดิบนั้นมีราคาตกลงอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งการขายกลีเซอรอลนั้นเป็นรายได้สำคัญส่วนหนึ่งของโรงงานผลิตไบโอดีเซล การที่ราคาของกลีเซอรอลดิบและกลีเซอรอลบริสุทธิ์ลดลง ส่งผลทำให้ปริมาณการผลิตกลีเซอรอลบริสุทธิ์เริ่มคงที่ เพราะนอกจากราคาที่ลดลงแล้วยังเป็นการเพิ่มรายจ่าย ที่เกิดจากการผลิตสำหรับผู้ผลิตไบโอดีเซลอีกด้วย ดังนั้นกระบวนการผลิตกลีเซอรอลบริสุทธิ์จึงไม่ใช่ทางออกที่ดีสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล



รูปที่ 1.2 แสดงแนวโน้มการผลิตและการใช้ไบโอดีเซลของโลก [2]



รูปที่ 1.3 แสดงปริมาณการผลิตไบโอดีเซลทั่วโลกและราคาของกลีเซอรอลตั้งแต่ปี 2003-2020 [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับปริญญาโทเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้

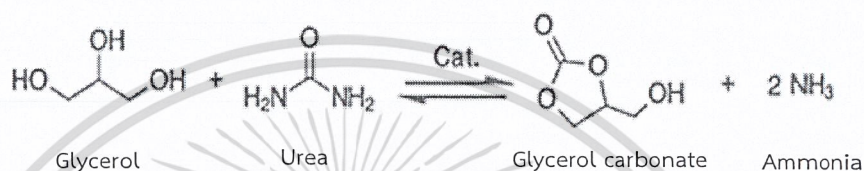
ด้วยเหตุนี้ จึงมีงานวิจัยมากมายที่ศึกษา คิดค้นและพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหานี้ ด้วยการหาวิธีช่วยเปลี่ยน กลีเซอรอลให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่ามากขึ้น ซึ่งหนึ่งในวิธีที่น่าสนใจ คือ การเปลี่ยนกลีเซอรอล ให้เป็นกลีเซอรอลคาร์บอเนต (Glycerol carbonate) เนื่องจากกลีเซอรอลคาร์บอเนตนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายในทางอุตสาหกรรม

กลีเซอรอลคาร์บอเนต สูตรโมเลกุล คือ  $C_4H_6O_4$  เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้กลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้น ลักษณะเป็นของเหลวมีความหนืด ละลายน้ำได้ ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ มีประโยชน์หลากหลาย เช่น สามารถนำมาเป็นตัวทำละลายในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ใช้เป็นตัวทำละลายในเรซินและพลาสติก ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ในการผลิตลิเทียมแบตเตอรี่ ใช้เป็นสารที่ทำให้คงรูป (Curing agent) ในการผลิตซีเมนต์และคอนกรีต และใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เป็นต้น [4,5]

การสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตโดยใช้กลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้นนั้นมีอยู่ 6 วิธี คือ 1.การทำปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลและฟอสจีน (Phosgene) สามารถทำได้ง่าย และได้ผลของกลีเซอรอลคาร์บอเนตสูง แต่ฟอสจีนเป็นสารพิษทำให้มีความอันตราย 2.การทำปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) และแก๊สออกซิเจน (Oxygen) ได้ผลของกลีเซอรอลคาร์บอเนตสูง แต่เป็นปฏิกิริยาที่มีความเป็นพิษเช่นเดียวกัน และยังเป็นการทำปฏิกิริยาแบบรุนแรง (Supercritical) 3.การทำปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) วิธีนี้มีความปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลคาร์บอเนตและน้ำ แต่ได้ผลของกลีเซอรอลคาร์บอเนตต่ำ และทำที่สภาวะรุนแรง 4.การทำปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับยูเรีย (Urea) ได้ผลของกลีเซอรอลคาร์บอเนตสูง แต่ต้องมีการแยกแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia;  $NH_3$ ) ออกจากกลีเซอรอลคาร์บอเนต 5.การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) ระหว่างกลีเซอรอลกับแอลคิลคาร์บอเนต (Alkyl carbonate) เช่น เอทิลีนคาร์บอเนต (Ethylene carbonate) ได้ผลของกลีเซอรอลคาร์บอเนตสูง แต่มีข้อเสียในการแยกผลิตภัณฑ์ เนื่องจากได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลคาร์บอเนตกับเอทิลีนไกลคอล ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิดมีจุดเดือดสูงจึงแยกได้ยาก 6.การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับไดแอลคิล คาร์บอเนต (Dialkyl carbonate) เช่น ไดเมทิลคาร์บอเนต (Dimethyl carbonate) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลคาร์บอเนตกับเมทานอล ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ได้ผลของกลีเซอรอลคาร์บอเนตสูง แยกผลิตภัณฑ์ออกจากกันได้ง่าย แต่ไดเมทิลคาร์บอเนตมีราคาแพง [4]

ด้วยปัญหาปริมาณกลีเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณมาก หากยังไม่มีการจัดการที่ดี จะส่งผลกระทบต่อผู้ผลิตไบโอดีเซลและในอนาคตอาจเป็นผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมได้ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในอุตสาหกรรมไบโอดีเซล เพิ่มรายได้ให้ผู้ผลิตไบโอดีเซล ตลอดจนเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า จึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอล หรือเปลี่ยนรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีมูลค่าและนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่ามากขึ้น การเปลี่ยนกลีเซอรอลให้กลายเป็นกลีเซอรอล

คาร์บอนที่มีราคาสูงกว่าเป็นทางเลือกที่ดี และวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนนั้น จาก 6 วิธีข้างต้น จะเห็นว่าวิธีที่ไม่อันตรายเกินไป และทั้งยังได้ผลของกลีเซอรอลคาร์บอนสูง จะมี 2 วิธีคือ การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและการทำปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับยูเรีย แต่เนื่องจากยูเรียเป็นสารเคมีที่หาได้ง่าย ราคาถูกกว่าโคมเทิลคาร์บอนเนต ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ทำให้วิธีการทำปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับยูเรียเป็นที่น่าสนใจในการใช้สังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนเนต



รูปที่ 1.4 แสดงปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลและยูเรีย [4]

นอกจากสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ก็เป็นเรื่องสำคัญสำหรับการทำปฏิกิริยาเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยา และช่วยเพิ่มผลิตภัณท์ ซึ่งสำหรับปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับยูเรียดังแสดงในรูปที่ 1.4 นี้ โดยทั่วไปแล้วตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สามารถใช้ได้ทั้งกรดและเบส[6] เนื่องจากโรงงานพิเศษนี้มุ่งเน้นเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม จึงสนใจตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถสังเคราะห์ได้จากสิ่งเหลือใช้ ซึ่งอาจส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมหากเหลือทิ้ง เพื่อช่วยกำจัดขยะและลดมลพิษ จึงเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) ที่สามารถสังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ ไข่ นั้นเป็นวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับกระบวนการผลิตอาหารทั้งในระดับครัวเรือน และในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากไข่มีราคาถูกกว่าเนื้อสัตว์ แต่อุดมไปด้วยสารอาหาร สามารถนำมาประกอบอาหารโดยตรงหรือใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับอาหารเมนูอื่นๆ ได้หลากหลาย เปลือกไข่ซึ่งเป็นขยะที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก เป็นขยะที่ไม่มีการกำจัดที่ดี ส่วนใหญ่มักทิ้งรวมกันแล้วนำไปฝังกลบ ทำให้เป็นพิษต่อดินและสิ่งแวดล้อมโดยรอบ การนำเปลือกไข่มาสังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาถือเป็นการแปรรูปของเสียเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม และช่วยกำจัดขยะในชุมชน นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วสิ่งที่ช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้นอีกอย่างคือ ความร้อน (Heat) พลังงานความร้อนจะมีผลต่อพลังงานภายในสาร โดยการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้แก่อนุภาคของสารทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น เพิ่มโอกาสการชนกันของอนุภาคให้มากขึ้น การให้ความร้อนแบบธรรมดานั้นจะอาศัยการถ่ายเทความร้อนแบบการพา (Convection Heating) แต่มีการให้ความร้อนแบบหนึ่งที่น่าสนใจคือ การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric Heating) เป็นการให้ความร้อนโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ย่านคลื่นวิทยุหรือไมโครเวฟ โดยความถี่ของคลื่นจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของโมเลกุลจนเกิดเป็นความร้อน

เอกสาร หรือไมโครเวฟ โดยความถี่ของคลื่นจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของโมเลกุลจนเกิดเป็นความร้อน ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใน ข้อดีของการใช้ไมโครเวฟในการให้ความร้อน คือ ประหยัดเวลาและพลังงานในการให้ความร้อน มีอัตราการให้ความร้อนสูง ลดเวลาและอุณหภูมิที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการให้ความร้อน รวมไปถึงเครื่องไมโครเวฟเป็นอุปกรณ์ที่หาได้ง่าย ราคาไม่แพงมาก [7,8]

ดังนั้น โครงการพิเศษนี้จึงสนใจศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตโดยใช้กลีเซอรอลกับยูเรียเป็นสารตั้งต้น และมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $[Ca(OH)_2]$  ที่ได้จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) คือ ทำปฏิกิริยาในเครื่องไมโครเวฟ (Microwave) ซึ่งตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย เวลา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ศึกษาหาตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาและให้ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนตมาก

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากเปลือกไข่เปิดด้วยวิธีการสังเคราะห์ทางเคมี
2. เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนต จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับยูเรีย โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และทำปฏิกิริยาในเครื่องไมโครเวฟ
3. เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และทำปฏิกิริยาในเครื่องไมโครเวฟ ได้แก่ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ และเวลา

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. สังเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากเปลือกไข่เปิดด้วยวิธีการทางเคมี
2. ศึกษาอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องไมโครเวฟ เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา โดยใช้กลีเซอรอลทำปฏิกิริยากับยูเรียอัตราส่วนโดยโมล 1:1 ที่กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 100, 300 และ 450 วัตต์ โดยใช้อุปกรณ์ในการวัดเป็นเครื่องวัดอุณหภูมิ (IR – Thermometer)
3. ศึกษาอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรียที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรียเป็น 1:0.5, 1:1 และ 1:2 เลือกอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพ ให้ผลผลิตกลีเซอรอลคาร์บอเนตมากที่สุด ไปใช้เป็นอัตราส่วนสำหรับทำปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับยูเรีย และใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับยูเรีย โดยใช้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ของกลีเซอรอล เพื่อให้ทราบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา
5. วิเคราะห์คุณสมบัติของเปลือกไข่เปิดด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่
  - 5.1 วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA)
  - 5.2 วิเคราะห์โครงสร้างของสารในเปลือกไข่เปิดด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD)
  - 5.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน เพื่อตรวจสอบโครงสร้างองค์ประกอบของเปลือกไข่ ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR)
6. วิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่เปิด ด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่
  - 6.1 วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA)
  - 6.2 วิเคราะห์โครงสร้าง เพื่อตรวจสอบว่าสารที่สังเคราะห์ได้เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD)
  - 6.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน เพื่อตรวจสอบว่าสารที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่นั้นเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)
7. วิเคราะห์หาผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับยูเรีย ด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่
  - 7.1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน เพื่อตรวจสอบว่าสารที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาตามสภาวะต่างๆ เป็นกลีเซอรอลคาร์บอนด้วยเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)
  - 7.2 วิเคราะห์หาผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาตามสภาวะต่างๆด้วยเครื่อง Gas Chromatography - Flame Ionization Detector (GC-FID)
  - 7.3 วิเคราะห์ชนิดขององค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง เพื่อยืนยันว่าเลขมวลของสารที่สังเคราะห์ได้เป็นกลีเซอรอลคาร์บอนด้วยเครื่อง Gas Chromatography - Mass Spectrometry (GC-MS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากเปลือกไข่เป็ดได้ ถือเป็น การช่วยลดการเกิดขยะ และมลพิษ รวมไปถึงเป็นการแปรรูปของเสียเพื่อให้นำกลับมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการอื่นๆได้
2. สามารถเปลี่ยนกลีเซอรอลให้กลายเป็นกลีเซอรอลคาร์บอนेटได้ ซึ่งช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่สารกลีเซอรอล เป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและเกิดประโยชน์มากขึ้น ทั้งยังเป็นทางออกในการแก้ปัญหาปริมาณกลีเซอรอลที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล
3. ทราบสถานะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตกลีเซอรอลคาร์บอนेटให้ได้ผลผลิตมาก จากการใช้สารตั้งต้นเป็นกลีเซอรอลและยูเรีย โดยมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และทำปฏิกิริยาในเครื่องไมโครเวฟ จากการศึกษาด้วยแปรต่างๆ ได้แก่ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ และเวลา รวมไปถึงสามารถเป็นแนวทางไปประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กlycerol (Glycerol) [9,10,11]

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือ กลีเซอริน (Glycerin) เป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มของโพลีไฮดรอลิกแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นของเหลวใสหนืด ไม่มีกลิ่น ไม่มีสี ไม่มีพิษ มีรสหวานเล็กน้อย สูตรโมเลกุล คือ  $C_3H_8O_3$  มีน้ำหนักโมเลกุล 92.09 กรัมต่อโมล และมีชื่อทางเคมีว่า 1,2,3-โพรเพนไตรออล (1,2,3-propanetriol) จากภาพโครงสร้างของกลีเซอรอลดังแสดงในรูปที่ 2.1 พบว่ากลีเซอรอลประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ ซึ่งมี 2 หมู่ เป็นของไฮดรอกซิลปฐมภูมิ (Primary hydroxyl) และอีก 1 หมู่เป็นไฮดรอกซิลทุติยภูมิ (Secondary hydroxyl)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกลีเซอรอล [9]

กลีเซอรอลถูกค้นพบครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ. 1779 โดยนักเคมีชาวสวีเดน ชื่อ Carl W. Scheele จากการทดลองปฏิกิริยาสะaponนิฟิเคชัน (Saponification) ในการสกัดน้ำมันมะกอก กลีเซอริน หรือกลีเซอรอล มาจากคำว่า glykys แปลว่า “หวาน” โดยในระยะแรกมีการใช้ประโยชน์สำหรับเป็นส่วนผสมของกาว ทำให้กาวมีความเหนียวมากขึ้น รวมถึงใช้เป็นส่วนผสมของสีย้อม และน้ำหมักต่อมาถูกประยุกต์ใช้สำหรับทำระเบิดไดนาไมต์ ในรูปของไตรกลีเซอริน ผสมกับซิลิกา

#### 2.1.1 ข้อแตกต่างของกลีเซอรินกับกลีเซอรอล

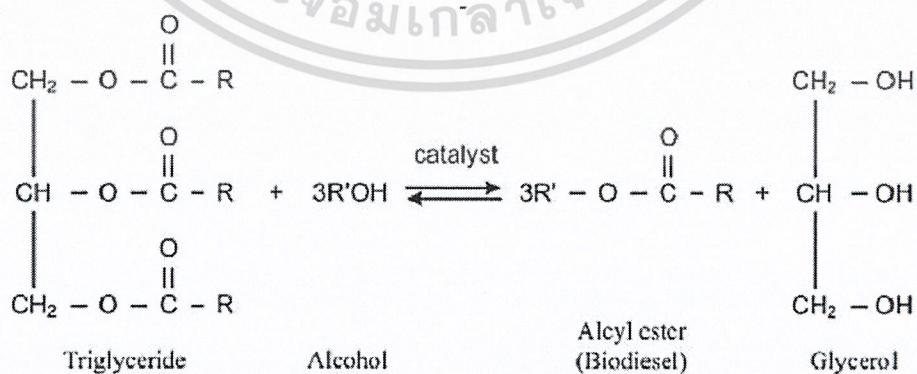
กลีเซอริน และกลีเซอรอล ถือเป็นสารเดียวกันแต่ผู้ใช้ทั่วไปมักเรียก กลีเซอริน ซึ่งกลีเซอรินจะมีความบริสุทธิ์น้อยกว่า มักมีการปนเปื้อนสิ่งต่างๆ เช่น น้ำ สี เป็นต้น และกลีเซอรินจะใช้เรียกสำหรับอ้างถึงสารละลายในทางการค้าของกลีเซอรอลที่มีน้ำเจือปนและมีกลีเซอรอลเป็นองค์ประกอบ โดยส่วนใหญ่ กลีเซอรอลดิบจะมีความบริสุทธิ์ประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์ และความบริสุทธิ์มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ มักเป็นผลิตภัณฑ์ค้าขายในเชิงพาณิชย์ สำหรับชื่ออื่นนอกเหนือจาก Glycerol หรือ Glycerin ได้แก่ propane-1,2,3-triol, 1,2,3-propanetriol, 1,2,3 trihydroxypropane, glyceritol และ glycylic alcohol กลีเซอรอล ที่มีจำหน่ายในปัจจุบันมักมีสถานะเป็นของแข็งหรือของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีองค์ประกอบและกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันโดยสถานะของเหลวเป็นสถานะปกติของกลีเซอรอล ส่วนกลีเซอรินก่อนที่เป็นผลิตภัณฑ์จำหน่ายตามท้องตลาดสำหรับทำสบู่ก้อนใส่ทั่วไปจะมีส่วนผสมของเอทิลแอลกอฮอล์ และกลีเซอรินเหลว ได้เป็นกลีเซอรินก่อนที่เรียกกันทั่วไป สำหรับกลีเซอรินก่อนที่จำหน่ายในร้านค้ามักใช้สำหรับการผลิตสบู่ในครัวเรือนรวมถึงการใช้ในภาคอุตสาหกรรม ส่วนกลีเซอรินเหลวมักใช้ในภาคอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่

### 2.1.2 แหล่งที่มาของกลีเซอรอล

ในร่างกายของสิ่งมีชีวิตนั้นพบว่ากลีเซอรอลถูกสังเคราะห์ได้จากน้ำตาลกลูโคส โดยกลูโคสจะสลายตัวในวิถีไกลโคไลซิสได้เป็น Dihydroxyacetone phosphate ซึ่งจะถูกใช้เป็นสารตัวกลางในการสังเคราะห์กลีเซอรอล เมื่อน้ำกลีเซอรอลมาทำปฏิกิริยากับกรดไขมันจะได้เป็นไตรกลีเซอไรด์หรือฟอสโฟลิปิดซึ่งเป็นไขมันที่สะสมเพื่อใช้เป็นพลังงานสำรองในร่างกาย และเมื่อร่างกายของสัตว์อยู่ในสภาวะอดอาหารหรือขาดพลังงาน ไขมันสะสมนี้จะถูกสลายเพื่อนำกรดไขมันไปใช้ในการสร้างพลังงาน ส่วนกลีเซอรอลที่ได้จากการสลายไขมันนั้นจะสามารถนำไปสังเคราะห์กลูโคสหรือเข้าสู่วิถีไกลโคไลซิสเพื่อนำไปสร้างพลังงานให้แก่ร่างกาย ในระบบอุตสาหกรรม กลีเซอรอลนั้นพบว่าเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จาก 3 กระบวนการหลัก คือ การผลิตสบู่ การผลิตกรดไขมัน และการผลิตอัลคิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล ในการผลิตไบโอดีเซลจะมีกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อนำมากลั่นแยกเมทานอลออกไปแล้ว จะได้กลีเซอรอลที่มีระดับความบริสุทธิ์ที่แตกต่างกันออกไป เช่น กลีเซอรอลที่มีความบริสุทธิ์ 82-85 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นสารที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ขณะที่กลีเซอรอลที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.7 เปอร์เซ็นต์ จะสามารถนำมาใช้ในกระบวนการผลิตเครื่องสำอางรวมทั้งผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของการผลิตไบโอดีเซล [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอล

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอล [9]

สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	ข้อมูล
สูตรทางเคมี	$\text{CH}_2\text{OH}-\text{CHOH}-\text{CH}_2\text{OH}$ หรือ $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$
น้ำหนักโมเลกุล	92.09 g/mol
สถานะและสี	ของเหลว, ไม่มีสี
ความถ่วงจำเพาะ	1.2605
ค่าดัชนีหักเหแสง	1.4746
จุดหลอมเหลว	17.9 °C
จุดเดือด	290 °C
สมบัติการละลายใน 100 ส่วน	
น้ำ	ละลายดีมาก
แอลกอฮอล์	ละลายดีมาก
อีเทอร์	ไม่ละลาย
ความร้อนของการหลอมเหลวที่ 18.07 °C	47.49 cal/g
ความหนืดของกลีเซอรอลเหลวที่	
ความบริสุทธิ์ 100 %	10 cP
ความบริสุทธิ์ 50 %	25 cP
การแพร่กระจายใน	
i-Amyl alcohol	$0.12 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$
เอทานอล	$0.56 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$
น้ำ	$0.94 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$

สำหรับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอลดังแสดงในตารางที่ 2.1 พบว่ากลีเซอรอลละลายได้ดีทั้งในน้ำ เมทานอล เอทานอล ไอโซเมอร์ของโพรพานอล บิวทานอลเพนทานอล รวมทั้งฟินอล โกลคอล โพรเพนไดออลเอมีน และสารประกอบที่เป็นเฮเทอโรไซคลิก ไดเอทิลอีเทอร์ เอทิลเอสเทอร์ และ ไดออกเซน ไม่ละลายในตัวทำละลายจำพวกเฮโลเจน เช่น คลอโรฟอร์ม เป็นต้น ดังนั้นการที่กลีเซอรอลละลายได้ในสารหลายประเภท จึงถูกใช้เป็นตัวทำละลายที่มีประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมยาอาหารและเครื่องสำอาง เป็นต้น นอกจากนั้น กลีเซอรอลยังสามารถทำปฏิกิริยาได้เหมือนกับแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.4 ประโยชน์ของกลีเซอรอล

1. ใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากสามารถละลายได้ดีในน้ำ และแอลกอฮอล์
2. สำหรับอุตสาหกรรมเคมีใช้สำหรับเป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารประกอบโพลีออล (Polyol) สำหรับผลิตโฟม
3. กลีเซอรอล ที่มีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 55 จะมีรสหวานสามารถใช้เป็นสารทดแทนน้ำตาลได้
4. กลีเซอรอล ที่เป็นสารจำพวก Hydroscopic มีคุณสมบัติดูดซับความชื้นในบรรยากาศได้ดี จึงนิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความนุ่ม ความยืดหยุ่น และเป็นครีม เช่น อุตสาหกรรมพลาสติกเพื่อให้ความอ่อนตัว และยืดหยุ่นได้ดี
5. ใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์เพื่อทำหน้าที่เป็น Thickening agent หรือ Bodying agent เพราะสามารถให้ความหนืดได้ดี
6. ใช้เป็นส่วนผสมสำหรับผลิตภัณฑ์เพื่อรักษาความชุ่มชื้น เช่น น้ำยาบ้วนปาก ยาสีฟัน สบู่
7. ใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ยา อาหาร และเครื่องดื่ม เนื่องจากเป็นสารทดแทนน้ำตาลได้
8. ใช้ฉีดพ่นหรือเคลือบผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเพื่อรักษาความสด ป้องกันการระเหยของน้ำ เช่น ใช้พ่นใบยาสูบ
9. ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางสำหรับเป็นสารอิมัลชันในผลิตภัณฑ์ครีม และเป็นสารที่ทำหน้าที่รักษาความชุ่มชื้นทั้งในส่วนผสมของผลิตภัณฑ์และผิว

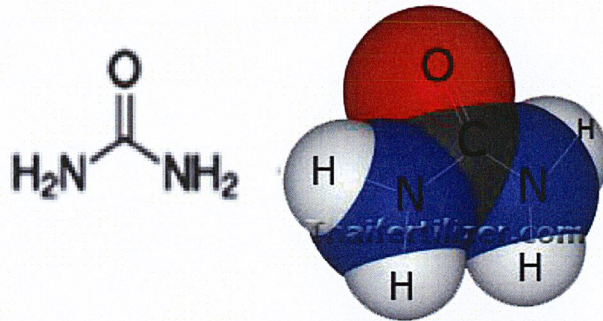
## 2.2 ยูเรีย (Urea) [12]

ปุ๋ยยูเรีย คือสารอินทรีย์สังเคราะห์ ที่มีไนโตรเจน (N) เป็นส่วนประกอบในอัตราส่วนที่สูงมาก ถึง 46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปุ๋ยยูเรีย เป็นปุ๋ยเคมีมาตรฐาน ที่สำคัญที่สุด สูตรปุ๋ยของปุ๋ยยูเรีย คือ 46-0-0 เนื่องจากมีสัดส่วนไนโตรเจนสูงที่สุด จึงใช้เป็นแม่ปุ๋ยไนโตรเจน ปุ๋ยยูเรีย 46-0-0 ใช้ประโยชน์เพื่อเป็นธาตุอาหารหลักของพืช โดยเฉพาะในช่วงแรกของการเพาะปลูกที่ต้องเร่งการเจริญเติบโตของพืชอย่างรวดเร็ว ทำให้พืชมีลำต้นยาว มีใบดก ใบใหญ่ ใบสีเขียวเข้ม น้ำหนักดี ปุ๋ยยูเรีย ตามกฎหมายเรียกว่า "ปุ๋ยเคมียูเรีย" โดยต้องมีปริมาณไนโตรเจนไม่ต่ำกว่า 44 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณไบยูเรตต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณความชื้นต่ำกว่า 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ชื่ออื่น ๆ ของปุ๋ยยูเรีย (Urea fertilizer) เช่น ยูเรีย 46-0-0, ปุ๋ย 46-0-0, ปุ๋ยยูเรีย 46-0-0, แม่ปุ๋ยยูเรีย, แม่ปุ๋ยไนโตรเจน, ปุ๋ยไนโตรเจน(Nitrogen fertilizer), คาร์บาไมด์(Carbamide), Carbonyl diamide, Carbonyldiamine, Diaminomethanal, Diaminomethanone

สูตรเคมีของปุ๋ยยูเรีย (Urea chemical formula) ปุ๋ยยูเรีย มีสูตรเคมีคือ  $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$  หรือ  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  บางครั้งเขียน  $\text{NH}_2\text{CONH}_2$  เพื่อแสดงถึงลักษณะโครงสร้างของยูเรีย และการจับตัวของโมเลกุลกลุ่มอะมิโน ( $\text{NH}_2$ ) 2 กลุ่ม กับ โมเลกุลกลุ่มคาร์บอนิล ( $\text{C}=\text{O}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เฉพาะในสถาบันเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ประการใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 โมเลกุลปุ๋ยยูเรีย (Urea molecule) [12]

คุณสมบัติของปุ๋ยยูเรีย (Urea property) มีผลึกสีขาว มีกลิ่นเฉพาะตัว เป็นตัวดูดความชื้นได้ดี ละลายน้ำได้ดีมากที่อุณหภูมิห้อง ยูเรีย 1.5 กิโลกรัม สามารถละลายหมดในน้ำเปล่า 1 กิโลกรัมได้ มีจุดหลอมเหลวประมาณ 133 องศาเซลเซียส (สูงกว่าน้ำเดือด) ไม่ติดไฟ

### 2.2.1 ชนิดของปุ๋ยยูเรีย (Urea type)

1. ปุ๋ยยูเรียเม็ดโพน (Granular urea) ปุ๋ยยูเรียเม็ดโพน เป็นปุ๋ยที่มีเม็ดขนาดใหญ่ 2-4 มิลลิเมตร มีสีขาวเหมือนเม็ดโพน ดังในรูปที่ 2.4 นิยมใช้ทางการเกษตร เหมาะกับการหว่าน และใช้กับเครื่องพ่นปุ๋ยทั่วไปได้ ปุ๋ยยูเรียเม็ดโพนเป็นแม่ปุ๋ยหลักไนโตรเจน สำหรับโรงงานผลิตปุ๋ยบด โดยนำไปบดปุ๋ย (คลุกปุ๋ย) กับแม่ปุ๋ยชนิดอื่น เช่น แม่ปุ๋ยแคป (DAP) 18-46-0 แม่ปุ๋ยมีอบ (MOP) 0-0-60 และฟิลเลอร์ ด้วยการคลุกเคล้า เพื่อให้ได้ปุ๋ยสูตรต่าง ๆ ตามต้องการ เช่น ปุ๋ยสูตรเสมอ 15-15-15 ปุ๋ยสูตร 16-16-8



รูปที่ 2.4 ปุ๋ยยูเรียเม็ดโพน [12]

2. ปุ๋ยยูเรียเม็ดเล็ก หรือเม็ดสาคุ (Prilled urea) ปุ๋ยยูเรียเม็ดเล็ก หรือเม็ดสาคุ เป็นปุ๋ยที่มีเม็ดขนาดเล็ก 1-3 มิลลิเมตร มีสีขาวใสเหมือนเม็ดสาคุ ดังรูปที่ 2.5 เฉพาะในประเทศไทยนิยมใช้ทางการเกษตรน้อยกว่าปุ๋ยยูเรียเม็ดโพน แต่ใช้ได้ดีกับต้นไม้เหมือนปุ๋ยยูเรียเม็ดโพน เพียงแต่ไม่เป็นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ ได้  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ ได้  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปุ๋ยยูเรียเม็ดเล็กนิยมใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์เพื่อเสริมโปรตีน (ไม่ใช้ปุ๋ยยูเรียเม็ดโพน) เพื่อเพิ่มโปรตีนสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้องต่าง ๆ เช่น วัว ควาย แพะ แกะ นอกจากนี้ปุ๋ยยูเรียเม็ดเล็ก ยังใช้สำหรับงานอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ใช้เป็นสารให้ความเย็น เนื่องจากปุ๋ยยูเรียเวลาละลายจะมีความสามารถดูดความร้อนได้สูง (ทำให้สิ่งรอบข้างเย็นลง) ใช้เป็นส่วนผสมในพลาสติก เพื่อเพิ่มคุณสมบัติที่ดี ใช้เป็นกาว ใช้เป็นส่วนผสมวัตถุไวไฟ และอื่นๆ อีกมากมาย



รูปที่ 2.5 ปุ๋ยยูเรียเม็ดเล็ก หรือเม็ดสาคุ [12]

ปุ๋ยยูเรียทั้ง 2 ชนิดมีสูตรเคมี และคุณสมบัติทางเคมีที่เหมือนกัน แตกต่างกันเพียงลักษณะทางกายภาพของเม็ดปุ๋ยเท่านั้น คือ ขนาดเม็ดใหญ่เล็กแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบลักษณะ ปุ๋ยยูเรียเม็ดโพน ปุ๋ยยูเรียเม็ดสาคุ [12]

	ปุ๋ยยูเรียเม็ดโพน	ปุ๋ยยูเรียเม็ดสาคุ
ไนโตรเจน	มากกว่า 46%	มากกว่า 46%
ขนาด *	2.0 - 4.0 มิลลิเมตร มากกว่า 90%	1.0 - 2.5 มิลลิเมตร มากกว่า 90%
ไบยูเรต	ไม่เกิน 1%	ไม่เกิน 1%
ความชื้น **	ไม่เกิน 0.5%	ไม่เกิน 0.5%
สี	ขาวสะอาด ไม่มีเม็ดดำเจือปน	ขาวสะอาด ไม่มีเม็ดดำเจือปน
กัมมันตภาพรังสี	ไม่มี	ไม่มี
อื่น ๆ	เทไหลได้ ไม่จับเป็นก้อนแข็ง ไม่มีสารพิษใด ๆ เจือปน	เทไหลได้ ไม่จับเป็นก้อนแข็ง ไม่มีสารพิษใด ๆ เจือปน

\* ขนาด เป็นอย่างเดียวกันที่แตกต่างกัน ของปุ๋ยยูเรียทั้ง 2 ชนิด

\*\* ความชื้น ปุ๋ยมีความชื้นต่ำมาก ทำให้เก็บไว้ได้นานโดยไม่เสื่อมสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 ประโยชน์ของยูเรีย

1. ประโยชน์ของยูเรียเป็นปุ๋ย (Urea as fertilizer) ปุ๋ยยูเรีย 46-0-0 เป็นแม่ปุ๋ยที่ให้แร่ธาตุอาหารหลักไนโตรเจน ซึ่งพืชทุกชนิดมีความต้องการในปริมาณที่สูงมาก โดยทั่วไปไนโตรเจนเป็นแร่ธาตุอาหารในดินที่มีไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช จึงมีความจำเป็นต้องใส่เพิ่มในทุกกรณี เพื่อให้พืชเจริญเติบโตงอกงาม ได้ผลผลิตที่ดี โดยปุ๋ยยูเรีย ช่วยทำให้พืชมีใบสีเขียว มีส่วนในการสังเคราะห์แสง ทำให้พืชเจริญเติบโตมีความสูง ใบเจริญงอกงามมีขนาดใหญ่ ใบดกหนา ใบสีเขียวเข้ม และช่วยเพิ่มโปรตีนในผลผลิต

2. ประโยชน์ของยูเรียเป็นอาหารสัตว์เสริมโปรตีน (Urea as feedstuff) ปุ๋ยยูเรีย 46-0-0 นิยมใช้เป็นอาหารสัตว์เสริมโปรตีนที่สำคัญสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้อง เช่น วัวเนื้อ วัวนม ควาย โค กระบือ แพะ แกะ กวาง เพราะจุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก (Rumen หรือ กระเพาะ ผ้าชีรีว) ของสัตว์เคี้ยวเอื้องสามารถเปลี่ยนยูเรียในอาหารให้เป็นแก๊สแอมโมเนีย ซึ่งอุดมไปด้วยธาตุไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของกรดอะมิโนเพื่อให้สัตว์นำไปสร้างเป็นโปรตีน นอกจากนี้ยูเรียถือเป็นอาหารเสริมสำหรับสัตว์ที่ให้โปรตีนในราคาถูกที่สุด ถูกกว่าปลาป่น และกากถั่วต่างๆ เพราะให้โปรตีนสูงถึง 287.5 เปอร์เซ็นต์

ข้อควรระวัง ไม่สามารถให้ยูเรียเป็นอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้องได้โดยตรง หรือให้เป็นอาหารสัตว์ในปริมาณมากเกินไป เพราะอาจเป็นอันตรายและทำให้สัตว์ตายได้

3. ประโยชน์ของยูเรียเป็นสารเคมี (Urea as chemicals) ปุ๋ยยูเรีย 46-0-0 ใช้เป็นสารเคมีที่เป็นส่วนประกอบในขบวนการผลิตสินค้าอุปโภคบริโภคหลายชนิด เช่น เป็นส่วนผสมในการผลิตปลั๊กไฟฟ้า ผลิตสารให้ความเย็น ผลิตกาว เป็นส่วนผสมในการพิมพ์สีผ้า เป็นต้น

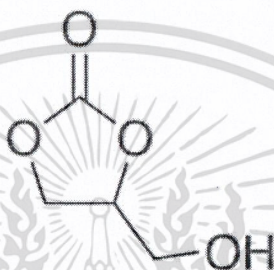
### 2.2.3 กรรมวิธีการผลิตปุ๋ยยูเรีย (Urea production)

เริ่มจากการดูดแก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ ) จากอากาศ และนำแก๊สธรรมชาติมาผลิตแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) (บางโรงงานผลิตจากถ่านหิน) มาผ่านกระบวนการผลิตเป็นแอมโมเนีย ( $NH_3$ ) และได้ผลพลอยได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) หลังจากนั้นนำแอมโมเนียเหลว และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ผลิตได้ก่อนหน้านี้มาผ่านขบวนการทางเคมี ที่ความร้อนสูงประมาณ 180 องศาเซลเซียส ที่ความดันประมาณ 200 บาร์ แล้วนำมาตกผลึก จะได้เป็นปุ๋ยยูเรีย อาจกล่าวได้อย่างง่ายๆ ว่า ปุ๋ยยูเรียเป็นปุ๋ยที่ผลิตจากแก๊สธรรมชาติ (เพราะแก๊สไนโตรเจนดูมาจากอากาศ) อย่างไรก็ตามในขบวนการผลิต จะได้สารพิษที่ไม่ต้องการปะปนมาด้วยคือ ไบยูเรต (Biuret) ซึ่งจำเป็นต้องควบคุมให้มีปริมาณต่ำ และใช้เป็นตัวแบ่งเกรดปุ๋ยยูเรียโดยทั่วไป กำหนดให้ไบยูเรตไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ อันเนื่องมาจากการผลิตแอมโมเนีย ต้องใช้แก๊สธรรมชาติ (หรือถ่านหิน) เป็นวัตถุดิบ ทำให้ราคาแก๊สธรรมชาติ (หรือถ่านหิน) มีผลโดยตรงต่อต้นทุนการผลิตปุ๋ยยูเรีย และส่งผลต่อราคาขายปุ๋ยยูเรียอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 กลีเซอรอลคาร์บอเนต (Glycerol carbonate) [4,5]

กลีเซอรอลคาร์บอเนตมีสูตรโมเลกุล คือ  $C_4H_6O_4$  มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.6 และมีชื่อทางเคมีว่า 4-hydroxymethyl-2-oxo-1,3-dioxolane มีส่วนที่เป็น Active site 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็น 3 อะตอมคาร์บอนของวงไดออกโซเลน และส่วนที่ต่อออกมาของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) กลีเซอรอลคาร์บอเนตเป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่ได้จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้กลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้น เป็นของเหลวที่มีความหนืด ไม่ติดไฟ ไม่เป็นพิษ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น สามารถละลายน้ำได้ และย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable) คุณสมบัติอื่นๆ แสดงในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของโมเลกุลกลีเซอรอลคาร์บอเนต [4]

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของกลีเซอรอลคาร์บอเนต

มวลโมเลกุล	$118.09 \text{ g mol}^{-1}$
ความหนาแน่น	$1.4 \text{ g ml}^{-1}$
จุดเดือด	$353.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$
จุดหลอมเหลว	$-69 \text{ }^{\circ}\text{C}$
จุดวาบไฟ	$190 \text{ }^{\circ}\text{C}$
ความหนืด	$85.4 \text{ cP}$

### 2.3.1 ประโยชน์ของกลีเซอรอลคาร์บอเนต

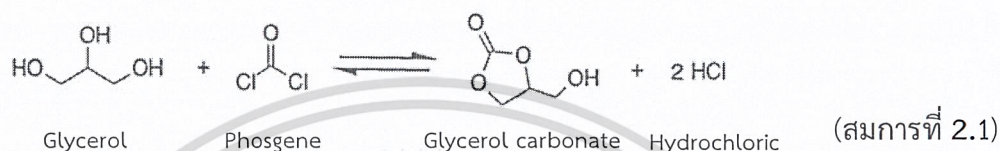
เนื่องด้วยคุณสมบัติของกลีเซอรอลคาร์บอเนตที่น่าสนใจ ทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ทั้งใช้เป็นตัวทำละลายที่เป็น ไบโอเบส (Biobased) ใช้เป็นตัวทำละลายในการสังเคราะห์พอลิเมอร์อย่างโพลีเอสเทอร์ โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate) โพลียูรีเทน และโพลีเอไมด์ (Polyamide) ใช้เป็นตัวทำละลายในเรซินและพลาสติก เช่น เซลลูโลสอะซิเตส (Celluloseacetate) ไนลอน (Nylon) และ โพลีอะคริโลไนไตรล์ (Polyacrylonitrile) ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ในการผลิตลิเทียมแบตเตอรี่ ใช้เป็นสารที่ทำให้คงรูป (Curing agent) ในการผลิตซีเมนต์และคอนกรีต ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เช่น ยาทาเล็บ โดยจะช่วยให้เล็บไม่แตกหักและมีความชุ่มชื้น ใช้เป็นเมมเบรนเอกซสารนี้เป็นเอกซสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเหลว (Liquid membrane) ในกระบวนการแยกแก๊ส (Gas separation) ใช้เป็นสารเติมแต่ง (Additive) ในอุตสาหกรรมสี เป็นต้น

## 2.4 ปฏิกริยาการเกิดกลีเซอรอลคาร์บอเนตโดยมีกลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้น [4]

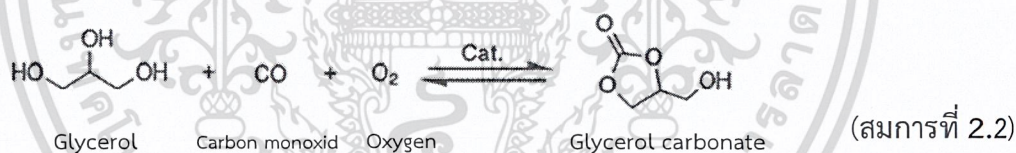
วิธีการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตโดยมีกลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้นนั้น มี 6 วิธี

1. การสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตจากกลีเซอรอลกับฟอสจีน (Phosgene)



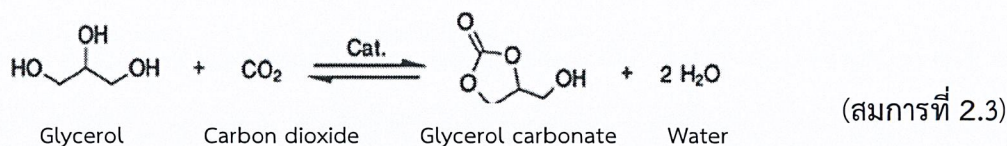
จากสมการที่ 2.1 แสดงการทำปฏิกิริยาฟอสจีนเนชัน (Phosgenation) ระหว่างกลีเซอรอลและฟอสจีน เป็นปฏิกิริยาที่สามารถทำได้ง่าย และให้ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนตสูง แต่ข้อเสียของการใช้ฟอสจีนคือ มีความเป็นพิษ อันตรายสูง และไม่ปลอดภัยทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและในระดับอุตสาหกรรม

2. การสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตจากกลีเซอรอลกับคาร์บอนมอนอกไซด์



จากสมการที่ 2.2 แสดงการทำปฏิกิริยาออกซิเดทีฟคาร์บอกซิเลชัน (Oxidative carboxylation) ระหว่างกลีเซอรอลกับคาร์บอนมอนอกไซด์และออกซิเจน เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ให้ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนตสูง แต่มีข้อเสียคล้ายกับการทำปฏิกิริยาของกลีเซอรอลกับฟอสจีน คือ เป็นปฏิกิริยาที่มีความเป็นพิษ อันตราย และเป็นการทำปฏิกิริยาแบบรุนแรง (Supercritical)

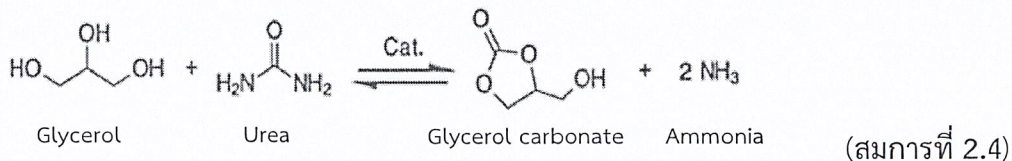
3. การสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตจากกลีเซอรอลกับคาร์บอนไดออกไซด์



จากสมการที่ 2.3 แสดงการทำปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชัน (Carboxylation) ระหว่างกลีเซอรอลกับคาร์บอนไดออกไซด์ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลคาร์บอเนตและน้ำ ข้อดีของวิธีนี้คือปลอดภัย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

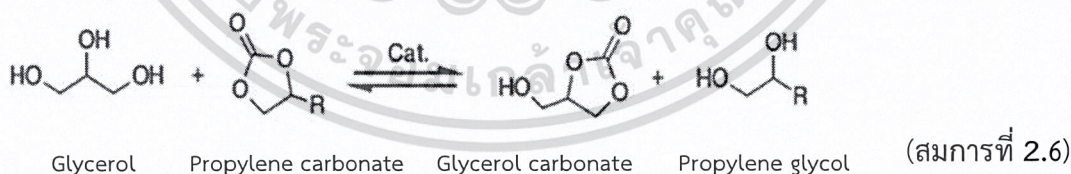
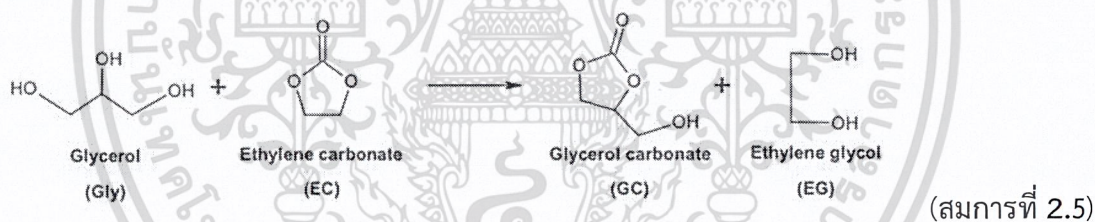
มิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ข้อเสียคือ มีค่าอุณหพลศาสตร์ที่จำกัด (Thermodynamic limited) ส่งผลให้ได้ผลของกลีเซอรอลคาร์บอเนตค่อนข้างต่ำ และต้องทำภายใต้สภาวะรุนแรง

#### 4. การสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตจากกลีเซอรอลกับยูเรีย



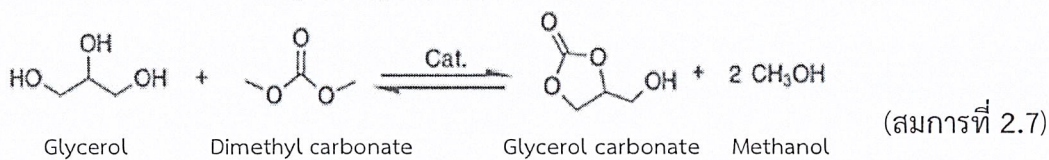
จากสมการที่ 2.4 เป็นการทำปฏิกิริยาคาร์บอนิลเลชัน (Carbonylation) ระหว่างกลีเซอรอลและยูเรีย ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ กลีเซอรอลคาร์บอเนตและแก๊สแอมโมเนีย โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด (Lewis acid) ปฏิกิริยานี้มีข้อดีคือ ให้ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนตสูง แต่ข้อเสียคือ การทำปฏิกิริยาต้องทำในสถานะสุญญากาศ และการแยกกลีเซอรอลคาร์บอเนตออกจากแอมโมเนียต้องทำในสถานะแก๊ส

5. การสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตจากกลีเซอรอลกับแอลคิลคาร์บอเนต (Alkyl carbonate) ได้แก่ เอทิลีนคาร์บอเนต โพรพิลีนคาร์บอเนต แสดงในสมการที่ 2.5 และสมการที่ 2.6



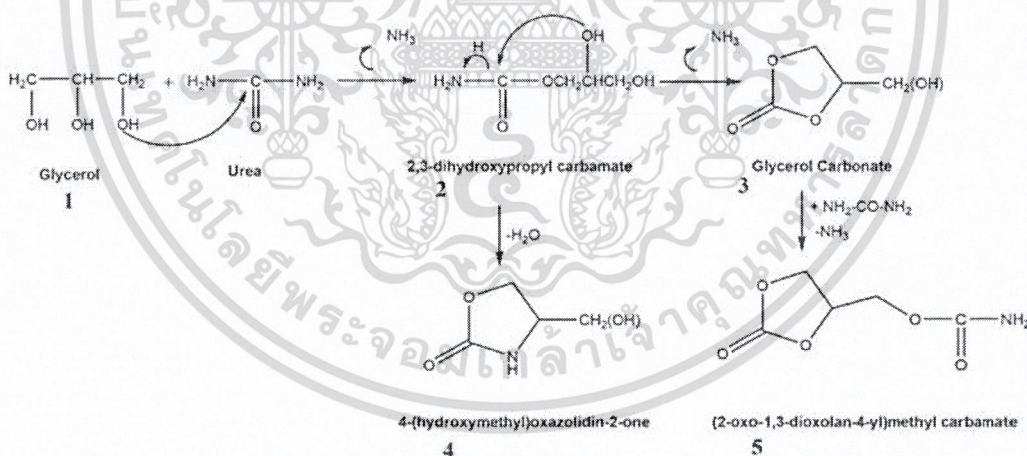
ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) ของกลีเซอรอลกับแอลคิลคาร์บอเนต เช่น เอทิลีนคาร์บอเนต ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ คือ กลีเซอรอลคาร์บอเนต และเอทิลีนไกลคอล ข้อดีของวิธีนี้คือ ให้ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนตสูง แต่มีข้อเสียคือ การแยกผลิตภัณฑ์ระหว่างกลีเซอรอลคาร์บอเนตและเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) ทำได้ยาก เนื่องจากผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิดมีจุดเดือดสูง นอกจากนี้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าคงที่สมดุลทางเคมิ (Chemical equilibrium constant) มีค่าลดลง เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตจากกลีเซอรอลกับไดแอลคิลคาร์บอเนต (Dialkyl carbonate) ได้แก่ ไดเมทิลคาร์บอเนต ไดเอทิลคาร์บอเนต



จากสมการที่ 2.7 เป็นการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรอลกับไดแอลคิลคาร์บอเนต เช่น ไดเมทิลคาร์บอเนต ผลิตภัณฑ์และผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นคือกลีเซอรอลคาร์บอเนตและเมทานอล ตามลำดับ โดยวิธีนี้พบว่าข้อดี คือ เป็นปฏิกิริยาที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ได้ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนตสูง การแยกผลิตภัณฑ์ออกจากกันสามารถทำได้ง่าย เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าคงที่สมดุลทางเคมีมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นเมทานอลที่เป็นผลพลอยได้สามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้อีกด้วย แต่ข้อเสียของปฏิกิริยานี้ คือ ไดเมทิลคาร์บอเนตที่ถูกใช้เป็นสารตั้งต้นนั้นมีราคาแพง

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตด้วยการทำปฏิกิริยาคาร์บอนิลเลชัน (Carbonylation) ระหว่างกลีเซอรอลและยูเรียมีกลไกการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนิลเลชันของกลีเซอรอลกับยูเรีย [13]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาเริ่มจากกลีเซอรอลทำปฏิกิริยากับยูเรียได้สารมัธยันตร์ (Intermediate) เป็น 2,3-dihydroxypropyl carbamate และได้แก๊สแอมโมเนีย 1 โมเลกุล หลังจากนั้นสารมัธยันตร์ 2,3-dihydroxypropyl carbamate สามารถเกิดปฏิกิริยาปิดวง (Ring-closing reaction) และกลายเป็น กลีเซอรอลคาร์บอเนต (Glycerol carbonate) รวมถึงได้แก๊สแอมโมเนียเพิ่มอีก 1 โมเลกุล หรืออีก เอกสารทางหนึ่งสารมัธยันตร์ตัวดังกล่าวสามารถเกิดเป็น 4-(hydroxymethyl)oxazolidin-2-one จากการ ค้า ไม่ว่าจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) ได้ 1 โมเลกุลของน้ำออก ส่วนตัวผลิตภัณฑ์กลีเซอรอลคาร์บอเนต

เนตนั้นก็สามารถเกิดปฏิกิริยากับยูเรียอีกโมเลกุลหนึ่งได้เป็น (2-oxo1,3-dioxolan-4-yl)methyl carbamate

#### 2.4.1 เปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์กลีเซอรอลคาร์บอนेटที่ได้โดยการใช้สารตั้งต้นตัวเร่งปฏิกิริยา และสภาวะที่ต่างกัน

ตารางที่ 2.4 ปริมาณผลิตภัณฑ์กลีเซอรอลคาร์บอนेटโดยใช้สารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน [14]

Reactants, molratio	Catalyst	Solvent	Temperature (°C)	Pressure (Mpa)	Reaction time (h)	GC yield (%)
Glycerol + CO						
Excess CO and O <sub>2</sub>	10 mol% CuCl	Free	110	0.6	63	47
Excess CO and O <sub>2</sub>	11 mol% CuCl	Nitrobenzene	130	0.8	20	96
Excess CO and O <sub>2</sub>	0.25 mol% PdCl <sub>2</sub> (phen) + 2.5 mol% KI	DMF	140	3	2	85
5 : 1.5 : 3 : 1 (Et <sub>3</sub> N:CuBr <sub>2</sub> :S: glycerol)	None	DMF or DMSO	80	1	21	92
5 : 1 : 5 (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> :Se: glycerol)	None	DMF	20	0.1	6	83
Glycerol + CO <sub>2</sub>						
Excess CO <sub>2</sub>	6 mol% n-Bu <sub>2</sub> Sn(OMe) <sub>2</sub>	Free	180	5	15	7
Excess CO <sub>3</sub>	1 mol% n-Bu <sub>2</sub> SnO	MeOH	80	3.5	4	35
Excess CO <sub>4</sub>	RhCl <sub>3</sub> + PPh <sub>3</sub> + KI	MeOH	140	5	59	0.24
1 : 3 : 3 (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> :HCl: Glycerol)	KOH then HCl	Free	80	0.1	30	80
Glycerol + Ethylene carbonate (EC)						
2 : 1 (EC:glycerol)	Amberlyst A26 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Free	80	0.1	1	88

Reactants, molratio	Catalyst	Solvent	Temperature (°C)	Pressure (Mpa)	Reaction time (h)	GC yield (%)
2 : 1 (EC:glycerol)	Zeolite	Free	80	0.1	2	81
2 : 1 (EC:glycerol)	7 wt% Al/MgO hydrotalcite	Free	50	0.1	5	82
2 : 1 (EC:glycerol)	7 wt% MgO	Free	50	0.1	5	78
2 : 1 (EC:glycerol)	7 wt% Al/Mg hydrotalcite	Free	50	0.1	5	68
2 : 1 (EC:glycerol)	RNX-MCM41	Free	80	0.1	1.5	92
1 : 1.5 (EC:glycerol)	Amberlyst A26 OH <sup>-</sup>	Supercritical CO <sub>2</sub>	40	10	1	-
<b>Glycerol + Dimethyl carbonate (DMC)</b>						
2 : 1 (DMC : glycerol)	3.3 mol% tetra-n- butylammonium bromide	Free	120	0.1	6	92
3 : 1 (DMC : glycerol)	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Free	75	0.1	3	97
1 : 1 (DMC : glycerol)	6 mol% n-Bu <sub>2</sub> Sn(OMe) <sub>2</sub>	Free	180	5	15	65
3.5 : 1 (DMC : glycerol)	CaO	Free	75	0.1	1.5	91
2.5 : 1 (DMC : glycerol)	4 mol% CaO	Benzene	60	0.1	2	95
5 : 1 (DMC : glycerol)	Uncalcined Mg-Al hydrotalcite	DMF	100	0.1	1	75
2 : 1 (DMC : glycerol)	3 wt% KF/hydroxya- patite	Free	78	0.1	1	99
5 : 1 (DMC : glycerol)	Mg/Al/Zr	Free	75	0.1	1.5	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reactants, molratio	Catalyst	Solvent	Temperature (°C)	Pressure (Mpa)	Reaction time (h)	GC yield (%)
5 : 1 (DMC : glycerol)	Calcined hydrotalcite-hydromagnesite	DMF	100	0.1	0.5	79
1 : 1 (DMC : glycerol)	Lipase (Novozyme 435)	THF	60	0.1	30	99
10 : 1 (DMC : glycerol)	Lipase (Novozyme 435)	Free	70	0.1	48	90
10 : 1 (DMC : glycerol)	12 wt% lipase (Aspergillus-niger)	Free	60	0.1	4	59
10 : 1 (DMC : corn oil)	10 wt% lipase (Novozyme 435)	Free	60	0.1	15	62
6 : 1 (DMC : soybean oil)	10 wt% lipase (Novozyme 435)	tert-Butanol	60	0.1	48	92
42 : 1 (DMC : rapeseed oil)	None	Supercritical DMC	350	20	0.2	By-Product
39 : 1 (DMC : corn oil)	None	Supercritical DMC	380	15-25	0.5	By-Product
<b>Glycerol + Diethyl carbonate (DEC)</b>						
5 : 1 (DEC : glycerol)	0.5 wt% 1,3-dichlorodistannoxanes	Free	100	0.1	2	99
17 : 1 (DEC : glycerol)	Mg/Al hydrotalcite-like	Free	130	0.1	60	97
21 : 1 (DEC : glycerol)	Hydrotalcites supported on Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	DMSO	-	0.1	8	84
3 : 1 (DEC : camellia oil)	Lipases (Lipozyme)	Free	50	0.1	24	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reactants, molratio	Catalyst	Solvent	Temperature (°C)	Pressure (Mpa)	Reaction time (h)	GC yield (%)
Glycerol + Urea						
1 : 1 (urea : glycerol)	Calcined manganese sulfate	Free	150	$4.0 \times 10^{-3}$	2	61
1 : 1 (urea : glycerol)	Zinc sulfate	Free	140	$3.0 \times 10^{-3}$	2	86
1 : 1.5 (urea : 1,2-diols)	CaO, La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, ZrO <sub>2</sub> , and Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Free	150	$1.1 \times 10^{-2}$	3	28-93
1 : 1 (urea : glycerol)	γ-Zirconium phosphate	Free	145	$2.0 \times 10^{-5}$	3	80
1 : 1 (urea : glycerol)	Calcined Zn hydroxalcite	Free	145	$3.9 \times 10^{-3}$	5	72
1 : 1 (urea : glycerol)	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /ZnO nanodispersion	Free	145	0.1	4	69
1.5 : 1 (urea : glycerol)	Gold, gallium, and zinc supported on oxides and zeolite ZSM-5	Free	150	0.1	4	55
1 : 3 (urea : glycerol)	0.5 wt% calcined La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Free	140	$3.0 \times 10^{-3}$	1	91
1 : 1 (urea : glycerol)	Ionic liquids immobilized onto a structurally modified Merrifield peptide resin	Free	140	$1.4 \times 10^{-2}$	6	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reactants, molratio	Catalyst	Solvent	Temperature (°C)	Pressure (Mpa)	Reaction time (h)	GC yield (%)
Oxirane + CO <sub>2</sub>						
Propylene oxide + excess CO <sub>2</sub>	Bu <sub>3</sub> Snl + Bu <sub>4</sub> Pl	Free	40	4.9	1	100
Propylene oxide + excess CO <sub>2</sub>	TEBACL + CaCl <sub>2</sub>	Free	170	4	4	97
Oxirane + excess CO <sub>2</sub>	1-2 mol% polymer containing pendant quaternary onium (ammonium or phosphonium) salts	DMAc	80-100	0.1	48	85
Poly(glycidyl methacrylate) + excessCO <sub>2</sub>	4 mol% Nal + Ph <sub>3</sub> P	DMF	100	0.1	24	100
Allyl glycidyl ether + excess CO <sub>2</sub>	1-hexyl-3-methylimidazolium chloride	Free	100	3.45	48	98
Glycidol + excess CO <sub>2</sub>	KI + 18-crown-6	Free	120	4	4	73

## 2.5 เปลือกไข่ (Egg shell) [15]

เปลือกไข่เป็นวัสดุธรรมชาติที่ถูกทิ้งให้เป็นของเสียจำนวนมาก เนื่องจากไข่เป็นวัตถุดิบสำคัญในการประกอบอาหารทั้งในระดับครัวเรือนและในระดับอุตสาหกรรม เพราะไข่มีราคาถูก รวมทั้งยังอุดมไปด้วยสารอาหาร และสำหรับการกำจัดเปลือกไข่นั้นมักทำด้วยการฝังกลบซึ่งไม่ได้มีการใช้ประโยชน์จากเปลือกไข่ต่อ และยังสามารถส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 ลักษณะของเปลือกไข่

มีสีน้ำตาลหรือสีขาว ขึ้นกับชนิดของไข่ เป็นส่วนที่มีความแข็งแรง เพราะมีสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (หินปูน) บนเปลือกไข่มีรูพรุนเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) มีลักษณะเป็นแท่งๆมาต่อกัน ตรงรอยต่อระหว่างแท่งจะไม่สนิททำให้เกิดช่องว่าง ประโยชน์เพื่อการแลกเปลี่ยนแก๊สและการระเหยของน้ำออกจากฟองไข่ในขณะที่ฟัก ไข่ไก่แต่ละฟองจะมีรูพรุนเหล่านี้ประมาณ 6,000-8,000 รู ด้านในเปลือกไข่จะมีเยื่อหุ้มบางๆ 2 ชั้น คือ ชั้นนอกที่ติดเปลือก (Shell membrane) และ ชั้นในที่ติดกับไข่ขาว (Egg membrane) มีหน้าที่ป้องกันอันตรายจากภายนอกและให้แคลเซียมในการสร้างกระดูกให้แก่ตัวอ่อน องค์ประกอบต่างๆ ทางเคมีของเปลือกไข่แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงเปอร์เซ็นต์โดยมวลขององค์ประกอบต่าง ๆ ทางเคมีในเปลือกไข่

แร่ธาตุ	%โดยน้ำหนัก		
	เปลือกไข่ไก่	เปลือกไข่เป็ด	เปลือกไข่นกกระทา
$\text{CaCO}_3$	99.0	96.5	97.3
S	0.1	1.2	0.4
Mg	0.5	0.1	1.0
P	0.2	0.5	1.1
K	-	0.0839	-

### 2.5.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของเปลือกไข่ สามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วน ดังนี้

#### 1. ส่วนเคลือบผิว (Cuticle) และรงควัตถุ (Pigment)

เป็นส่วนที่อยู่นอกสุดมีลักษณะบางใส โดยเคลือบอยู่ที่ผิวนอกสุดของเปลือกไข่ องค์ประกอบโดยน้ำหนักประกอบด้วยโปรตีน 58-87 เปอร์เซ็นต์ คาร์โบไฮเดรต 3.5-4.4 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 2.5-3.5 เปอร์เซ็นต์ และเถ้า 3.5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเคลือบผิวนี้อาจทำหน้าที่อุดรูเปลือกไข่ ทำให้เปลือกไข่สามารถป้องกันเชื้อจุลินทรีย์ได้ และในส่วนนี้ยังมีรงควัตถุที่เกิดจากวัฏธูสีของเม็ดเลือดแดง (Porphyrin) ปะปนอยู่กับเกลือแคลเซียมของเปลือกไข่จึงทำให้เกิดสีขึ้นที่เปลือกไข่

#### 2. เปลือกไข่ (True shell)

##### 2.1 เปลือกไข่ชั้นนอกหรือชั้นฟองน้ำ (Outer shell/Spongy matrix)

เป็นส่วนที่อยู่ถัดเข้ามาหรือเป็นส่วนที่ถูกส่วนเคลือบผิวเคลือบอยู่ ซึ่งเป็นชั้นที่ผนึกกันแน่นและมีรูเล็กๆ เป็นจำนวนมากเชื่อมโยงจากชั้นในมาเปิดที่ชั้นนี้ ทำให้เปลือกไข่ชั้นนอกมีลักษณะเป็นรูพรุนแบบฟองน้ำ สำหรับส่วนประกอบที่สำคัญในชั้นนี้ ประกอบด้วยผลึกแคลเซียมที่หนาแน่นรวมเข้า

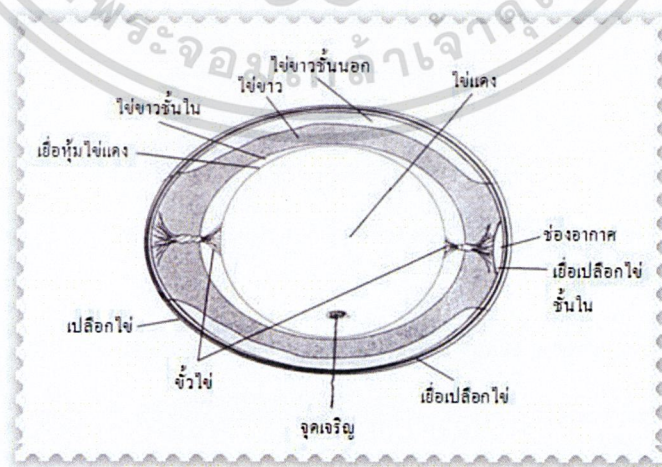
กับเมทริกซ์อินทรีย์ โดยเมทริกซ์อินทรีย์เหล่านี้จะมีลักษณะเป็นเส้นใยละเอียดกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งเปลือกไข่และเป็นสารจำพวก Protein acid mucopolysaccharide complex ที่

ประกอบด้วยโปรตีน Non-collagenous ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คาร์โบไฮเดรตหรือ Polysaccharide ชนิด Chondroitin sulphate A และ B และกรดยูโรนิกในรูป Hyaluronic acid นอกจากนี้ยังมีกาแลคโตซามีน กาแลคโตส แมนโนส ฟิวโคสและ Sialic เป็นต้น ซึ่งเมทริกซ์อินทรีย์เหล่านี้จะมีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ เช่น หมู่ Carboxyl (-COOH) และ Amine (-NH<sub>2</sub>) จึงมีผลทำให้เปลือกไขมีคุณสมบัติในการจับกับไอออนต่างๆ ได้

เปลือกไขอาจมีสีน้ำตาลหรือสีขาวขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์ของแม่พันธุ์ สีไขไม่มีผลใดๆต่อคุณค่าทางโภชนาการแต่อย่างใด เช่น ไขไก่พันธุ์เล็กฮอร์นมีเปลือกสีขาว ส่วนไขไก่พันธุ์โรดไอส์แลนด์มีสีน้ำตาล ในเปลือกไขจะมีคอลลาเจน (Collagen) สานเป็นตัวตาข่าย และมีหินปูน (แคลเซียมคาร์บอเนต) เป็นส่วนใหญ่ ทำให้เปลือกไขแข็ง เปลือกไขจะมีรูขนาดเล็กมาก มองด้วยตาเปล่าไม่เห็น อากาศและความชื้นสามารถแทรกผ่านรูเล็กๆที่อยู่ในไขได้ อากาศจำเป็นสำหรับการใช้ในการหายใจของตัวอ่อน เมื่อไขออกมาใหม่ๆจะมีเมือกเคลือบที่เปลือกไขด้านบน เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศและน้ำผ่านเข้าไปได้ เปลือกไขในช่วงแรกจึงมีลักษณะนวล เมื่อเก็บไว้นานๆ เมือกเหล่านี้จะแห้งไป เปลือกไขจึงมีอากาศถ่ายเทเข้าออกได้มากขึ้น ทำให้ไขเสียเร็ว

2.2 เปลือกไขชั้นใน (Mammillary layer)

ในชั้นนี้จะอยู่ถัดเข้ามาจากเปลือกไขชั้นนอก ประกอบด้วยสารประกอบของแมกนีเซียมกับฟอสเฟตที่ไม่อยู่ในรูปผลึกมีชั้นหนาประมาณ 0.11 มิลลิเมตร หรือเป็นเนื้อที่ประมาณ 1 ใน 3 ของความหนาของพื้นผิวไข่ทั้งฟอง มีลักษณะเป็นปุ่มหยาบๆ ครีวงกลมหรือรูปรวยที่ประกอบด้วยผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตรูป 6 เหลี่ยม โดยในแต่ละปุ่มพื้นเปลือกจะมีสารอินทรีย์รวมเข้าไปกับส่วนที่เป็นชั้นฟองน้ำ ซึ่งจะเชื่อมกับเส้นใยของเยื่อเปลือกไขด้วยพันธะไดซัลไฟด์และพันธะไฮโดรเจน ขนาดและรูปร่างของปุ่มพื้นเปลือกและการเรียงตัวของพื้นเปลือกจะแตกต่างกันตามชนิดของสัตว์ปีก แต่ละปุ่มมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.096-0.144 มิลลิเมตร ส่วนความสูงจะขึ้นกับความหนาของเปลือกชั้นใน



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของไข่ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. เยื่อเปลือกไข่ (Shell membrane)

โดยส่วนใหญ่ในชั้นนี้จะประกอบด้วยเส้นใยโปรตีนมากถึง 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเป็นโปรตีนชนิดเคราติน คอลลาเจน และอีลาสติน ซึ่งจะประสานกันและยึดติดกันแน่นกับเปลือกไข่ เส้นใยเหล่านี้จะมีหมู่ Amine ( $-NH_2$ ) ทำหน้าที่ในการจับกับไอออนของโลหะหนักนั่นเอง นอกจากนี้ในชั้นเยื่อเปลือกไข่ยังมีองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ไขมัน 3 เปอร์เซ็นต์, คาร์โบไฮเดรต 2 เปอร์เซ็นต์ และถ้าประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นพวกฟอสเฟต แคลเซียม โปรแตสเซียม แมกนีเซียม โซเดียม สังกะสี เหล็ก แมงกานีส ทองแดง โบรอน และ อะลูมิเนียม สำหรับเยื่อเปลือกไข่ในชั้นนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชั้น ด้วยกัน คือ

#### 3.1 เยื่อชั้นใน (Inner membranes)

เป็นชั้นบางเรียบหนาประมาณ 2.7 ไมโครเมตร ทำหน้าที่ล้อมรอบไข่ขาว โดยทั่วไปเยื่อชั้นในและชั้นนอกจะเชื่อมติดกันยกเว้นเมื่อไข่มีอายุมากขึ้น ส่วนที่ป้านของเปลือกไข่จะเกิดเป็นช่องอากาศหรือโพรงอากาศอากาศ (Air cell) เมื่อไข่ออกมาใหม่ๆ อุณหภูมิของไข่ยังสูงจึงไม่มีช่องว่าง เมื่อไข่เย็นลงของเหลวในไข่จะหดตัวทำให้เกิดเป็นโพรงอากาศขึ้น และถ้าหากมีน้ำระเหยออกไปมากก็จะทำให้โพรงอากาศใหญ่ขึ้น

#### 3.2 เยื่อชั้นนอก (Outer membranes)

เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างเยื่อชั้นในกับเปลือก เยื่อชั้นนี้จะติดแน่นกับเปลือกชั้นใน และขนานไปกับเปลือกไข่ เยื่อชั้นนอกนี้แบ่งออกเป็น 3 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นประสานกันด้วยร่างแหโปรตีน ชั้นนอกสุดเป็นเส้นใยโปรตีนพวกเคราติน มีลักษณะเป็นเส้นแบนขนาด 0.002-0.015 มิลลิเมตร เส้นใหญ่ชั้นกลางส่วนใหญ่เป็นมิวซินประสานกัน ขนานกับเปลือกไข่ ขนาด 0.008 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็น 2 ชั้นย่อยที่ติดกันแนบสนิทจนเกือบเป็นเนื้อเดียวกันและแยกออกจากกันได้ยาก ส่วนชั้นในจะเป็นกึ่งก้านสาขาของเส้นเคราตินเล็กๆ ประสานกันเป็นร่างแห ขนานกับผิวไข่บ้าง ตั้งฉากบ้าง ทำให้ชั้นนี้เหนียวขึ้นและมีความหนาประมาณ 0.0148 มิลลิเมตร

### 4. รูเปลือกไข่ (Pores)

เป็นตัวเชื่อมโยงจากภายนอกไปถึงเยื่อเปลือกไข่ สำหรับรูที่ผ่านเปลือกชั้นในออกมาชั้นนั้นจะมีขนาดเล็กที่สุด และเปิดกว้างเป็นแฉกผายออกที่ผิวของเปลือกชั้นในบางรูจะถูกอุดตันหรือถูกปิดด้วยเส้นใยโปรตีนทำให้รูกระชับเป็นรูปรองอยู่ได้ โดยรูขนาดใหญ่สุดมีขนาด 0.022-0.029 มิลลิเมตร ส่วนรูขนาดเล็กสุดจะมีขนาด 0.0038-0.0054 มิลลิเมตร สำหรับไข่เป็ดจะมีจำนวนรูต่อตารางเซนติเมตรมากกว่าไข่ไก่ ซึ่งไข่เป็ดจะมีจำนวนรูประมาณ 7,000-17,000 รูต่อฟอง ในแต่ละพื้นที่ของเปลือกไข่จะมีจำนวนรูไม่เท่ากัน

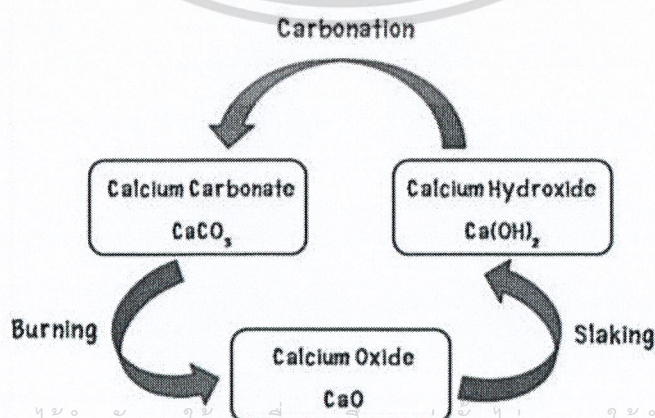
## 2.6 แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) [16,17,18]

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสูตรเคมีคือ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ชื่อตาม IUPAC คือ Calcium hydroxide ชื่ออื่นๆ เช่น Slaked lime, Milk of lime, Caustic lime, Calcium(II) hydroxide, Pickling lime, Hydrated lime, Portlandite และ Calcium hydrate ลักษณะเป็นผลึกไม่มีสีหรือผงสีขาว ไม่มีกลิ่น ได้จากการเจือจางแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) กับน้ำ สารละลายอิ่มตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์รู้จักในชื่อน้ำปูนใสมีฤทธิ์เป็นด่างคุณสมบัติอื่นๆ แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [16]

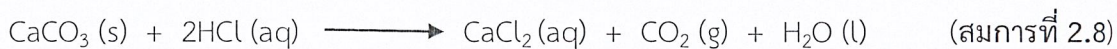
มวลโมเลกุล	$74.093 \text{ g mol}^{-1}$
จุดหลอมเหลว	$580 \text{ }^\circ\text{C}$ , $853 \text{ k}$ , $1076 \text{ }^\circ\text{F}$
ความหนาแน่น	$2.211 \text{ g cm}^{-3}$ , solid
จุดวาบไฟ	ไม่ติดไฟ
ความสามารถละลายได้ในน้ำ	$0.189 \text{ g/100 ml}$ ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) $0.173 \text{ g/100 ml}$ ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) $0.066 \text{ g/100 ml}$ ( $100 \text{ }^\circ\text{C}$ )
ความสามารถในการละลายได้	ละลายในกลีเซอรอลและกรด ไม่ละลายในแอลกอฮอล์
ดัชนีหักเหแสง ( $n_D$ )	1.574

แคลเซียมไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เมื่อแคลเซียมคาร์บอเนต ได้รับความร้อนสูงจนถึงจุดที่สามารถหลอมละลาย จะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ซึ่งจะสามารถดูดความชื้นในอากาศได้ดี และยังสามารถเปลี่ยนเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้โดยวัฏจักรของแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปตามที่แสดงดังรูปที่ 2.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามรูปที่ 2.9 วัฏจักรของแคลเซียมคาร์บอเนต [17] าสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากแคลเซียมคาร์บอเนตทำได้โดยนำแคลเซียมคาร์บอเนตทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จนได้แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) หลังจากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาต่อกับเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังแสดงสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9



## 2.7 การให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยา [7,19]

### 2.7.1 การให้ความร้อนแบบทั่วไป

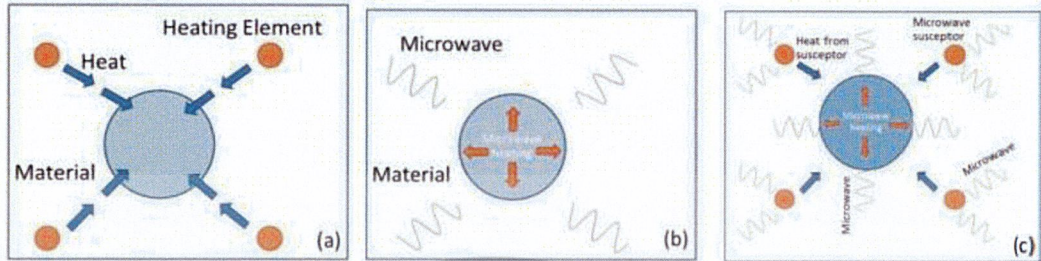
อุณหภูมิ หรือ พลังงานความร้อนจะมีผลต่อพลังงานภายในสาร โดยการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้แก่อนุภาคของสารทำให้อนุภาคของสารเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น จึงช่วยเพิ่มโอกาสในการชนกันของอนุภาคมากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มพลังงานให้แก่สารจะช่วยทำให้สารมีพลังงานภายในมากกว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นได้ เช่น การเก็บอาหารในตู้เย็นเพื่อป้องกันการเน่าเสีย เป็นต้น

### 2.7.2 การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (Microwave heating)

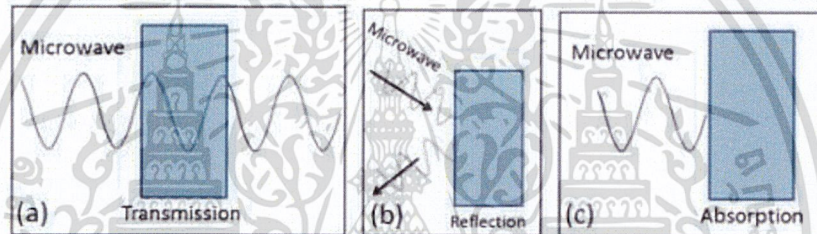
การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างวัสดุหรือสารที่ต้องการทำให้ร้อน โดยไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่อากาศรอบๆ วัสดุหรือสารนั้น ซึ่งต่างกับการให้ความร้อนตามปกติในเตาเผาทั่วไป รูปที่ 2.10 (a) และ (b) แสดงการให้ความร้อนตามปกติและแบบใช้ไมโครเวฟ ในการให้ความร้อนตามปกติอุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นโดยความร้อนที่มาจาก เส้นลวดให้ความร้อน (Heating element) โดยการพาความร้อน (Convection) หรือการแผ่ความร้อน (Radiation) และการนำความร้อน (Conduction) ที่ได้รับจากเส้นลวดให้ความร้อนจากผิววัสดุไปสู่แกนกลางของวัสดุนั้น สำหรับวิธีการให้ความร้อนแบบนี้นอกจากวัสดุจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นแล้วอากาศรอบๆ ก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย ซึ่งต่างกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ความร้อน เกิดขึ้นภายในวัสดุโดยอันตรกิริยาระหว่างวัสดุและไมโครเวฟเท่านั้น โดยไม่จำเป็นต้องทำให้อากาศรอบๆ วัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้น การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจึงมีสมรรถนะเชิงพลังงาน (Energy efficient) ที่ดีกว่าการให้ความร้อนตามปกตินอกจากนั้นในรูปที่ 2.10 (c) ยังแสดงวิธีการให้ความร้อนแบบไฮบริดโดยความร้อนจะมาจาก (1) อันตรกิริยาระหว่างวัสดุและไมโครเวฟ และ (2) ความร้อนที่มาจากตัวรับไมโครเวฟ (Microwave susceptor) ซึ่งทำจากวัสดุที่ดูดกลืนไมโครเวฟได้ดีโดยวิธีการนี้เหมาะสำหรับให้ความร้อนกับวัสดุที่ดูดกลืนไมโครเวฟได้น้อย รูปที่ 2.11 แสดงอันตรกิริยาระหว่างไมโครเวฟและวัสดุซึ่งแบ่งได้เป็น 3 กรณี ได้แก่ (a) ไมโครเวฟผ่านวัสดุโดยไม่ถูกดูดกลืนหรือถูกดูดกลืนน้อยมาก (Transparent) ซึ่งเกิดขึ้นกับวัสดุที่เป็นฉนวน เช่น วัสดุเซรามิกบางประเภทอย่างพวก แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และแก้วอย่าง ฟิวส์ควอตซ์ (Fused quartz) และไพเร็กซ์ (Pyrex) เป็นต้น (b) ไมโครเวฟไม่

ถูกดูดกลืนและสะท้อนจากผิววัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น โลหะ และ (c) ไมโครเวฟจะถูกดูดกลืนโดยตัวนำวัสดุแล้วเปลี่ยนไปเป็นความร้อนโดยการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) การสูญเสียฮิสเทอรีซิส

(Hysteresis loss) หรือการสูญเสียจากกระแสเอ็ดดี้ (Eddy current loss) โดยตัวอย่างวัสดุที่ดูดคลื่นไมโครเวฟได้ดี ได้แก่ เซรามิกบางประเภท เช่น คาร์บอน แมกนีไทท์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) เซอร์โคเนียมออกไซด์ ( $\text{ZrO}_2$ ) และ สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น



รูปที่ 2.10 (a) การให้ความร้อนตามปกติ (Conventional heating) (b) การให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ (Microwave heating) (c) การให้ความร้อนแบบไฮบริด (Hybrid heating) [7]



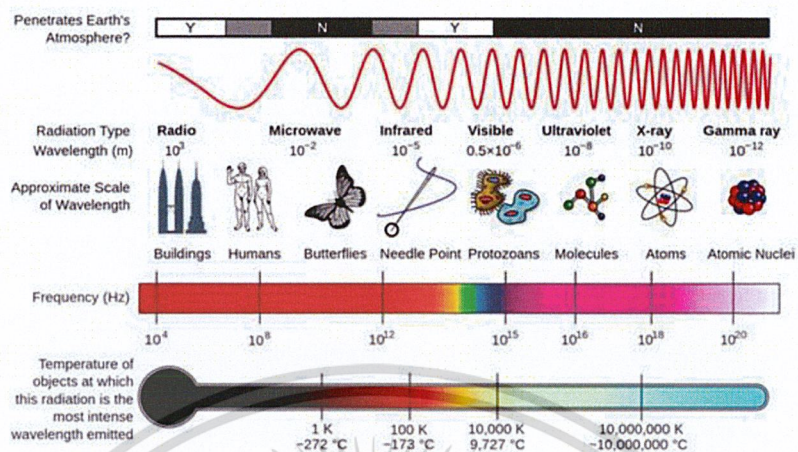
รูปที่ 2.11 (a) การส่องผ่าน (b) การสะท้อน (c) การดูดกลืน [7]

ตารางที่ 2.7 แสดงข้อดีข้อเสียของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

ข้อดี	ข้อเสีย
1. เกิดปฏิกิริยาเร็ว	1. ควบคุมพลังงานความร้อนได้ยาก
2. ได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง	2. เกิดการระเหยของน้ำ
3. เกิดสารที่ไม่ต้องการน้อย	3. อาจเกิดการระเบิดได้หากทำในระบบปิด
4. เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูง	เนื่องมาจากความดัน
5. ใช้งานง่าย	
6. ใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง	
7. ใช้กับสารที่มีปริมาณมากได้	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 ไมโครเวฟ (Microwave) [8]



รูปที่ 2.12 แสดงการผ่านมายังชั้นบรรยากาศโลก ประเภท ความยาว ระดับความยาวโดยประมาณ ความถี่ และอุณหภูมิของวัตถุที่แผ่รังสีออกมาของคลื่นแต่ละชนิด[8]

คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) ความถี่สูงชนิดหนึ่งที่สายตาสังเกตมองไม่เห็นได้ แต่สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องมือเฉพาะเท่านั้น และเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) คลื่นรังสีเอกซ์ และคลื่นรังสีแกมมา เป็นต้น แต่มีความถี่คลื่นน้อยกว่า คลื่นไมโครเวฟมีความยาวคลื่นในช่วง 1 mm ถึง 1 m มีความถี่ของช่วงคลื่นในช่วง 300 MHz ถึง 300 GHz ซึ่งมีความถี่คลื่นสูงสุดประมาณ 2,450 ล้านรอบ/วินาที โดยมีใช้ทางอุตสาหกรรมที่ความถี่ในช่วง 915 – 2,450 MHz ส่วนคลื่นความถี่ไมโครเวฟที่เหลือจะสงวนไว้ใช้ในการวิจัยและงานอื่นๆ

### 2.8.1 คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ

#### 1. การสะท้อนกลับ (Reflection)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่เป็นโลหะหรือส่วนที่มีองค์ประกอบของโลหะ คลื่นจะไม่สามารถวิ่งทะลุผ่านโลหะได้ และจะสะท้อนกลับทั้งหมด ดังนั้น อาหารที่ถูกหุ้มด้วยภาชนะดังกล่าว จะไม่เกิดการสุก

#### 2. การส่องผ่าน (Transmission)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ ได้แก่ แก้ว พลาสติก กระจก เซรามิก และไม้ เป็นต้น คลื่นจะสามารถทะลุผ่านได้ ดังนั้น วัสดุเหล่านี้จึงนิยมใช้เป็นภาชนะสำหรับรองหรือห่อหุ้มอาหารเข้าสู่ไมโครเวฟ

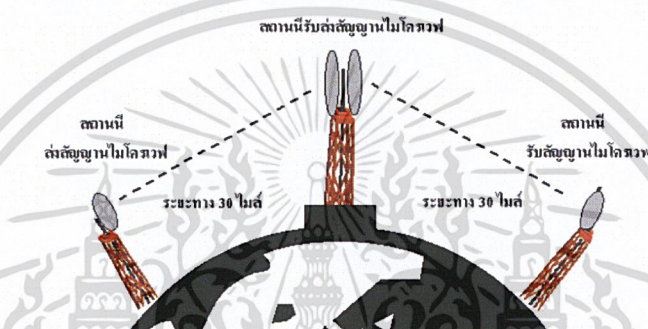
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การดูดซับ (Adsorption)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่มีน้ำหรือความชื้นภายใน คลื่นบางส่วนจะถูกดูดซับเอาไว้ ทำให้โมเลกุลของน้ำดูดซับพลังงานคลื่น และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนเอาไว้จนเกิดความร้อนตามมา รวมถึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำ ซึ่งทำให้เกิดความร้อนเช่นกัน ทั้งนี้ คลื่นไมโครเวฟหลังถูกดูดซับจะสลายตัวทันที ไม่มีการตกค้างในอาหาร

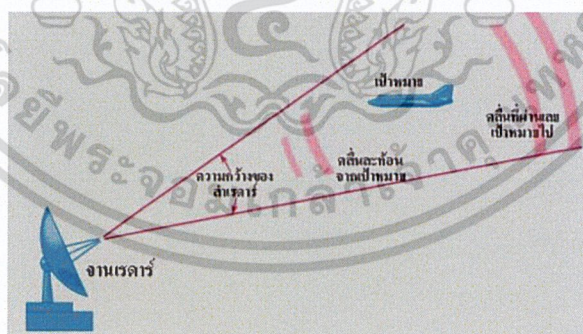
## 2.8.2 ประโยชน์ของคลื่นไมโครเวฟ

### 1. ใช้ในอุปกรณ์หรือระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม ดังในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงการใช้ประโยชน์ของคลื่นไมโครเวฟในการสื่อสาร [8]

### 2. ใช้ในระบบตรวจจับวัตถุทางอากาศ การนำร่องทางการบิน การเดินเรือ และยุทธโศปกรณ์เคลื่อนที่เรดาร์ ดังในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงการใช้ประโยชน์ของคลื่นไมโครเวฟในการตรวจจับวัตถุทางอากาศ [8]

3. ใช้ในทางการแพทย์ สำหรับการฆ่าเชื้อ หรือการรักษาด้วยการใช้ความร้อน โดยมีช่วงความยาวคลื่นที่ยาวกว่าคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ปรุงอาหารหรือมีความถี่คลื่นน้อยกว่านั่นเอง เพราะการรักษาอาการป่วยของมนุษย์จะต้องใช้ความร้อนในขนาดที่ร่างกายทนได้ ห้ามการใช้ความร้อนสูง เช่น การรักษาอาการปวดเมื่อยของกล้ามเนื้อหรือข้อ โดยใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ต่ำที่ให้ความร้อนเพียง

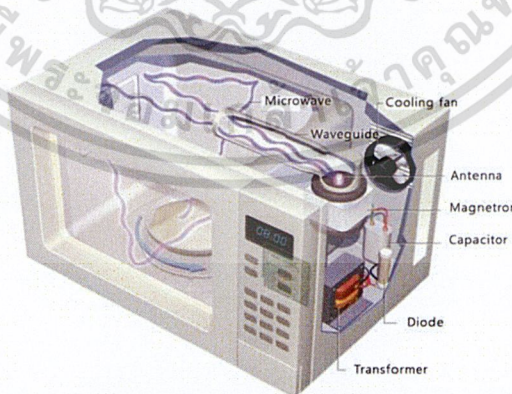
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นว่าไม่เหมาะสมในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อื่นๆ ส่วนการรักษา และทำลายเซลล์มะเร็งในร่างกาย แพทย์จะใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงขึ้นมาเล็กน้อย

4. ใช้เป็นแหล่งกระตุ้นให้เกิดความร้อนภายในอาหารหรือใช้ประกอบอาหารให้สุก หรือที่นิยมเรียกว่า เต้าไมโครเวฟ รวมถึง ใช้เป็นแหล่งให้ความร้อนในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม โดยใช้คลื่นความถี่ในช่วง 915 - 2,450 MHz

การใช้ไมโครเวฟในกระบวนการแปรรูปอาหารในระดับอุตสาหกรรมครั้งแรก ได้แก่ การผลิตมันฝรั่งทอดกรอบซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำแห้ง นอกจากนี้ ยังใช้ในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ อาจใช้ไมโครเวฟซึ่งมีทั้งระบบธรรมดา และระบบสุญญากาศ โดยนำไปช่วยเสริมในระบบการทำแห้งแบบต่างๆ ได้แก่ การทำแห้งโดยอาศัยแรงดันออสโมติก และทำแห้งด้วยตู้อบธรรมดา (Air drying) หรือนำไปเสริมในระบบการทำแห้งภายใต้สุญญากาศสำหรับอาหารที่มีองค์ประกอบที่สลายง่ายเมื่อถูกความร้อน การนำไมโครเวฟมาช่วยในการแปรรูป ได้แก่ การทำแห้งผลิตภัณฑ์อาหารเส้น (Pasta) หอมใหญ่ ขนมหั้วที่ทำจากข้าว สาหร่าย อาหารขบเคี้ยว และไข่แดงที่ผ่านการทำให้สุก ซึ่งนับว่าเป็นการพัฒนาทั้งระบบเครื่องมือ และวิธีการแปรรูปไปอีกระดับหนึ่งในความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี รวมถึงในด้านอื่นๆ เช่น

1. ใช้เพื่อทำการพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurization) เช่น ขนมหั้ว และนมเปรี้ยว
2. ใช้เพื่อฆ่าเชื้อในผลิตภัณฑ์ (Sterilization) เช่น นม และการเตรียมอาหาร
3. ใช้ในการอบ (Baking) เช่น ขนมหั้ว และโดนัท
4. ใช้ในการคั่ว (Roasting) เช่น เมล็ดกาแฟ และเมล็ดโกโก้
5. ใช้ในการลวก (Blanching) เช่น ข้าวโพด และผลไม้
6. ใช้ในการเจียว (Rendering) ได้แก่ น้ำมันหมู และไขมันวัว



รูปที่ 2.15 แสดงส่วนต่างๆ ของเครื่องไมโครเวฟ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.3 ผลกระทบของคลื่นไมโครเวฟต่อร่างกายมนุษย์

หากร่างกายได้รับคลื่นไมโครเวฟที่มีระดับความเข้มมากๆ เช่น ได้ความเข้มชั้นที่ 100 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร ในระยะเวลาหลายๆ จะทำให้เกิดการเสียดสีกันระหว่างโมเลกุลของน้ำ โปรตีน หรือไขมัน ขึ้นภายในเซลล์ร่างกาย จนเซลล์ร่างกายเกิดความร้อน และถูกดูดกลืนสะสมเอาไว้ภายในเซลล์หรืออวัยวะ และหากร่างกายไม่สามารถระบายหรือถ่ายเทความร้อนให้อยู่ในสภาวะปกติได้ จะทำให้เซลล์หรืออวัยวะนั้นเกิดความเสียหาย และหากเกิดในระดับรุนแรงอาจทำให้เซลล์ตายได้ ความเสียหายของเซลล์หรือผลข้างเคียงที่มักเกิดขึ้น ได้แก่

1. ผลต่อเลนส์ตา ทำให้เลนส์ตาระบายความร้อนได้น้อย อาจเป็นต้อกระจก
2. ผลต่อเชื้ออสุจิ อาจทำให้เชื้ออสุจิตาย เชื้ออสุจิผิดปกติ และกลายเป็นหมันชั่วคราว
3. ผลต่อศีรษะ ทำให้มีอาการปวดศีรษะ มึนงง หรือเมื่อยล้า
4. ผลต่อหัวใจ ทำให้หัวใจเต้นเร็วหรือเต้นผิดจังหวะ
5. ผลต่อกระดูก ทำให้กระดูกผิดรูปร่าง โดยเฉพาะกระดูกที่กำลังเจริญพัฒนา

นอกจากนี้ยังเชื่อว่า อาจก่อให้เกิดมะเร็งเม็ดโลหิตขาวผิดปกติ และภาวะแท้งลูกได้ แต่ยังไม่มียืนยัน

นอกจากผลกระทบที่มีต่อร่างกายแล้ว คลื่นไมโครเวฟยังมีผลรบกวนการทำงานของเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงให้ทำงานผิดปกติได้ โดยเฉพาะผู้ป่วยโรคหัวใจที่ใช้เครื่องช่วยการเต้นของหัวใจ Cardiac pacemaker จะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเมื่อใกล้คลื่นไมโครเวฟ

### 2.8.4 การถ่ายเทความร้อนของคลื่นไมโครเวฟ

ตัวคลื่นไมโครเวฟเองไม่ได้เป็นตัวให้ความร้อน แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุนั้นเกิดจากการดูดซับคลื่นไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน โมเลกุลมีขั้วในผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งก็คือ น้ำ ส่วนที่เกิดปฏิสัมพันธ์กับคลื่นไมโครเวฟ (Interaction) เมื่อน้ำอยู่ในสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟ น้ำจะจัดเรียงตัวให้เป็นไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟ เช่นเดียวกับกับเศษขี้เลื่อยเหล็กที่พยายามจัดเรียงตัวในสนามแม่เหล็ก แต่เนื่องจากทิศทางของขั้วสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟเปลี่ยนสลับไปมาหลายล้านๆ ครั้งต่อวินาที โมเลกุลของน้ำซึ่งถูกจำกัดด้วยพื้นที่เล็กๆ ในอาหารก็จะเริ่มหมุนในทิศทางหนึ่ง เมื่อสนามไฟฟ้าสลับขั้วโมเลกุลน้ำก็จะหมุนในอีกทิศทางหนึ่งด้วยความถี่สูงเช่นกัน การหมุนสลับกันนี้ทำให้เกิดพลังงานจลน์สูงและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในที่สุด สมการที่นิยามใช้ในการคาดคะเนปริมาณความร้อนที่ได้จากการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ดังแสดงให้เห็นในสมการที่ 2.12

$$P = 2 \pi \epsilon^{\circ} \epsilon'' E F \quad \text{สมการที่ 2.12}$$

E = ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า

F = ค่าความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับค่าไดโอดิเล็กทริกเริ่มต้นเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น  $\epsilon''$  ทั้งหมด  $\epsilon''$  ให้ค่าไดโอดิเล็กทริกสูญเสียอย่างอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.5 การเกิดความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

ไมโครเวฟทำให้อาหารสุกได้ เนื่องจากอาหารมีการดูดซับพลังงานคลื่นไว้ และคลื่นไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารสั่นสะเทือน และชนกับโมเลกุลอื่นๆจนเกิดเป็นพลังงานจลน์ และพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นนี้ จะค่อยๆเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนแทน การเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำด้วยการหมุนตัววนไปมาอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเกิดขึ้นประมาณ 915-2,450 ล้านครั้งต่อ 1 วินาที จากอัตราการหมุนตัวนี้ ส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ และการเสียดสีระหว่างโมเลกุล จนส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้น ดังนั้น อัตราการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจึงเป็นส่วนสำคัญต่อปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งความแตกต่างของความร้อนที่เกิดจากปัจจัยต่างๆนี้ เรียกว่า ความหวม ค่าความหวมจะแปรผันกับความถี่ อุณหภูมิ และชนิดของวัสดุ หากวัสดุมีความหวมมาก แสดงว่าวัสดุนั้นสามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้มาก ซึ่งมักขึ้นกับความหนาแน่นของวัสดุ และปริมาณน้ำที่มีในวัสดุ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นภายใน แล้วค่อยแพร่ความร้อนออกมาอย่างต่อเนื่องสู่ภายนอก จากผลการเดือดของน้ำ และการนำพาความร้อนของน้ำ

### 2.8.6 รูปแบบการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ

1. Ionic Polarization เป็นการเกิดความร้อนที่เป็นผลมาจากผลของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในสารละลาย เมื่อเข้าไปอยู่ในสนามไฟฟ้า แต่ละโมเลกุลซึ่งมีประจุไฟฟ้าประจำตัวจะถูกกระตุ้น และเร่งให้มีการเคลื่อนที่ จึงทำให้เกิดการเสียดสีกับโมเลกุลอื่นๆ และเกิดการเปลี่ยนพลังงานจลน์ให้กลายเป็นพลังงานความร้อน จากนั้นเกิดการกระจายความร้อนไปสู่ส่วนอื่นๆต่อไป การเกิดความร้อนแบบนี้จะเกิดขึ้นภายในเซลล์ แล้วค่อยแพร่มายังด้านนอก

2. Dipole Rotation เป็นการเกิดความร้อนกับวัสดุที่มีสารประกอบมีขั้วเป็นองค์ประกอบ ซึ่งหมายถึงน้ำเป็นส่วนประกอบนั่นเอง โดยธรรมชาติที่น้ำที่อยู่ในวัสดุจะเรียงตัวประจุบวก และลบบนโมเลกุลอย่างไม่ระเบียบ แต่เมื่อโมเลกุลเหล่านั้นถูกกระทบกับคลื่นไมโครเวฟแล้วประจุเกิดการเคลื่อนที่ และจัดเรียงมีระเบียบขึ้น และหากมีการสลับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าประจุเหล่านั้นก็จะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาระหว่างการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นกัน และเกิดการวิ่งสลับเป็นหลายล้านครั้ง/วินาที จนส่งผลทำให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นมาภายในอาหารตามมา

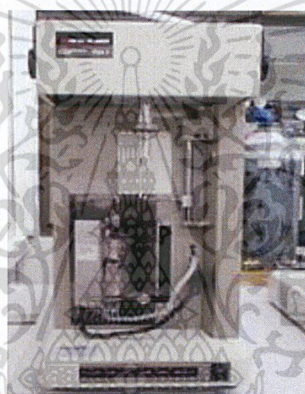
ในการใช้ไมโครเวฟอาหารจะเกิดความร้อนได้เมื่อกระทบกับคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้น การที่คลื่นไมโครเวฟจะทะลุเข้าไปในชิ้นอาหารมากก็นับว่าเป็นการดีที่จะทำให้เกิดความร้อนอย่างทั่วถึง

ธรรมชาติของไมโครเวฟนั้น เมื่อกระทบกับสารประกอบไดอิเล็กทริกก็จะเกิดความร้อนขึ้นแล้ว พลังงานก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว อาหารใดมีค่า Loss factor สูงก็จะให้ความร้อนสูงตามไปด้วย แต่ในขณะเดียวกันพลังงานในการเจาะทะลุเข้าไปในชิ้นอาหารก็จะยิ่งลดลง จึงทำให้ผ่านทะลุเข้าไปได้ในระยะสั้นๆ นอกจากนี้พบว่า คลื่นความถี่ไมโครเวฟที่ต่างกันจะทะลุผ่านไปในชิ้นอาหารได้ระยะที่ต่างกันด้วย เช่น คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 915 MHz จะทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นอาหารได้ลึกกว่าคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2,450 MHz

## 2.9 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

### 2.9.1 เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermogravimetric; TGA) [20]

เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนทางมีลักษณะดังรูปที่ 2.16 เป็นเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเมื่อสารตัวอย่างได้รับความร้อนสูงจนเกิดการสลายตัว เครื่อง TGA มีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณของตัวอย่าง เช่น พอลิเมอร์ ยาง และ ตัวอย่างทางวัสดุศาสตร์ เช่น เซรามิกส์ เป็นต้น ใช้ศึกษาวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบของสาร เช่น ปริมาณตัวทำละลาย, ความชื้น, สารเติมแต่ง, คาร์บอนแบล็ก, พลาสติกไฮดริเดชัน และการศึกษาความเสถียรภาพทางความร้อนของตัวอย่างพอลิเมอร์ ยาง วิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งสถานะของแข็งของเหลว ผง แผ่นฟิล์ม และเส้นใย แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบเทอร์โมแกรมระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิหรือเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์



รูปที่ 2.16 เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน [20]

### 2.9.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD) [21,22]

การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) เป็นเทคนิควิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ และความรู้เกี่ยวกับวิจาระบบโครงสร้างผลึก การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพการผลิต ใช้สำหรับตรวจสอบสมบัติของวัสดุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตตามขั้นตอนต่าง ๆ ทฤษฎีพื้นฐานของ XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอ็กซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีที่สะท้อนทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ ในปี ค.ศ. 1912 นาย W.L.Bragg ได้นำทฤษฎีดังกล่าวมาศึกษาในรูปแบบโครงสร้างผลึกของแร่ต่างๆ ต่อมาได้มีการประดิษฐ์คิดค้น เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ขึ้นในปี ค.ศ. 1948 และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งสามารถนำ

คอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุม การทำงาน และวิเคราะห์ประมวลผล เพื่อให้เกิดความรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น XRD เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ในกลุ่มนักวัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา โลหะวิทยา เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ ผลการวิเคราะห์จาก XRD ทำให้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด หรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด โดยทำการวัดค่า ความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย โดยที่ขนาดและประจุของอะตอม ของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว เปรียบได้กับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน

รังสีเอ็กซ์หรือเอ็กซ์เรย์ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1895 โดยวิลเฮล์ม คอนราด เรินต์เกน นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ซึ่งพบโดยบังเอิญระหว่างการศึกษาการทดลองรังสีแคโทด (Cathode) โดยปกติหลอดรังสีแคโทดจะเรืองแสงเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างแคโทดกับแอโนด โดยเรินต์เกนได้ทำการห่อหุ้มหลอดรังสีไว้ด้วยกระดาษสีดำภายในห้องมืดเพื่อต้องการสังเกตการณ์การเรืองแสงของวัตถุอย่างชัดเจน ซึ่งในการทดลองครั้งนี้เรินต์เกนได้ใช้วัตถุเป็นแบเรียมพลาทิโนไซยาไนด์ (Barium platino cyanide) ในระหว่างการทดลองเรินต์เกนได้สังเกตเห็นแสงวาบเกิดขึ้นบนแผ่นแบเรียมพลาทิโนไซยาไนด์ที่วางอยู่บนโต๊ะข้าง ๆ ทุกครั้งที่เอาสายขดลวดเหนี่ยวนำที่ต่อกับหลอดรังสีออกโดยเรินต์เกนคิดว่าไม่น่าจะเป็นผลจากหลอดรังสีแคโทด เขาจึงเรียกแสงวาบนี้ว่า “X”

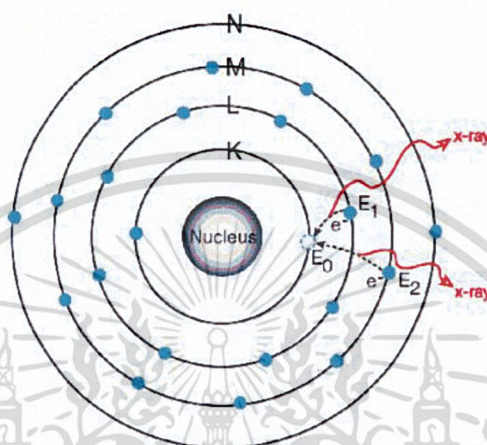
รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูงชนิดหนึ่งที่มีพลังงานอยู่ในช่วง 200 eV - 1 MeV ซึ่งอยู่ระหว่างรังสีแกมมาที่รังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง  $10^{-9}$  -  $10^{-11}$  เมตรแต่ในการใช้งานโดยทั่วไปมักจะใช้ในช่วง 0.7 - 2.3 Å สำหรับทองแดง (Cu) ที่ชั้น  $K\alpha_1$  ที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์วัสดุ นั้น มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 1.54 Å ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับระยะห่างระหว่างระนาบของผลึกวัสดุเกือบทุกชนิด

### 2.9.2.1 การเกิดรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เกิดจากการเร่งลำอิเล็กตรอนหรือโฟตอนให้เคลื่อนที่อย่างรวดเร็วผ่านสนามไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์อยู่ในช่วง 1 kV - 1 MV พุ่งเข้าชนเป้าโลหะ (แอโนด) ภายใต้บรรยากาศที่เป็นสุญญากาศ เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งด้วยความเร็วสูงพุ่งเข้าชนเป้าโลหะที่เชื่อมต่อดัวยระบบหล่อเย็นจะเกิดการสูญเสียพลังงานขึ้น อย่างไรก็ตามจากกฎการคงตัวของพลังงานนั้นคือพลังงานไม่สามารถหายไป แต่จะมีการเปลี่ยนรูป ดังนั้นเมื่อเกิดการชนพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจึงเปลี่ยนไปเป็นพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคือรังสีเอ็กซ์นั่นเองและเมื่ออิเล็กตรอนตัวถัดๆ ไปพุ่งเข้ามาชนอีกก็จะเกิดรังสีเอ็กซ์ขึ้นเรื่อยๆ เกิดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความต่อเนื่อง (Continuous spectrum)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผลิตในรูปของหนังสือพิมพ์หรือเอกสารอื่นใดที่มีลิขสิทธิ์ในตัวเอง เมื่อผู้ใดเห็นเอกสารนี้หรือเอกสารฉบับนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

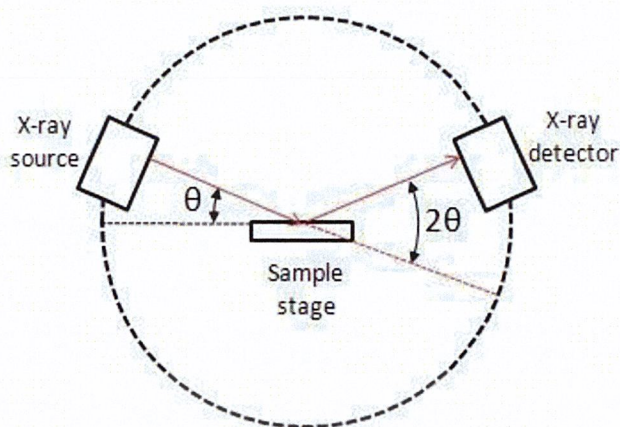
ส่วนอิเล็กตรอนอิสระที่ถูกเร่งให้มีพลังงานมากพอพุ่งเข้าชนกับอิเล็กตรอนชั้นในสุด (K-shell) ของอะตอมส่งผลให้อิเล็กตรอนในชั้น K-shell หลุดออกไป อะตอมจะพยายามรักษาสภาพให้เสถียรที่สุดด้วยการให้อิเล็กตรอนวงถัดไปคายพลังงานออกมาเพื่อลงมาอยู่ยังชั้น K-shell ซึ่งค่าพลังงานที่อิเล็กตรอนวงนอกคายออกมานั้นจะมีค่าจำเพาะเจาะจงสำหรับสารแต่ละชนิดโดยจะเรียกคลื่นของพลังงานนี้ว่า รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ (Characteristic X-ray) ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์

### 2.9.2.2 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

ภายในเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ประกอบด้วย หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ที่เป็นหลอดปิดและอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งรังสีเอกซ์จะถูกสร้างขึ้นโดยให้กระแสไฟฟ้าแก่เส้นลวดฟิลาเมนต์ (Filament) ที่อยู่ในหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ทำให้เส้นลวดร้อนขึ้นและก่อให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากเส้นลวด อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูงทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจากเส้นลวดฟิลาเมนต์ที่เป็นขั้วแคโทดเข้าชนขั้วแอโนด ซึ่งโดยทั่วไปทำจากโลหะทองแดง อิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนจะทำให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมทองแดงหลุดออกไปจึงเกิดเป็นช่องว่างขึ้น เป็นผลให้อิเล็กตรอนวงนอกที่อยู่ถัดมา (L- และ M-shell) เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานลงมาแทนที่ช่องว่างนั้น โดยการคายรังสีเอกซ์ออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ไปยังสารตัวอย่าง และรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกจากสารตัวอย่างจะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์ (Detector) ดังรูปที่ 2.18

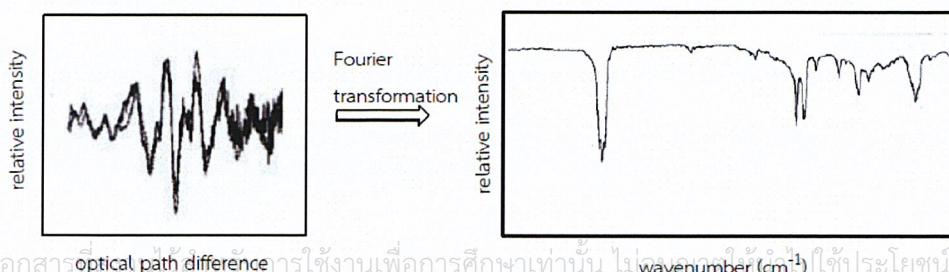


รูปที่ 2.18 แสดงส่วนประกอบและการทำงานของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

### 2.9.3 เครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FTIR) [23]

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดรังสีอินฟราเรดจำแนกออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ย่านอินฟราเรดใกล้ ( $4,000 - 12,800 \text{ cm}^{-1}$ ) ย่านอินฟราเรดกลาง ( $200 - 4,000 \text{ cm}^{-1}$ ) และย่านอินฟราเรดไกล ( $10 - 200 \text{ cm}^{-1}$ ) เมื่อสารอินทรีย์ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดกลางโดยเฉพาะช่วงความยาวคลื่น  $2,500 - 15,000$  นาโนเมตร หรือเลขคลื่น  $667 - 4,000 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งจะเรียกว่า ความถี่ ทำให้เกิดแทรนซิชันการสั่นพร้อมกับเกิดแทรนซิชันการหมุนเรียกเทคนิคนี้ว่า อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งแทรนซิชันการสั่นนี้จะทำให้ทราบชนิดหมู่ฟังก์ชัน เช่น พันธะคู่ พันธะสาม หมู่คาร์บอนิล หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่อะมิโน เป็นต้น ภายในโครงสร้างของสารอินทรีย์

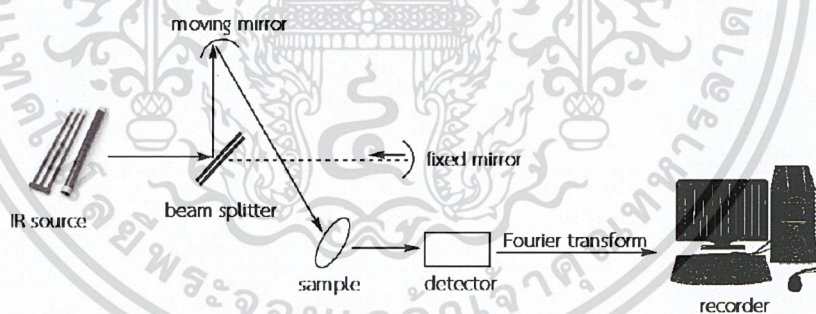
โดยหลักการการทำงานของเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) จะใช้หลักการการดูดกลืนสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส อันดับแรกจะให้ความร้อนช่วงอุณหภูมิ  $1,000 - 8,000$  องศาเซลเซียส กับแหล่งกำเนิดรังสี แล้วรังสีอินฟราเรดที่ถูกปล่อยออกมาจะผ่านไปยังเซลล์ตัวอย่าง ทำให้ดูดกลืนรังสีตรงกับความถี่การสั่นหลักของพันธะ ซึ่งความเข้มของสัญญาณจะวิเคราะห์ด้วยเครื่องตรวจหา ได้ลักษณะเป็นคลื่น และหลังจากประมวลผลโดยการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transformation) จะเปลี่ยนเป็นเส้นสเปกตรัมความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและความถี่ ดังรูปที่ 2.19



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุมัติ  
รูปที่ 2.19 อินฟราเรดสเปกตรัมก่อนและหลังผลการแปลงฟูเรียร์ [23]

### 2.9.3.1 ส่วนประกอบของเครื่อง FTIR แสดงในรูปที่ 2.20

1. แหล่งกำเนิดแสงทำหน้าที่ให้รังสีอินฟราเรด ได้แก่ ไยเนิร์นสท์ (Nernst filament) โกลบาร์ (Globalar) และลวดนิกโครม แต่ที่นิยมคือ ไยเนิร์นสท์ทำจากออกไซด์ของเซอร์โคเนียม ( $ZrO_2$ ) ทอเรียม ( $ThO_2$ ) และซีเรียม ( $CeO_2$ ) ให้พลังงานสูงสุด  $5,500\text{ cm}^{-1}$  และโกลบาร์มีลักษณะเป็นแท่งซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) ให้พลังงานสูงสุด  $7,100\text{ cm}^{-1}$
2. เซลล์ตัวอย่างสำหรับตัวอย่างบางชนิดต้องบรรจุในเซลล์ตัวอย่างก่อนวิเคราะห์โดยส่วนใหญ่เซลล์ตัวอย่างทำมาจากเกลือของแฮไลด์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) และซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) เป็นต้น มีลักษณะโปร่งใสและไม่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดช่วงเดียวกับตัวอย่าง
3. เครื่องตรวจหาทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวอย่างเป็นสัญญาณไฟฟ้า จะเรียกชื่อย่อว่า เอฟทีไออาร์ (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) ซึ่งมีการตอบสนองสัญญาณไวกว่าเครื่องตรวจหาแบบเทอร์โมคัปเปิล
4. เครื่องบันทึกทำหน้าที่บันทึกสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องตรวจหา ส่วนใหญ่การวิเคราะห์หมู่ของสารอินทรีย์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์จะเป็นโหมด (Mode) การดูดกลืนมากกว่าการสะท้อน ปัจจุบันสเปกตรัมแบบดูดกลืนนิยมพลอต (Plot) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความส่องผ่าน (%T) และเลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ ) ตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต



รูปที่ 2.20 ส่วนประกอบของเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี [23]

### 2.9.3.2 ข้อดีของเครื่อง FTIR

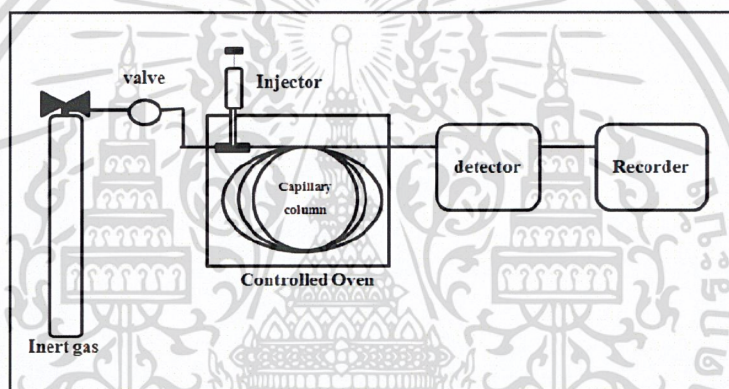
1. วิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส
2. วิเคราะห์ตัวอย่างปริมาณน้อยหรือสารที่มีความเข้มข้นสูงได้
3. มีอัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวนสูงกว่าเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์แบบกระจาย (Dispersive infrared spectrometer)
4. สแกน (Scan) ตัวอย่างได้อย่างรวดเร็ว
5. สเปกตรัมที่ได้มีการแยกชัดและไม่มีพื้นหลัง (Background)

6. สามารถศึกษาสเปกตรัมได้ทั้งแบบดูคลื่นและแบบสะท้อนขึ้นอยู่กับข้อกำหนด (Specification) ของเครื่องมือ

#### 2.9.4 เทคนิคการตรวจวัดโดยใช้ Gas Chromatography [24,25]

GC เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบต่าง ๆ ของสารที่เราสนใจซึ่งเทคนิคนี้เหมาะที่จะใช้กับสารที่มีคุณสมบัติพิเศษคือ สามารถระเหยกลายเป็นแก๊สได้เมื่อถูกความร้อนและกลไกที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบต่างๆ ในสารตัวอย่างจะอาศัยหลักของความชอบที่แตกต่างกันขององค์ประกอบในตัวอย่างที่มีต่อ Phase 2 phase คือ Stationary phase และ Mobile phase องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง GC สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ ดังรูปที่ 2.21

1. Injector                      2. Oven                      3. Detector



รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบของเครื่อง Gas Chromatography [25]

Injector คือ ส่วนที่สารตัวอย่างจะถูกฉีดเข้าสู่เครื่องและระเหยเป็นแก๊สพร้อมกับถูกทำให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนที่จะเข้าสู่ Column อุณหภูมิที่เหมาะสมของ Injector ควรเป็นอุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้สารตัวอย่างสามารถระเหยได้แต่ต้องไม่ถูกทำให้สลายตัว (Decompose)

Oven คือ ส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุ Column เอาไว้ และเป็นส่วนที่ควบคุมอุณหภูมิของ Column ให้เปลี่ยนไปตามความเหมาะสมกับสารที่ถูกฉีด ซึ่งอุณหภูมิของ Oven นั้นจะสามารถปรับเปลี่ยนได้ 2 แบบ คือ Isocratic temperature และ Gradient temperature ซึ่งข้อดีของการทำ Gradient temperature คือ สามารถใช้กับสารตัวอย่างที่มีจุดเดือดกว้าง (Wide boiling range) และยังช่วยลดเวลาในการวิเคราะห์ลงได้อีกด้วย (Analysis time)

Detector คือ ส่วนที่จะใช้สำหรับตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบว่าสารที่สนใจนั้นมีปริมาณอยู่เท่าไร ซึ่งความสามารถของการตรวจวัดนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของ Detector ที่เลือกใช้ ชนิดของ Detector ที่ใช้กับเครื่อง GC นั้นมีอยู่หลายอย่าง เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานเห็นประโยชน์ด้านการศึกษา  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

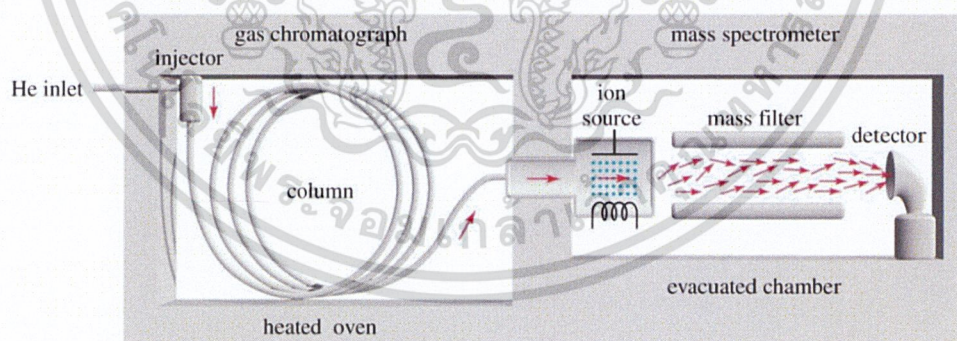
1. Thermal Conductivity Detector
2. Flame Ionization Detector
3. Electron Capture Detector
4. Mass Spectrometry

#### 2.9.4.1 เทคนิค Gas Chromatography - Mass Spectrometry (GC-MS)

[24,26,27]

GC-MS เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับนิยมนำมาใช้เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถทำนายชนิดขององค์ประกอบที่มีอยู่ในสารได้อย่างแม่นยำโดยอาศัยการเปรียบเทียบ Fingerprint ของเลขมวล (Mass number) ของสารตัวอย่างนั้นๆ กับข้อมูลที่มีอยู่ นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังมีความสามารถในการวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) และเชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) ได้อย่างถูกต้อง

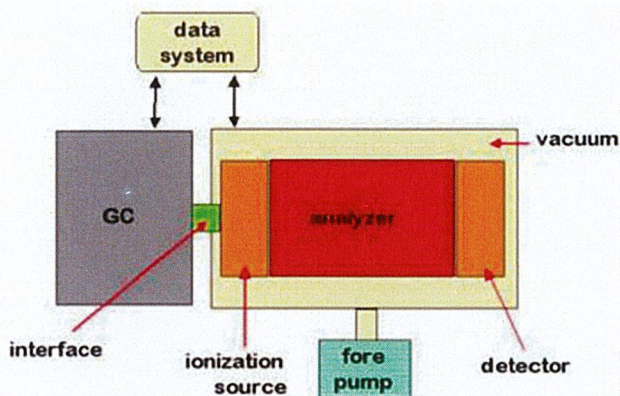
เครื่องมือนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของเครื่อง GC (Gas chromatography) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการแยกองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างให้ออกมาทีละองค์ประกอบก่อนที่จะเข้าสู่ Detector และอีกส่วนคือเครื่อง MS (Mass spectrometry) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็น Detector ในการตรวจสอบดูว่าองค์ประกอบต่างๆ ที่ผ่านออกมาจากเครื่อง GC นั้น มีเลขมวล (Mass number) เป็นเท่าไร เพื่อที่จะได้สามารถทำนายได้ว่าสารที่เราสนใจอยู่นั้นประกอบด้วยองค์ประกอบชนิดใดบ้าง และมีปริมาณเท่าไร โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง GC-MS ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ส่วนประกอบของเครื่อง GC-MS [26]

MS เป็น Detector ที่ใช้ตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างโดยอาศัยกลไกคือ โมเลกุลขององค์ประกอบที่ถูกแยกออกมาจากสารตัวอย่างโดยเครื่อง GC นั้นจะถูก Ionize ในสภาวะที่เป็นสุญญากาศ แล้วตรวจวัดออกมาเป็นเลขมวล (Mass number) เทียบกับข้อมูลอ้างอิง แล้วแปลผลออกมาเป็นชื่อขององค์ประกอบ ดังรูปที่ 2.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 เครื่อง MS ที่ต่อกับ GC [27]

#### 2.9.4.1.1 การทำงานของเครื่อง GC-MS

เมื่อเตรียมตัวอย่างเสร็จนำมาฉีดเข้าทาง Injector ของเครื่อง GC จากนั้นสารก็ถูกแยกออกเป็นองค์ประกอบต่างๆ เมื่อผ่านเข้าสู่ Column ที่อยู่ใน Oven แต่มีข้อกำหนดอยู่ว่าตัวอย่างที่จะนำมาฉีดนั้นจะต้องเป็นสารละลายใสไม่มีตะกอน จากนั้นองค์ประกอบใดที่ถูกแยกออกมาจาก Column ก่อนก็จะผ่านเข้าไปในส่วนของเครื่อง MS ซึ่งมีสถานะเป็นสุญญากาศก่อน แล้วเข้าไปเจอกับ Ion source ซึ่งจะทำหน้าที่ Ionize โมเลกุลที่ผ่านเข้ามาให้กลายเป็นประจุ จากนั้นประจุเหล่านี้ก็จะเดินทางผ่านเครื่องคัดเลือกและแยกแยะขนาดของประจุ (Mass analyzer) ดูว่าประจุเหล่านั้นประกอบไปด้วยขนาดมวลเท่าใดบ้าง ก่อนที่จะเดินทางเข้าสู่เครื่องตรวจวัดปริมาณประจุ (Detector) เพื่อตรวจหาปริมาณของประจุแล้วแปลผลออกมาเป็นปริมาณขององค์ประกอบแต่ละตัวที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

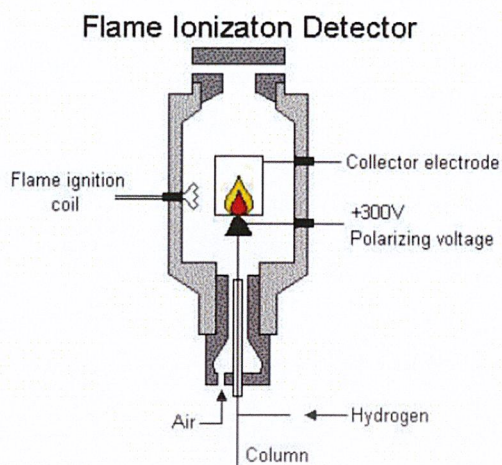
#### ข้อดีของเครื่อง GC-MS

1. สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งแบบทั่วไปและแบบเฉพาะเจาะจง
2. ให้ Sensitivity ที่สูง
3. สามารถบ่งชี้ถึงชนิดขององค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้
4. สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ

#### 2.9.4.2 เทคนิค Gas Chromatography–Flame Ionization Detector(GC-FID)[25]

Flame ionization detector (FID) ใช้วิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ทุกชนิดที่สามารถเกิดการไอออไนซ์ (Ionization) ได้ในเปลวไฟ โดยทำให้เกิดกระแสของไอออนที่สะสมอยู่ระหว่างขั้วที่มีประจุตรงข้ามกัน 2 ขั้วตามปริมาณของไอออนที่เกิดขึ้น และถ้ากระแสที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยจะต้องใช้เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนขึ้นสำหรับขยายให้กระแสมีปริมาณไฟฟ้ามากขึ้นเพื่อที่จะสามารถตรวจวัดได้ โดยโครงสร้างของ Detector มีรูปร่าง ดังรูปที่ 2.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 องค์ประกอบของ Flame ionization detector (FID) [25]

Detector ชนิด FID มีความสามารถในการตรวจวัดสารตัวอย่างอินทรีย์ที่สามารถระเหยเป็นไอได้เกือบทุกชนิด ยกเว้นสารประกอบที่ถูกออกซิไดซ์มาแล้ว เช่น Carbonyl และ Carboxyl group ส่วนสารประกอบอนินทรีย์จะไม่สามารถวัดได้ด้วย Detector ชนิดนี้ ดังรูปที่ 2.25

Inert gas	: He, Ne, Ar, Kr, Xe
Inorganic compound	: N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, NO <sub>x</sub> , Organic halide, CO, NH <sub>3</sub>

รูปที่ 2.25 สารประกอบที่ไม่ไวต่อ Detector ชนิด Flame ionization detector (FID) [25]

### 2.9.5 เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส Non-contact Thermometer (Infrared Thermometer) [28]

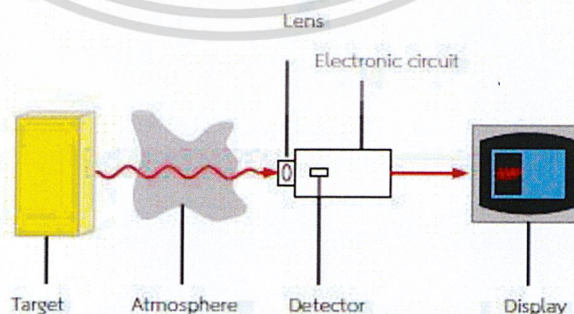
เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัสมีลักษณะดังรูปที่ 2.26 เครื่องมือนี้ใช้เทคโนโลยีอินฟราเรดเพื่อวัดอุณหภูมิของวัตถุต่างๆ และค่าที่ได้ยังเป็นค่าอุณหภูมิของวัตถุที่แท้จริง ไม่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมรอบข้าง ใช้งานง่ายเพียงส่องไปที่วัตถุก็สามารถอ่านค่าบนจอ LCD ได้ทันที ใช้งานได้ปลอดภัยกับวัตถุร้อนหรือวัตถุที่ไม่สามารถสามารถเข้าไปวัดใกล้ ๆ ได้ อ่านค่าอุณหภูมิได้รวดเร็วมากภายในไม่กี่วินาที เมื่อเทียบกับการวัดแบบสัมผัส (RTD, Thermocouple) ที่ต้องใช้เวลาหลายนาทีต่อการวัดแต่ละจุด



รูปที่ 2.26 เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด [28]

### 2.9.5.1 หลักการทำงานของเครื่องมือวัดอุณหภูมิอินฟราเรด (Infrared Thermometer)

เป็นเครื่องมือวัด (Instrument) ใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิ (Temperature Measurement) ที่ผิวของวัตถุ ซึ่งเป็นการวัดแบบไม่สัมผัสและไม่ทำลายวัตถุ ทำงานโดยอาศัยหลักการแผ่รังสีอินฟราเรด (Infrared Radiation) ออกจากวัตถุ ส่วนประกอบหลักของเครื่องมือวัดชนิดนี้ประกอบด้วย เลนส์ (Lens), ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด (Infrared detector) หรือเซ็นเซอร์ชนิดอินฟราเรด (Infrared sensor), วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic circuit) และส่วนแสดงผล (Display) โดยมีหลักการทำงานดังรูปที่ 2.27 คือตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรดทำหน้าที่รับรังสีอินฟราเรด (Infrared) ที่แผ่ออกจากวัตถุเป้าหมาย (Target) ผ่านเลนส์ของเครื่องมือวัด แล้วแปลงรังสีอินฟราเรดเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า โดยรังสีอินฟราเรดที่ตัวตรวจจับรับไปนั้นประกอบด้วยรังสีที่วัตถุเป้าหมายแผ่ออกมารวมกับรังสีที่แผ่จากวัตถุอื่นหรือจากสิ่งแวดล้อมรอบๆ วัตถุเป้าหมาย จากนั้นวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่รับมาจากตัวตรวจจับและนำไปแสดงที่ตัวแสดงผล โดยเทอร์โมมิเตอร์ชนิดอินฟราเรดแสดงผลออกมาในรูปของตัวเลข ซึ่งการแปลงรังสีอินฟราเรดที่เซ็นเซอร์ตรวจจับได้ให้อยู่ในหน่วยของอุณหภูมิอาศัยกฎของ Planck (Planck's Law) และกฎของ Stefan-Boltzmann (Stefan-Boltzmann's Law)



รูปที่ 2.27 ระบบการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดมีหลายรูปแบบ เช่น

1. เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดสำหรับการปรุงอาหาร (การตรวจสอบอุณหภูมิของจานร้อนและอาหาร)
2. เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดสำหรับการใช้งานทางการแพทย์ (การตรวจสอบอุณหภูมิของชิ้นส่วนต่างๆของร่างกาย)
3. เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดสำหรับการใช้งานยานยนต์ (ตรวจสอบเครื่องยนต์ของอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น A/C, ไอเสีย ฯลฯ)

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แพรพรรณ ศรีสอ้าน [4] ในปี พ.ศ.2554 ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิเคชันของกลีเซอรอลและไดเมทิลคาร์บอเนตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต ทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch Reactor) ทำการต่อกับคอนเดนเซอร์ โดยวัดอุณหภูมิภายในด้วยเทอร์โมคัปเปิลและควบคุมอุณหภูมิ ด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) จากนั้นเครื่องปฏิกรณ์จะตั้งบนเครื่องกวน (Magnetic stirrer) ทำการกวนโดยใช้แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar) สารตั้งต้นที่ใช้คือ กลีเซอรอลและไดเมทิลคาร์บอเนต โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกบรรจุลงในตะกร้าภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกลีเซอรอล อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อไดเมทิลคาร์บอเนต 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้โซเดียมฟอสเฟตไดคัลไฮเดรต ( $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) เตรียมโดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตมาอบไล่ไอน้ำที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการอบแล้วมาเข้าเตาเผาโดยเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ส่วนการเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเก็บทุกๆ 30 นาที ตั้งแต่เวลาที่ 0 ถึง 120 นาที จากนั้นเก็บทุกๆ 60 นาที ตั้งแต่ 120 จนถึง 480 นาที โดยจะเก็บตัวอย่างครั้งละ 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิเคชันของกลีเซอรอลและไดเมทิลคาร์บอเนต การเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกลีเซอรอลส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนตมีค่าเพิ่มมากขึ้น การลดลงของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อไดเมทิลคาร์บอเนต ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลและเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนตเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดการเกิดดีคาร์บอกซิเลชันของกลีเซอรอลคาร์บอเนตไปเป็นไกลซิโตนอีกด้วย ในส่วนของการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนตเพิ่มสูงขึ้นและยังช่วยให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วมากยิ่งขึ้น

เอกสารฉบับนี้เผยแพร่โดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ เพื่อบริการวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วรารัตน์ เลิศสนเมธากุล [5] ในปี พ.ศ.2553 ได้ศึกษาการผลิตกลีเซอรอลคาร์บอนेटโดยใช้กลีเซอรอลดิบต่อโดเมทิลคาร์บอนेट (DMC) ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้โปตัสเซียมคาร์บอนेटเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเริ่มจากกำจัดสิ่งเจือปนในกลีเซอรอลดิบก่อนด้วยกรดกำมะถัน 98 %v/v ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยชั่งกลีเซอรอลบริสุทธิ์และโดเมทิลคาร์บอนेटตามอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อโดเมทิลคาร์บอนेट 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 ผสมใส่ในขวดก้นกลม 2 คอ (2-Neck round bottom flask) ติดตั้งชุดอุปกรณ์ในการรีฟลักซ์โดยใช้เครื่องให้ความร้อนและกวนผสม (Heater & Stirrer), เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer), คอนเดนเซอร์ (Condenser), แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar), สายยางซิลิโคน, Stand, Clamp, Clamp holder และภาชนะโลหะสำหรับใส่น้ำมันพืชเพื่อเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนสำหรับทำปฏิกิริยาให้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 73-75 องศาเซลเซียส เริ่มทำปฏิกิริยาโดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอนेट กวนผสมเป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและวิเคราะห์องค์ประกอบในผลผลิตเชิงคุณภาพด้วยวิธี GC-MS เพื่อให้ได้ค่า Retention time ขององค์ประกอบในสารตัวอย่าง และวิเคราะห์องค์ประกอบในเชิงปริมาณด้วยวิธี GC-FID ผลการทดลองอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อโดเมทิลคาร์บอนेटที่เหมาะสมคือ 1:3 ได้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล 91.25% และเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอนेट 92% การศึกษาผลกระทบของน้ำในกลีเซอรอลซึ่งส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างน้อยที่สุดควรมีค่าไม่เกิน 2% w/w สามารถให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอนेट 83%

S. E. Kondawar และคณะ [6] ในปี ค.ศ.2017 ได้ศึกษาการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेटจากการใช้กลีเซอรอลกับยูเรียผ่านกระบวนการคาร์บอนิลเลชัน (Carbonylation) และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Zn บนตัวรองรับที่แตกต่างกัน ได้แก่ MCM-41, SBA-15,  $ZrO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  และซัลเฟต  $ZrO_2$  (s- $ZrO_2$ ) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาถูกสังเคราะห์โดยวิธีการจุ่มชุบแบบเปียก (Wet impregnation) หลังจากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD,  $NH_3$ -TPD,  $CO_2$ -TPD และ TEM ดำเนินปฏิกิริยาการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेटในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้กลีเซอรอล 50 มิลลิลิตร ยูเรีย 50 มิลลิโมล และตัวเร่งปฏิกิริยา 0.23 กรัม (ไม่มีการใช้ตัวทำละลาย) ใส่ลงไปในช่วงสามคอที่ต่อกับคอนเดนเซอร์ ส่วนผสมถูกทำให้ร้อนด้วย Silicon oil bath ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และทำภายใต้สภาวะไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 10 mL h<sup>-1</sup> หลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จใช้เมทานอลในการกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเติมเมทานอลลงไปและตามด้วยการกรอง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง แล้วนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์โดยแก๊สโครมาโทกราฟี ผลการทดลองพบว่า 10% Zn/MCM-41 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุด ในสภาวะที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 ให้ค่าการเลือกเกิดของกลีเซอรอลคาร์บอนेटมากที่สุดถึง 98%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันยาร์ตน์ นวมโคกสูง, กาญจนา ชีพนุรัตน์ และเทพอนันต์ เฟื่องฟู [15] ในปี พ.ศ.2552 ได้ศึกษาการใช้แคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมได้จากเปลือกไข่ด้วยวิธีทางเคมีเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันปาล์มกับเมทานอลผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) และศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยา ได้แก่ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล โดยเปรียบเทียบร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ เกรตวึเคราะห์ และแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมได้จากเปลือกไข่ แคลเซียมออกไซด์เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาของเปลือกไข่ดลอะเอียดกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและตกตะกอนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิค TGA พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเพื่อเปลี่ยนให้เป็นแคลเซียมออกไซด์อยู่ที่ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งน้อยกว่าการเผาจากเปลือกไข่โดยตรงที่ต้องใช้อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าสามารถลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาได้ ทำการเผาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่ามีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกเช่นเดียวกับแคลเซียมออกไซด์ที่ขายตามท้องตลาด และตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM พบว่าแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมได้จากเปลือกไข่ด้วยวิธีทางเคมีมีอนุภาคโดยเฉลี่ย  $0.509 \pm 0.099$  ไมครอน จากนั้นทำการศึกษาค่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันกับเมทานอลในอัตราส่วนโดยมวลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 นำน้ำมัน 100 กรัม ที่ผ่านการระเหยน้ำออกแล้วและเมทานอล 43.94 กรัม ใส่ในขวดก้นกลมสามคอ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา 1%, 2%, 3% และ 4% โดยน้ำหนักของสารตั้งต้นแล้วผสมกับสารตั้งต้นในขวดก้นกลมสามคอ ตั้งอุณหภูมิรีฟลักซ์ต่อขวดก้นกลมสามคอเข้ากับคอนเดนเซอร์และเทอร์โมมิเตอร์ให้ความร้อนจนอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส และปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง จากนั้นเก็บตัวอย่าง ที่เวลา 10 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 1 ชั่วโมง, 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง นำไปใส่กรวยแยกเพื่อรอให้แยกชั้นระหว่างเมทิลเอสเทอร์กับส่วนที่อยู่ด้านล่างซึ่งประกอบด้วยกลีเซอรอลและเมทานอล จากนั้นล้างเมทิลเอสเทอร์ด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้มีสภาวะเป็นกลางแล้วนำไปตรวจวัดเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  ผลการทดลองพบว่า สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ได้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มากที่สุดคือ 100 โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ที่เวลา 10 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ เกรตวึเคราะห์ได้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มากที่สุดคือ 25.95 โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3% ที่เวลา 3 ชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมได้จากเปลือกไข่ได้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มากที่สุดคือ 98.76 โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ที่เวลา 3 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Diego M. Chaves และ Marcio J. Da Silva [30] ในปี ค.ศ.2018 ได้ศึกษาการสังเคราะห์ กลีเซอรอลคาร์บอเนตจากยูเรียและกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เรียบง่าย  $\text{Sn}(\text{OH})_2$  ตัวเร่งปฏิกิริยาเตรียมได้จากใช้  $\text{SnCl}_2$  เป็น Pre-catalyst ในการสร้าง (Generated in situ)  $\text{Sn}(\text{OH})_2$  จากปฏิกิริยาของ Sn (II) เฮไลต์ และยูเรียในระหว่างกระบวนการกลีเซอรอลคาร์บอเนต สำหรับการทำปฏิกิริยาใช้ยูเรีย 34.3 มิลลิโมล ทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ 34.3 มิลลิโมล และตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 4.9% mol ทำปฏิกิริยาในขวดสามคอที่ต่อกับคอนเดนเซอร์ ให้ความร้อนและปั่นกวนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส หลังจากได้ผลิตภัณฑ์กลีเซอรอลคาร์บอเนตทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธี Liquid-liquid extraction วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ผลการทดลองพบว่าได้ค่า Selectivity ของกลีเซอรอลคาร์บอเนต 85% ซึ่งได้หลังจากทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส

พรพรรณ สิริสมนต์ และวิทยา ปันสุวรรณ [31] ได้ศึกษาการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ การศึกษาเริ่มต้นจากการเพิ่มความบริสุทธิ์ให้แก่ตัวอย่างกลีเซอรอลดิบโดยการทำให้ปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นต่างๆ (ปริมาณกรดซัลฟูริก 3-9% โดยน้ำหนักตัวอย่างกลีเซอรอล) จากนั้นจึงนำกลีเซอรอลที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้วนี้มาทำการสังเคราะห์เป็นสารกลีเซอรอลคาร์บอเนต โดยการทำให้ปฏิกิริยากับยูเรีย และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษามีจำนวน 5 ชนิด ได้แก่  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZnCl}_2$  และ  $\text{ZnSO}_4$  โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรียต่อตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ 1:1.5 :0.06 ทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะการสังเคราะห์ที่ไม่รุนแรงใช้เวลา 6 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างแล้วจึงทำการตรวจสอบคุณสมบัติของกลีเซอรอลคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ จากผลการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิต กลีเซอรอลคาร์บอเนตสูงที่สุด คือ  $\text{ZnCl}_2$  โดยให้ค่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนตสูงที่สุดเท่ากับ 74.97 และค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลเท่ากับ 73.65 ซึ่งสามารถสรุปประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดที่ศึกษาเป็นดังนี้ คือ  $\text{ZnCl}_2 > \text{ZnO} > \text{ZnSO}_4 > \text{MgCl}_2 > \text{MgSO}_4$  และกลีเซอรอลคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้นี้ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตกลีเซอรอลคาร์บอเนตสูงที่สุดเท่ากับ 75.50 ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับผลการสังเคราะห์โดยใช้กลีเซอรอลทางการค้าที่ทำการศึกษาที่สภาวะเดียวกัน

Z.Lujun และคณะ [32] ในปี ค.ศ.2018 ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตจากกลีเซอรอลและยูเรียภายใต้การฉายรังสีไมโครเวฟและไม่ฉายรังสีไมโครเวฟ โดยไม่มีตัวทำละลายและใช้ซิงค์ซัลเฟต ( $\text{ZnSO}_4$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งทำการทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของ  $\text{ZnSO}_4$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{CuSO}_4$  และ  $\text{MgSO}_4$  โดยทำการทดลองที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ อัตราส่วนโดยโมลของยูเรียต่อกลีเซอรอล ความดัน อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาเดียวกัน พบว่า  $\text{ZnSO}_4$  แสดงประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ได้ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนต 80.6% จากนั้นศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ อัตราส่วน

โดยโมลระหว่างยูเรียต่อกลิเซอรอล ความดัน อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยใช้  $ZnSO_4$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่ปริมาณของ  $ZnSO_4$  เท่ากับ 2.8% โดยโมลของกลีเซอรอล กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 600 วัตต์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างยูเรียต่อกลิเซอรอลเท่ากับ 1.3 ต่อ 1 ความดัน 15 กิโลปาสกาล อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และเวลา 100 นาที เป็นสภาวะที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ผลของกลีเซอรอลคาร์บอนเนต 93.7% นอกจากนี้ยังทำการทดลองแบบไม่ฉายรังสีไมโครเวฟควบคู่ไปด้วยพบว่าที่เวลา 100 นาที การทำปฏิกิริยาแบบไม่ฉายรังสีไมโครเวฟได้ผลของกลีเซอรอลคาร์บอนเนตเพียง 61% จึงแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการทำปฏิกิริยาภายใต้การฉายรังสีไมโครเวฟสามารถช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

P.Wanichaya และคณะ [33] ในปี ค.ศ.2018 ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนเนตจากไดเมทิลคาร์บอนเนตและกลีเซอรอลโดยใช้แคลเซียมออกไซด์ ( $CaO$ ) ที่ได้จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องด้วยของเสียจากเปลือกไข่ถูกเสนอให้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการผลิตกลีเซอรอลคาร์บอนเนตจากไดเมทิลคาร์บอนเนต (DMC) และกลีเซอรอล ผู้วิจัยจึงสนใจและทำการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ และนำไปวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD TGA/DSC SEM  $N_2$  adsorption-desorption และ Hammett indicators method หลังจากนั้นทำการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง DMC ต่อกลิเซอรอล อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสม โดยพบว่าการใช้  $CaO$  ที่ได้จากเปลือกไข่จะมีความเป็นเบสสูง สามารถเปลี่ยนแปลงกลีเซอรอลไป 96% ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง DMC ต่อกลิเซอรอลเท่ากับ 2.5 ต่อ 1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที และปริมาณของ  $CaO$  เท่ากับ 0.08 โดยโมลของกลีเซอรอล นอกจากนี้ยังทำการทดลองกับ  $CaO$  เชิงพาณิชย์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพบว่า  $CaO$  ที่ได้จากเปลือกไข่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเทียบเท่ากับ  $CaO$  เชิงพาณิชย์ ทั้งนี้การใช้ประโยชน์จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตกลีเซอรอลคาร์บอนเนต ไม่เพียงแต่ให้ประสิทธิภาพและมูลค่าเพิ่มของเปลือกไข่ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจากธรรมชาติ แต่ยังลดปริมาณของเสียและค่าใช้จ่ายในการรักษาไว้ซึ่งความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

K.T.Wai และคณะ [34] ในปี ค.ศ.2015 ได้ทำการศึกษาการทำปฏิกิริยาของกลีเซอรอลและไดเมทิลคาร์บอนเนต (DMC) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเบส โดยใช้การฉายรังสีไมโครเวฟเป็นวิธีการให้ความร้อนในการผลิตกลีเซอรอลคาร์บอนเนต ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาเป็นพวกโลหะออกไซด์ จะนำไปทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวแปรต่างๆ ได้แก่ เวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของ DMC ต่อกลิเซอรอล ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิ จากการศึกษาพบว่า

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำข้อมูลไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้นิเทศศาสตร์  
เอกสารนี้สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการอ้างอิงเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้นิเทศศาสตร์  
เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำข้อมูลไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้นิเทศศาสตร์

ประสิทธิภาพมากที่สุดคือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยสามารถทำปฏิกิริยาได้ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอนเนต 94.2% เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง DMC ต่อกลีเซอรอล เท่ากับ 2 ปริมาณของ CaO เท่ากับ 1% โดยโมลของกลีเซอรอล และอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนด้วยการฉายรังสีไมโครเวฟช่วยทำให้กลีเซอรอลเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วและเป็นเส้นทางการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนเนตที่ประหยัดพลังงานมาก

P.F.Godfree และ D.Y.Ganapati [35] ในปี ค.ศ.2018 ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนเนตจากกลีเซอรอลและยูเรียโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ถูกสังเคราะห์โดยวิธีการเผาไหม้ (Combustion method) และนำไปวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SEM XRD TPD และ  $N_2$  adsorption-desorption จากนั้นทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่ออัตราเริ่มต้นของปฏิกิริยา การเปลี่ยนแปลง (Conversion) และการเลือกเกิด (Selectivity) จึงเกิดกลไกการเกิดปฏิกิริยาและจลนศาสตร์ขึ้น และพบว่าแมกนีเซียมออกไซด์แสดงพฤติกรรมเร่งปฏิกิริยาอย่างมีประสิทธิภาพในการผลิตกลีเซอรอลคาร์บอนเนตซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงสูงถึง 71% เลือกเกิดเป็นกลีเซอรอลคาร์บอนเนตได้ 100% ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในสภาวะบรรยากาศ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกู้คืนได้ง่ายและสามารถใช้ซ้ำได้ในรอบต่อไป โดยไม่สูญเสียความสามารถในการทำปฏิกิริยา

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนเนต โดยมีกลีเซอรอลกับยูเรียเป็นสารตั้งต้นและใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์  $[Ca(OH)_2]$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) ทำปฏิกิริยาในเครื่องไมโครเวฟ (Microwave) โดยจะทำการศึกษามวลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ เวลา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งศึกษาอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ และเวลา จากการทำปฏิกิริยาโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด แล้วนำสภาวะที่ได้ไปศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้หลังจากทำปฏิกิริยาจะมีแก๊สแอมโมเนีย ( $NH_3$ ) เกิดขึ้นจึงต้องทำการติดตั้ง Trap เพื่อดูดซับแก๊สแอมโมเนีย และสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมเสร็จแล้วจะนำไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) และวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (TGA) จากนั้นวิเคราะห์หาผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอนเนตที่ได้ด้วยเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) เทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) และเทคนิค Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC-FID)

### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ปีกเกอร์
2. ขวดก้นกลม
3. กระบอกตวง
4. ขวดวัดปริมาตร
5. แท่งแก้วคนสาร
6. ขวดรูปชมพู่
7. ซ้อนตักสาร
8. ปีเปต
9. หลอดหยด
10. จุกยางสำหรับดูดสาร
11. คอนเดนเซอร์ (Condenser)
12. บิวเรต
13. Modified Glass 4-way claisen adaptor
14. ขาดตั้งและที่จับบิวเรต
15. Rotary Evaporator bump trap
16. กระดาษกรอง ขนาด 5A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ 17. Stream inlet tube bent เพื่อการศึกษาเท่านั้น 18. โกร่งบดสารไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
19. ชุดเครื่องกรองแบบลดความดัน และต้องอ้างอิง 20. เครื่องชั่งดิจิทัล 4 ตำแหน่งนำไปใช้

21. ตู้ดูดควัน
22. ตู้อบ (Oven)
23. เครื่องไมโครเวฟ บริษัท Samsung รุ่น MS23F301EAW
24. เครื่องวัดอุณหภูมิ (IR-Thermometer) บริษัท FLUKE รุ่น Fluke-561 เพิ่มStainless thermocouple
25. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์(X-ray Diffractometer; XRD) บริษัทSHIMADZ รุ่น XRD-6100
26. เครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) บริษัทTHERMO SCIENTIFIC รุ่น THERMO SCIENTIFIC MODEL NICOLET 6700
27. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA) บริษัท Perkin รุ่น pyris 1 TGA
28. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography - Mass Spectrometry; GC-MS) บริษัท Agilent GC รุ่น G1530N, MS รุ่น G2573A
29. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography - Flame Ionization Detector; GC-FID) บริษัท Varian รุ่น CP-3800

### 3.2 สารเคมี

1. กลีเซอรอล (Glycerol) ความบริสุทธิ์ 99.5% เกรด Analytical reagent บริษัท Carlo Erba Reagents
2. ยูเรีย (Urea) ความบริสุทธิ์ 99.0% เกรด Analytical reagent บริษัท Carlo Erba Reagents
3. เปลือกไข่
4. แคลเซียมไฮดรอกไซด์  $[Ca(OH)_2]$  เกรด Analytical reagent บริษัท Carlo Erba Reagents
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรด Analytical reagent บริษัท Carlo Erba Reagents
6. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรด Analytical reagent บริษัท Carlo Erba Reagents
7. เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) เกรด Analytical reagent บริษัท Fisher scientific
8. เมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl alcohol) เกรด Analytical reagent บริษัท Fisher scientific

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) เกรด Analytical reagent บริษัท Carlo Erba Reagents
10. น้ำกลั่น
11. แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เกรด Analytical reagent บริษัท Carlo Erba Reagents

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การหาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ในเปลือกไข่

##### 3.3.1.1 การเตรียมเปลือกไข่

1. นำเปลือกไข่เป็ดมาล้างทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก รวมถึงนำเยื่อเมือกด้านในออกให้หมด ทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วบดให้ละเอียด จากนั้นนำมาอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
2. นำเปลือกไข่ที่ผ่านการบดให้ละเอียดแล้วไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) และวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (TGA)

##### 3.3.1.2 การหาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ในเปลือกไข่

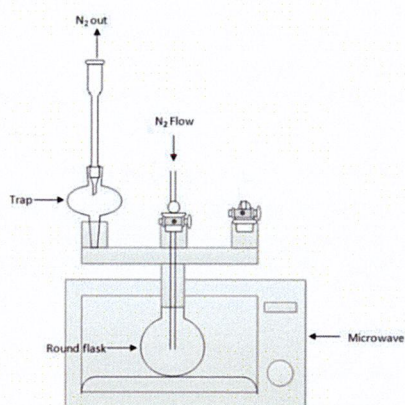
1. ชั่งเปลือกไข่ที่ผ่านการบดแล้วมา 0.45-0.55 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมเอทานอล 1 มิลลิลิตร และกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 1 M จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงไป แล้วให้ความร้อนจนเดือด จากนั้นนำมาวางทิ้งไว้ให้เย็น
3. เติมฟีนอล์ฟทาลีน 3-4 หยด
4. นำไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 M
5. บันทึกปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ในการไทเทรต เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกไข่
6. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

### 3.3.2 การสังเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ $[Ca(OH)_2]$ จากเปลือกไข่

1. ชั่งเปลือกไข่ผ่านการบดแล้ว 40 กรัม ละลายในกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 6 M จำนวน 133.6 มิลลิลิตร
2. กรองสารละลายด้วยการกรองแบบลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองขนาด 5A
3. นำสารละลายที่ได้จากการกรองมาตกตะกอนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.5 M จำนวน 1614.53 มิลลิลิตร
4. กรองตะกอนด้วยวิธีการกรองแบบลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองขนาด 5A
5. นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
6. นำตะกอนที่ได้จากข้อ 5. ไปบดให้ละเอียดแล้วนำไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) และวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (TGA)

### 3.3.3 การทดสอบเพื่อหากล้างไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟที่ให้อุณหภูมิเหมาะสมที่ กำลังไฟฟ้า 100, 300 และ 450 วัตต์

1. ชั่งกลีเซอรอล 18.4188 กรัม และ ยูเรีย 12.0120 กรัม คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลคือ 1:1 ใส่ลงในขวดก้นกลม
2. ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลท์ 13X ลงในส่วนของ Trap
3. นำขวดก้นกลมใส่ในเครื่องไมโครเวฟ จากนั้นติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.1 โดยต้องทำปฏิกิริยาภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนและต้องมี Trap สำหรับดูดซับแก๊สแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระหว่างทำปฏิกิริยา
4. เปิดเครื่องไมโครเวฟด้วยกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์
5. ตรวจวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ (IR-Thermometer) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยทำการบันทึกอุณหภูมิทุก 2 นาทีจนถึงนาทีที่ 20 จากนั้นบันทึกทุก 5 นาที จนครบ 90 นาที (ดังตารางที่ 3.1)
6. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 1 ถึงข้อ 5 โดยเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเป็น 300 และ 450 วัตต์ตามลำดับ
7. พล็อตกราฟระหว่างเวลาและอุณหภูมิเพื่อหากล้างไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟที่เหมาะสมในการทดลอง



รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ในการทำปฏิกิริยาเพื่อหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ให้อุณหภูมิเหมาะสม

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ให้อุณหภูมิเหมาะสม

อัตราส่วนโดยโมล กลีเซอรอลต่อยูเรีย	กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ (Watt)	เวลา (นาที)
1:1 (18.4188 g : 12.0120 g)	100	0
		2
		4
		6
		8
		10
		12
		14
		16
		18
		20
		25
		30
		35
		40
45		
50		
55		
60		

อัตราส่วนโดยโมล กลีเซอรอลต่อยูเรีย	กำลังไฟฟ้าของเครื่อง ไมโครเวฟ (Watt)	เวลา (นาที)
	100	65
		70
		75
		80
		85
		90
1:1 (18.4188 g : 12.0120 g)	300	0
		2
		4
		6
		8
		10
		12
		14
		16
		18
		20
		25
		30
		35
		40
		45
		50
		55
		60
		65
70		
75		
80		
85		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต  
 ไม่สามารถแก้ไขได้ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนโดยโมล กลีเซอรอลต่อยูเรีย	กำลังไฟฟ้าของเครื่อง ไมโครเวฟ (Watt)	เวลา (นาที)
1:1 (18.4188 g : 12.0120 g)	300	90
	450	0
		2
		4
		6
		8
		10
		12
		14
		16
		18
		20
		25
		30
		35
		40
		45
		50
55		
60		
65		
70		
75		
80		
85		
90		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การทดลองการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนเนต

#### 3.3.4.1 การทดลองการสังเคราะห์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟในสภาวะต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที

1. ชั่งกลีเซอรอล 18.4188 กรัม และ ยูเรีย 6.0060 กรัม คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมล คือ 1:0.5 ลงในขวดก้นกลม
2. ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลท์ 13X ลงในส่วนของ trap
3. ทำการติดตั้งอุปกรณ์เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ ดังรูปที่ 3.1 โดยต้องทำปฏิกิริยาภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนและต้องมี Trap สำหรับดูดซับแก๊สแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระหว่างทำปฏิกิริยา
4. เปิดไมโครเวฟด้วยกำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที
5. นำสารที่ได้ไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) เทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) และ Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC-FID)
6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 ถึงข้อ 5 โดยเปลี่ยนเวลาเป็น 45 และ 60 นาทีตามลำดับ
7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 ถึงข้อ 6 โดยเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรียเป็น 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองเพื่อสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนเนต โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

อัตราส่วนโดยโมล กลีเซอรอลต่อยูเรีย	กำลังไฟฟ้าของเครื่อง ไมโครเวฟ (Watt)	เวลา (นาที)
1:0.5 (18.4188 g : 6.0060 g)	450	30
		45
		60
1:1 (18.4188 g : 12.0120 g)	450	30
		45
		60
1:2 (18.4188 g : 24.0240 g)	450	30
		45
		60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4.2 การทดลองการสังเคราะห์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟในสถานะต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์

1. ชั่งกลีเซอรอล 18.4188 กรัม และ ยูเรีย 12.0120 กรัม คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลคือ 1:1 ลงในขวดก้นกลม
2. ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  0.3684 กรัม คิดเป็น 2% โดยน้ำหนักของกลีเซอรอลลงในขวดก้นกลม
3. ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลท์ 13X ลงในส่วนของ trap
4. ทำการติดตั้งอุปกรณ์เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ ดังรูปที่ 3.1 โดยต้องทำปฏิกิริยาภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนและต้องมี Trap สำหรับดูดซับแก๊สแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระหว่างทำปฏิกิริยา
5. เปิดไมโครเวฟด้วยกำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ เป็นเวลา 20 นาที
6. นำสารที่ได้ไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) เทคนิค Gas Chromatography - Mass Spectrometry (GC-MS) และ Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC-FID)
7. ทำซ้ำข้อ 1 ถึง 6 โดยเปลี่ยนเวลาเป็น 30 และ 40 นาที ตามลำดับ
8. ทำซ้ำข้อ 1 ถึง 7 โดยเปลี่ยนปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 5% โดยน้ำหนักของกลีเซอรอล
9. ทำซ้ำข้อ 1 ถึง 6 โดยเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกรดวิเคราะห์ เป็นเวลา 40 นาที

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงสถานะที่ใช้ในการทดลองเพื่อสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेट โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วนโดยโมล กลีเซอรอลต่อยูเรีย	กำลังไฟฟ้าของ เครื่องไมโครเวฟ (Watt)	% ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	เวลา (นาที)
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	1:1	450	2	20
				30
				40
			5	40
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ เกรดวิเคราะห์	1:1	450	2	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेटโดยมีกลีเซอรอลกับยูเรียเป็นสารตั้งต้น ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และทำปฏิกิริยาในสภาวะไมโครเวฟ โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेट ได้แก่ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา ผลการทดลองทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. ผลการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเปลือกไข่
2. ผลการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेटโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
3. ผลการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेटโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ซึ่งผลการทดลองจะถูกนำเสนอและอภิปรายตามลำดับดังนี้

#### 4.1 ผลการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเปลือกไข่

##### 4.1.1 การหาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ในเปลือกไข่

วิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ในเปลือกไข่เพื่อทำให้ทราบปริมาณของ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ได้ผลดังตารางที่ 4.1

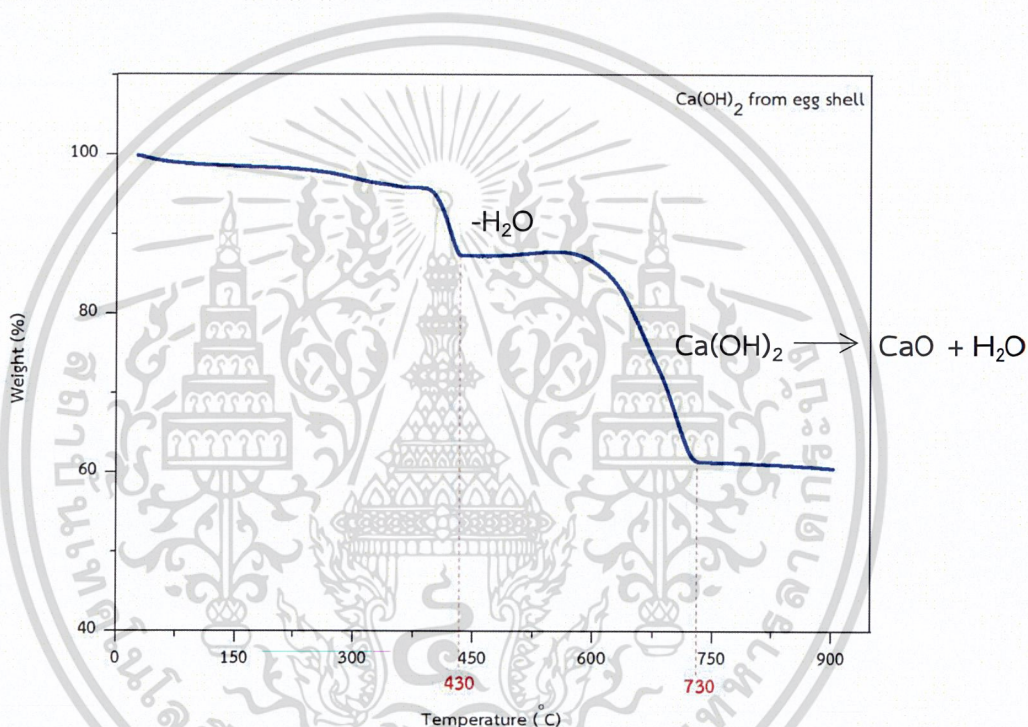
ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ในเปลือกไข่

ตัวอย่างที่	$\text{CaCO}_3$ ในตัวอย่าง (%)
1	96.2166
2	97.0792
3	96.5720
เฉลี่ย	96.6226

ตารางที่ 4.1 แสดงเปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกไข่จากตัวอย่างเปลือกไข่เปิดซึ่งทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ได้แคลเซียมคาร์บอเนตเฉลี่ยเท่ากับ 96.6226 เปอร์เซ็นต์ พบว่าใกล้เคียงกับข้อมูลในตารางที่ 2.5 [15] ที่ได้แสดงเปอร์เซ็นต์โดยมวลขององค์ประกอบต่างๆ ทางเคมีในเปลือกไข่ ซึ่งสำหรับเปลือกไข่เป็ดนั้นมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต 96.5 เปอร์เซ็นต์

#### 4.1.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (TGA)

สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis: TGA) นั้นเป็นการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนซึ่งจะวัดน้ำหนักของสารตัวอย่างเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงอุณหภูมิ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่างที่ทดสอบ เช่น การสูญเสียองค์ประกอบ (Decomposition) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นสารใหม่ เป็นต้น ผลของช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงไปขององค์ประกอบของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่แสดงดังรูปที่ 4.1

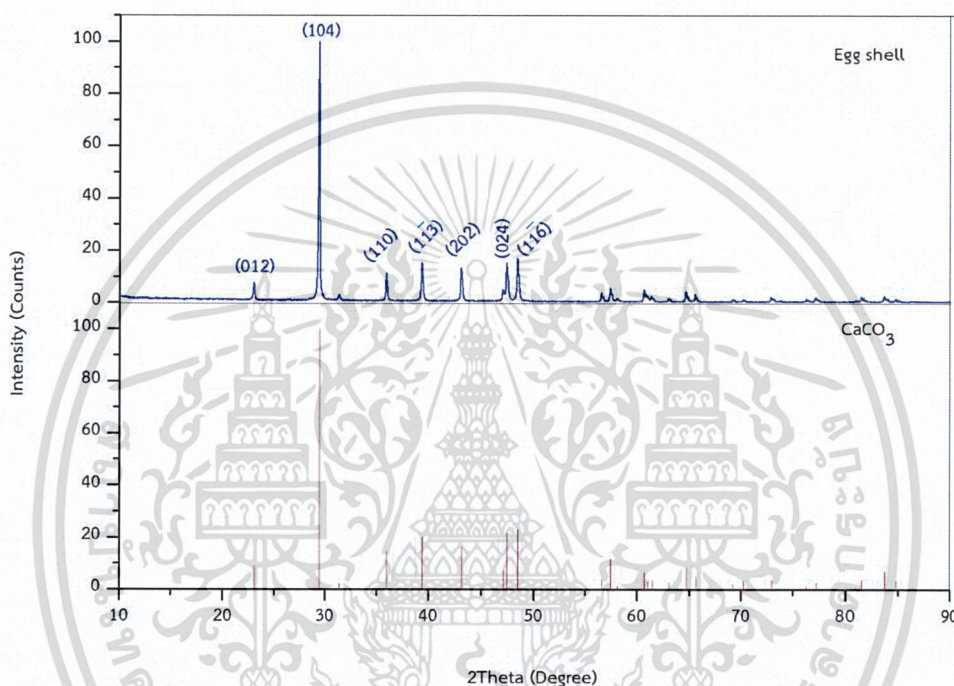


รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ด้วยเครื่อง TGA

จากรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของสารตัวอย่างที่สูญเสียไปต่ออุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้น ผลการวิเคราะห์พบว่าเกิดการสลายตัว 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 น้ำหนักที่สูญเสียไปในช่วงอุณหภูมิ 380-430 องศาเซลเซียส เกิดจากการสลายตัวไปของความชื้นในสารตัวอย่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ส่วนช่วงที่ 2 น้ำหนักที่สูญเสียไปในช่วงอุณหภูมิ 570-730 องศาเซลเซียส เกิดจากการสลายตัวขององค์ประกอบน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ในโครงสร้างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้เปลี่ยนโครงสร้างจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [ $\text{Ca(OH)}_2$ ] เป็นแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยสุภกรและคณะ [36] จึงกล่าวได้ว่า  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่สังเคราะห์ได้สามารถใช้ในปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนได้สูงถึง 730 องศาเซลเซียส โดยไม่ทำให้โครงสร้างสารเปลี่ยนแปลงไป

#### 4.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

เปลือกไข่และตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ ถูกนำมาวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) โดยดิฟแฟรคโทแกรมของเปลือกไข่ (Eggshell) และดิฟแฟรคโทแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ แสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

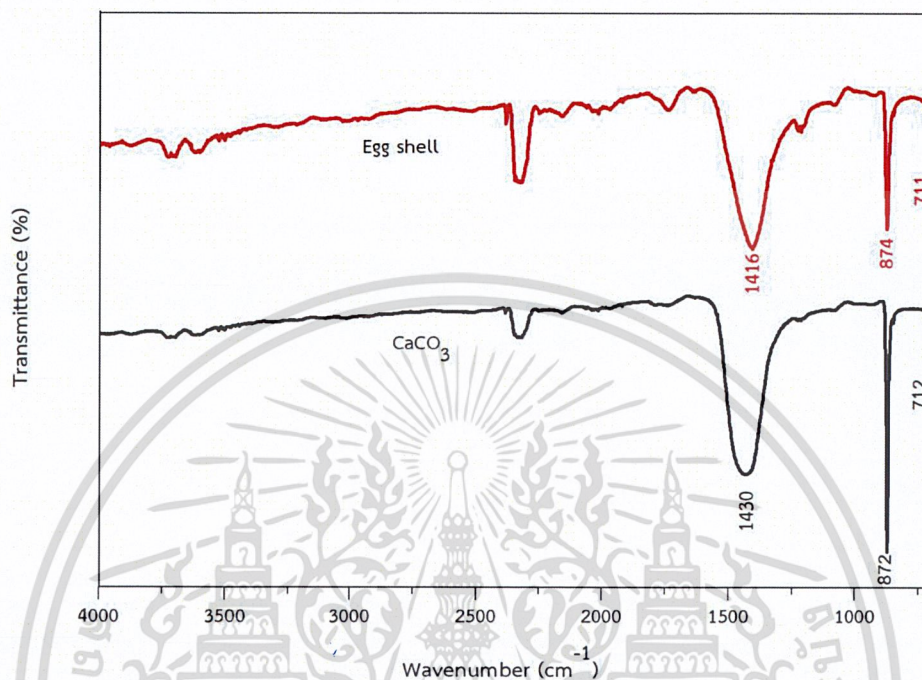


รูปที่ 4.2 ดิฟแฟรคโทแกรมของเปลือกไข่ (Eggshell) และ JCPDS standard ของ  $\text{CaCO}_3$  [37]

เมื่อพิจารณาดิฟแฟรคโทแกรมของเปลือกไข่ (Eggshell) ดังรูปที่ 4.2 พบว่าตำแหน่งที่  $2\theta$  เท่ากับ  $22.98^\circ$ ,  $29.36^\circ$ ,  $35.92^\circ$ ,  $39.34^\circ$ ,  $43.10^\circ$ ,  $47.42^\circ$  และ  $48.44^\circ$  เมื่อเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 47-1743 จะเห็นว่าขึ้นตรงกับพีคเอกลักษณ์ของแคลเซียมคาร์บอเนต จึงสรุปได้ว่าเปลือกไข่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต สามารถนำไปสังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อไปได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Diane และคณะ [37]

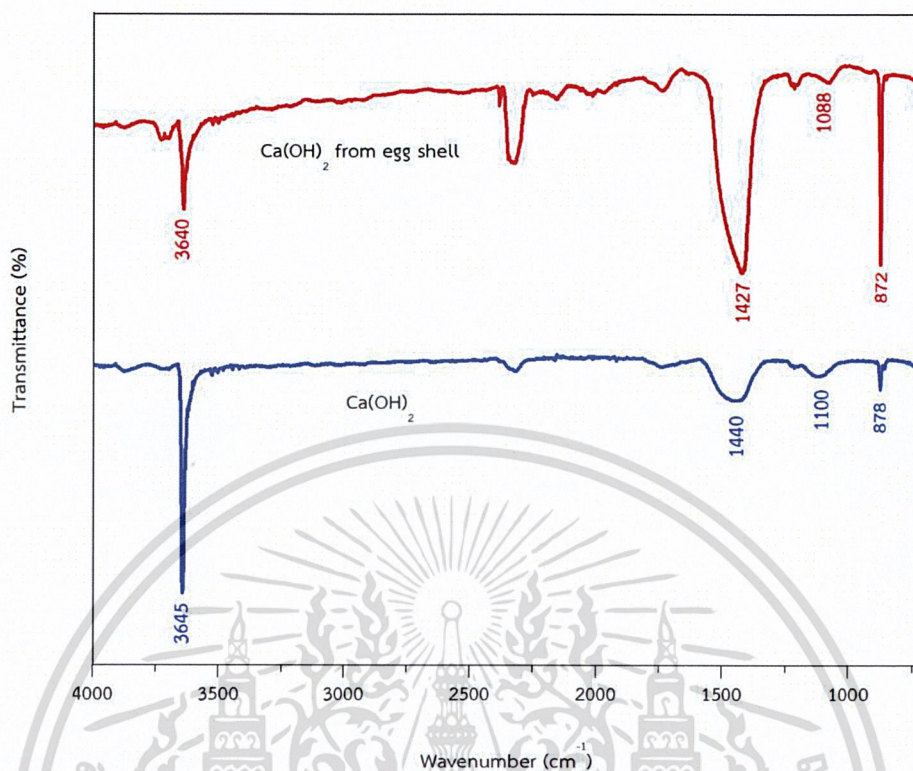


FTIR spectrum ของ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่สังเคราะห์ได้กับสาร  $\text{Ca(OH)}_2$  เกรดวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยนำเปลือกไข่และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR ในช่วงเลขคลื่น  $4000 - 700 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 4.4 ATR-FTIR spectrum ของเปลือกไข่เปรียบเทียบกับ  $\text{CaCO}_3$

จาก ATR-FTIR spectrum ของสาร  $\text{CaCO}_3$  ในรูปที่ 4.4 พบพิกัดเอกลักษณ์ที่สำคัญ ได้แก่ พิกัดการสั่นแบบยืดหดของหมู่ฟังก์ชัน C-O (C-O stretching) ใน  $\text{CO}_3^{2-}$  ที่  $1430 \text{ cm}^{-1}$  (การสั่นแบบยืดหดโดยไม่สมมาตร, Asymmetric stretching) ที่  $872 \text{ cm}^{-1}$  และ  $712 \text{ cm}^{-1}$  เป็นพิกัดของการสั่นที่อยู่ต่างระนาบ (Out-of plane) และระนาบเดียวกัน (In-plane) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุภกร และคณะ [36] จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าพิกัดเอกลักษณ์ที่สำคัญของเปลือกไข่ขึ้นพิกัดที่  $1416 \text{ cm}^{-1}$ ,  $874 \text{ cm}^{-1}$  และ  $711 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบพิกัดเอกลักษณ์ของ  $\text{CaCO}_3$  สารทั้ง 2 ชั้นพิกัดเอกลักษณ์ที่ตรงกันทั้ง 3 พิกัด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเปลือกไข่มีองค์ประกอบหลักเป็นสาร  $\text{CaCO}_3$  จึงสามารถนำเปลือกไข่ไปใช้ในการสังเคราะห์เป็น  $\text{Ca(OH)}_2$  เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไปได้

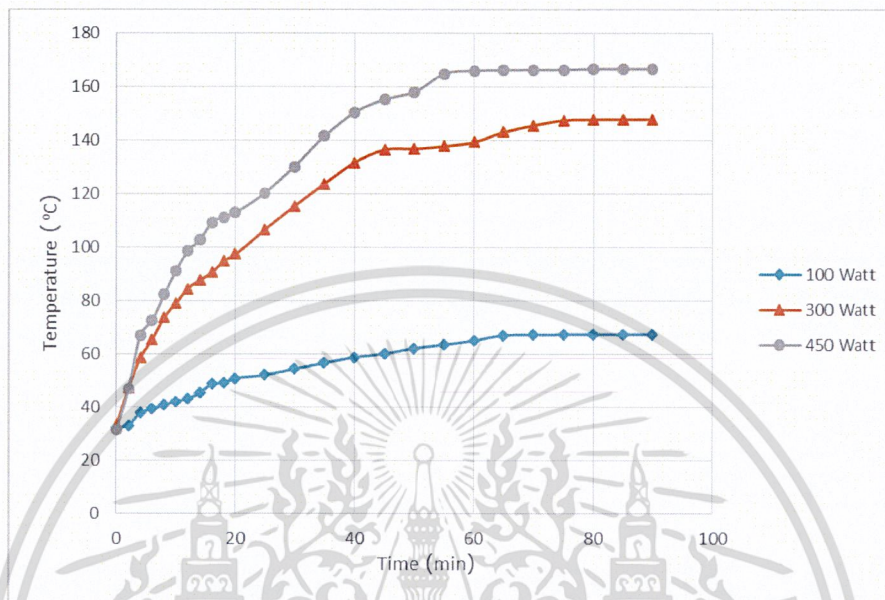


รูปที่ 4.5 ATR-FTIR spectrum ของ  $\text{Ca(OH)}_2$  เกรดวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่

จาก ATR-FTIR spectrum ของ  $\text{Ca(OH)}_2$  เกรดวิเคราะห์ ในรูปที่ 4.5 พบพีดเอกลักษณะที่สำคัญ ได้แก่ พีดการสั่นแบบยืดหดของหมู่ฟังก์ชัน O-H (O-H stretching) ที่  $3645 \text{ cm}^{-1}$  พีดการสั่นแบบยืดหดของหมู่ฟังก์ชัน C-O (C-O stretching) ใน  $\text{CO}_3^{2-}$  ที่  $1440 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1100 \text{ cm}^{-1}$  และ  $878 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ M. Khachani และคณะ [39] จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าพีดเอกลักษณะที่สำคัญของ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ปรากฏพีดที่  $3640 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1427 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1088 \text{ cm}^{-1}$  และ  $872 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบพีดเอกลักษณะของ  $\text{Ca(OH)}_2$  เกรดวิเคราะห์สารทั้ง 2 ชั้นพีดเอกลักษณะที่ตรงกันทั้ง 4 พีด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่นั้นเป็น  $\text{Ca(OH)}_2$  จริง สามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेटได้

## 4.2 ผลการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

### 4.2.1 การทดสอบหากำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟที่ให้อุณหภูมิเหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนต



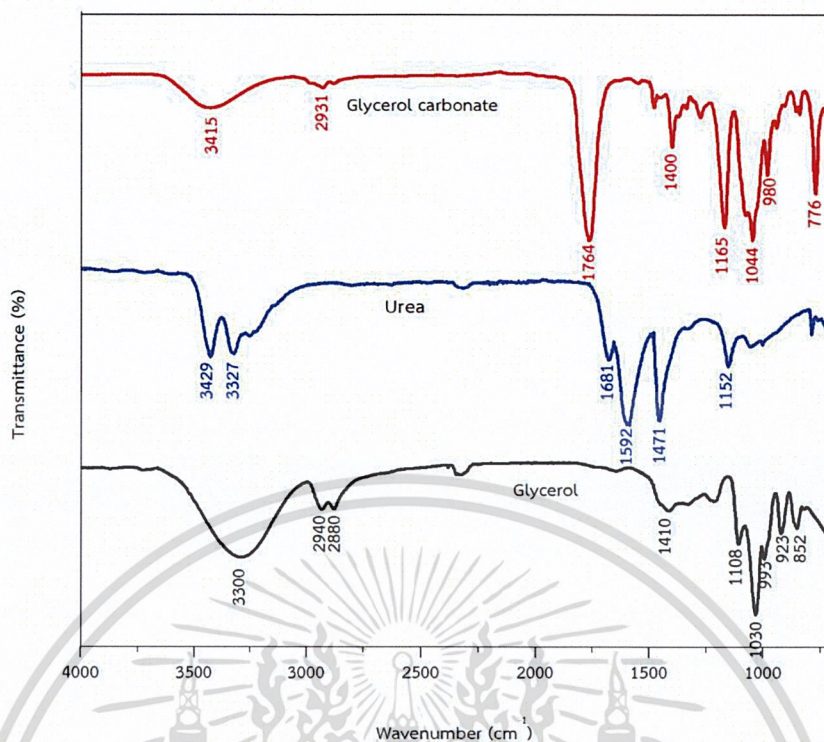
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องไมโครเวฟ

จากกราฟแสดงดังรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องไมโครเวฟ เพื่อหาเวลาและกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา ซึ่งจากกราฟจะพบว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 – 90 นาที กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 100, 300 และ 450 วัตต์ อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจนคงที่ที่อุณหภูมิ 67, 147 และ 166 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จึงเลือกทำปฏิกิริยาที่ กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ เนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาซึ่งอยู่ในช่วง 140-160 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสนั้นเหมาะสมที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Z.Lujun และคณะ [32]

### 4.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (FTIR)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้กลีเซอรอลกับยูเรียเป็นสารตั้งต้นในอัตราส่วนโดยโมล 1:0.5, 1:1 และ 1:2 ที่กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30, 45 และ 60 นาที โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อตรวจสอบว่าสารที่สังเคราะห์ได้เป็นกลีเซอรอลคาร์บอเนตที่ต้องการหรือไม่ โดยจะนำมาเปรียบเทียบกับ ATR-FTIR spectrum ของกลีเซอรอลคาร์บอเนตดังแสดงในรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



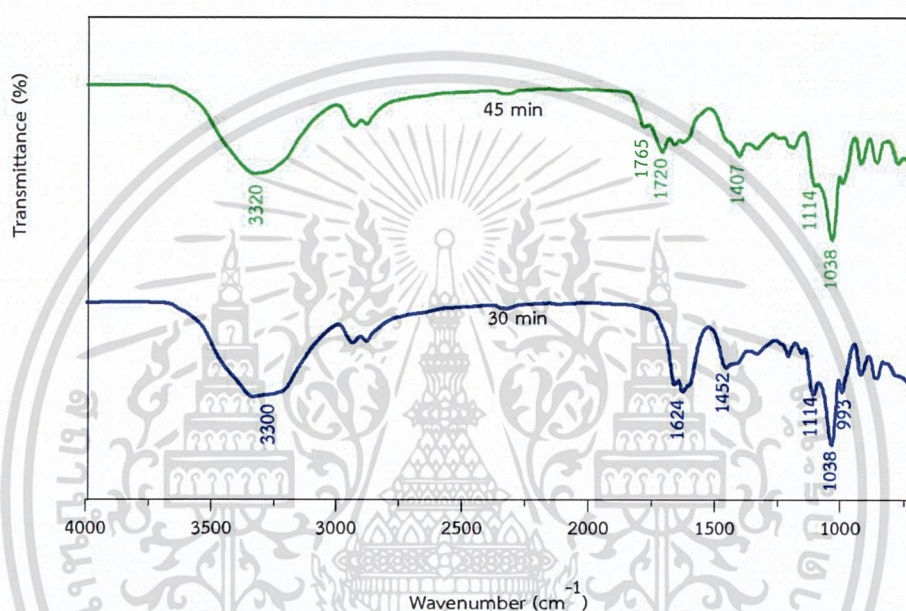
รูปที่ 4.7 ATR-FTIR spectrum ของกลีเซอรอล ยูเรีย และกลีเซอรอลคาร์บอเนต

ตารางที่ 4.2 การสั่นของหมู่ฟังก์ชันที่เลขคลื่นต่างๆ ของกลีเซอรอล ยูเรีย และกลีเซอรอลคาร์บอเนต

	เลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )	ชนิดของการสั่น
Glycerol	3300	O-H stretching
	2940, 2880	C-H stretching
	1410	O-H bending
	1108, 1030, 993	C-O stretching
	923, 852	C-H bending
Urea	3429, 3327	N-H stretching
	1681	C=O stretching
	1592	N-H bending
	1471, 1152	C-N stretching
Glycerol carbonate	3415	O-H stretching
	2931	C-H stretching
	1764	C=O stretching
	1400	O-H bending
	1165, 1044	C-O stretching
	980, 776	C-H bending

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
 การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

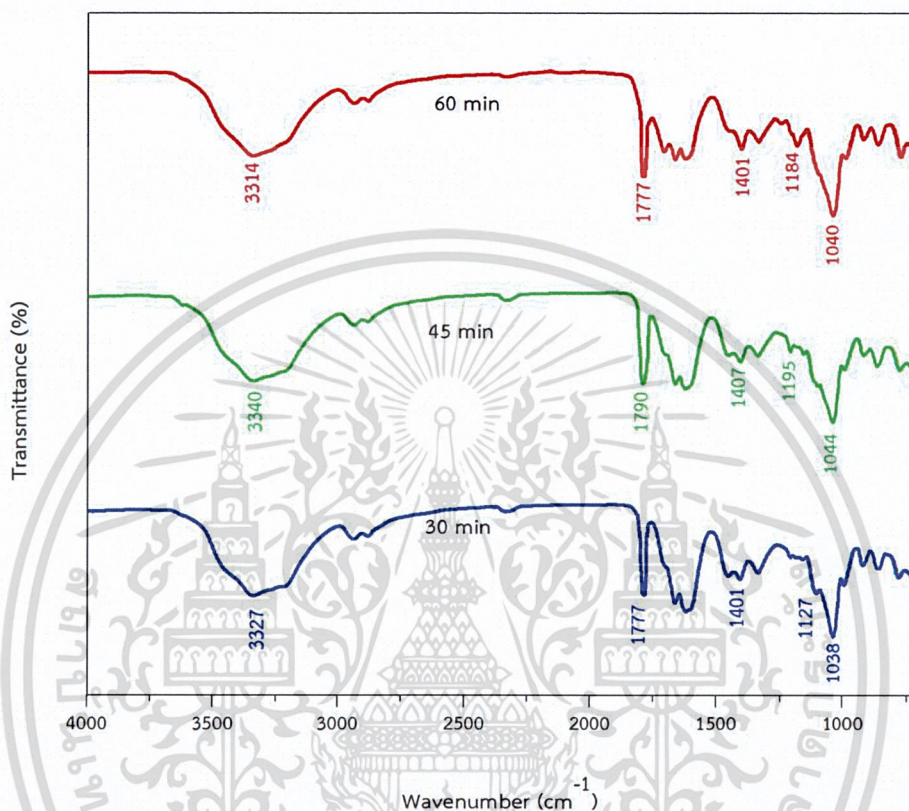
จาก ATR-FTIR spectrum ในรูปที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.2 สามารถสรุปพิกะเอกลักษณ์ที่สำคัญของกลีเซอรอลคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ดังนี้ พบพิกะการสั่นแบบยืดหดของหมู่ฟังก์ชัน O-H (O-H stretching) ที่  $3415\text{ cm}^{-1}$  พิกะของการสั่นแบบยืดหดของหมู่ฟังก์ชัน C=O (C=O stretching) ที่  $1764\text{ cm}^{-1}$  พิกะของการสั่นแบบบิดงอของหมู่ฟังก์ชัน O-H (O-H bending) ที่  $1400\text{ cm}^{-1}$  และพิกะของการสั่นแบบยืดหดของหมู่ฟังก์ชัน C-O (C-O stretching) ที่  $1165$  และ  $1044\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vidhyaa Paroo Indran และคณะ [40] นำข้อมูลพิกะเอกลักษณ์ที่สำคัญของกลีเซอรอลคาร์บอเนตนี้ไปเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.8 ATR-FTIR spectrum ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:0.5 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 30 และ 45 นาที โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.8 ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากใช้เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที ไม่แสดงในรูปเนื่องจากเวลาดังกล่าวนี้ผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาล และส่งกลิ่นไหม้ ซึ่งไม่ใช่ลักษณะของกลีเซอรอลคาร์บอเนตที่ควรจะได้ จึงไม่นำไปวิเคราะห์ ATR-FTIR ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากใช้เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที มีพิกะเอกลักษณ์ที่แสดงใกล้เคียงกับพิกะของกลีเซอรอลคาร์บอเนต แต่ไม่ปรากฏพิกะที่  $1764\text{ cm}^{-1}$  (C=O stretching) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งพิกะเอกลักษณ์สำคัญที่จะยืนยันได้ว่าผลิตภัณฑ์ได้เป็นกลีเซอรอลคาร์บอเนต ส่วนที่เวลา 45 นาที มีพิกะเอกลักษณ์ที่ขึ้นตรงกับพิกะเอกลักษณ์ของกลีเซอรอลคาร์บอเนตครบทั้ง 5 พิกะ นอกจากนั้น ทั้งที่เวลา 30 และ 45 นาที ปรากฏพิกะเอกลักษณ์ของกลีเซอรอลยูรีเทน (Glycerol Urethane) ที่มีพิกะเอกลักษณ์ปรากฏขึ้นที่ประมาณ  $1700$  และ  $1330\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ V. Calvino-Casida และคณะ [41]

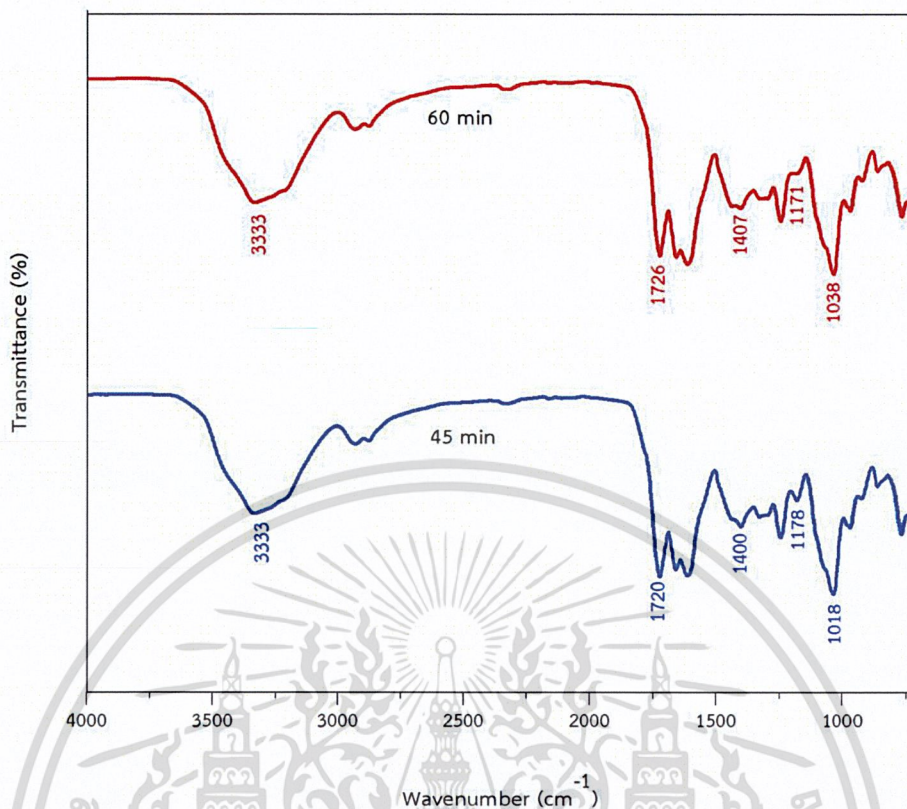
สรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:0.5 ที่ 30 นาที ไม่เกิดกลีเซอรอลคาร์บอเนต ส่วนที่ 45 นาที เกิดกลีเซอรอลคาร์บอเนต และทั้งที่ 30 และ 45 นาที เกิดกลีเซอรอลยูรีเทน (Glycerol Urethane)



รูปที่ 4.9 ATR-FTIR spectrum ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 30, 45 และ 60 นาทีโดยไม่ได้ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.9 ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากใช้เวลาทำปฏิกิริยา 30, 45 และ 60 นาที มีพีคเอกลักษณ์ที่ขึ้นตรงกับพีคเอกลักษณ์ของกลีเซอรอลคาร์บอเนตครบทั้ง 5 พีคอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังปรากฏพีคของกลีเซอรอลยูรีเทน

สรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 ที่เวลา 30, 45, และ 60 นาที เกิดกลีเซอรอลคาร์บอเนต และกลีเซอรอลยูรีเทน



รูปที่ 4.10 ATR-FTIR spectrum ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:2 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 45 และ 60 นาที โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.10 ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากใช้เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาทีไม่แสดงในรูปเนื่องจากอัตราส่วนโดยโมล 1:2 ที่เวลา 30 นาที สารตั้งต้นทั้ง 2 อย่างกลีเซอรอลและยูเรียละลายเข้ากันได้ไม่หมด เนื่องจากมีอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสมทำให้มีสัดส่วนของยูเรียมากเกินไป และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาน้อยเกินไปทำให้อุณหภูมิของปฏิกิริยายังไม่ถึงอุณหภูมิที่เหมาะสม สำหรับที่เวลา 45 และ 60 นาที มีพิกเอกลักษณะที่ขึ้นตรงกับพิกเอกลักษณะของกลีเซอรอลคาร์บอนเนตครบทั้ง 5 พิกอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังปรากฏพิกของกลีเซอรอลยูรีเทนอีกด้วย

สรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:2 ที่เวลา 45 และ 60 นาที เกิดกลีเซอรอลคาร์บอนเนต และกลีเซอรอลยูรีเทน

จากรูปที่ 4.8 , 4.9 และ 4.10 ทำให้สามารถสรุปได้ว่าที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรียที่เหมาะสมสำหรับทำปฏิกิริยาสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนเนตนี้คือ อัตราส่วนโดยโมล 1:1 เนื่องจากให้ผลของการเกิดกลีเซอรอลชัดเจนที่สุด

#### 4.2.3 การวิเคราะห์หาค่าการเปลี่ยนแปลง (Conversion) ของกลีเซอรอล ค่าการเลือกเกิด (Selectivity) และผลผลิต (Yield) ของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง Gas Chromatography – Flame Ionization Detector (GC-FID)

สารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกนำมาวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ของ Conversion, Selectivity และ Yield แสดงในตารางที่ 4.3

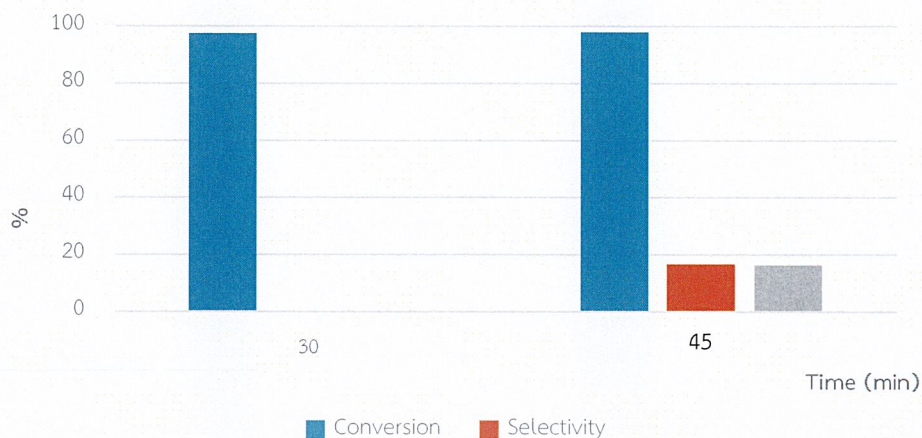
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेटโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

อัตราส่วนโดยโมล กลีเซอรอลต่อยูเรีย	เวลา (นาที)	Conversion (%)	Selectivity (%)	Yield (%)
1:0.5	30*	97.5589		
	45	97.9475	16.6464	16.3048
	60**			
1:1	30	98.0794	13.3190	13.0632
	45	98.1172	25.4454	24.9663
	60	98.7239	37.4274	36.9497
1:2	30***			
	45	97.0767	2.7200	2.6405
	60	98.0299	2.4908	2.4418

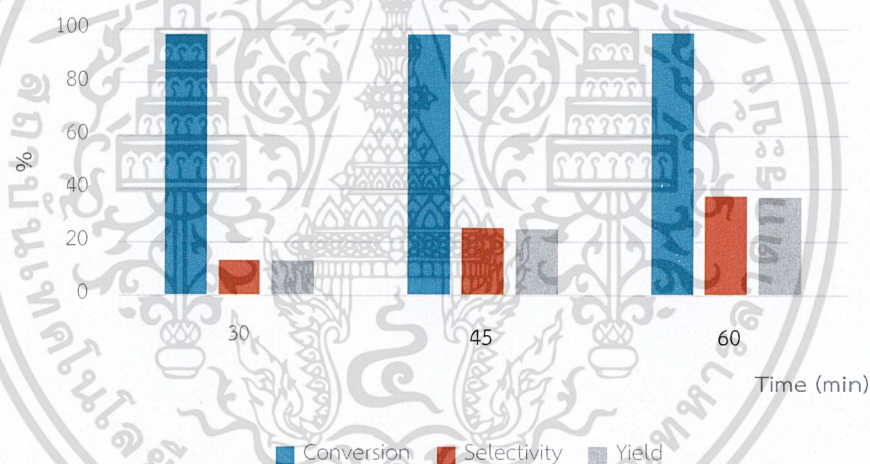
หมายเหตุ \* ไม่สามารถหาค่า selectivity และ Yield ได้เนื่องจากผลการทดลองไม่เกิดพีคของกลีเซอรอลคาร์บอนेट

\*\* ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ใหม่ จึงไม่นำสารที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์ผล

\*\*\* สารตั้งต้นไม่ละลาย เนื่องจากมีสัดส่วนของยูเรียมากเกินไป

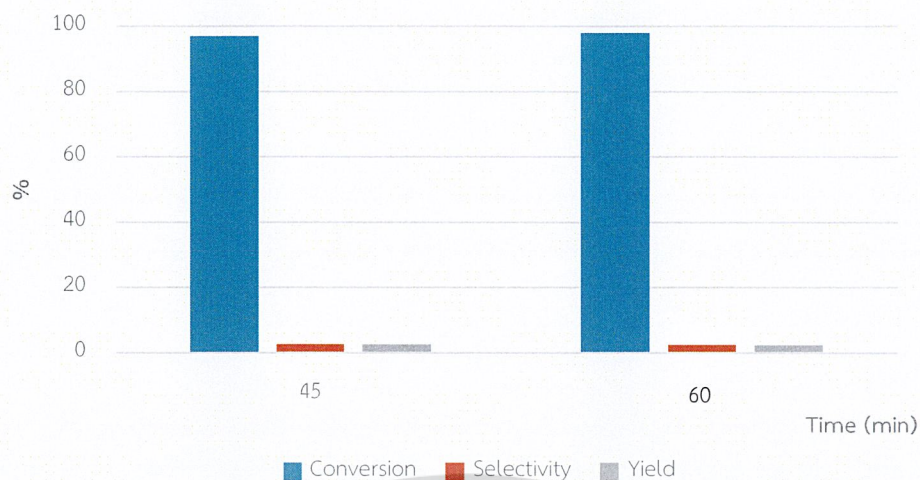


รูปที่ 4.11 แสดง % Conversion Selectivity และ Yield ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:0.5 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 30 และ 45 นาทีโดยไม่ได้ตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.12 แสดง % Conversion Selectivity และ Yield ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ที่เวลา 30 45 และ 60 นาทีโดยไม่ได้ตัวเร่งปฏิกิริยา

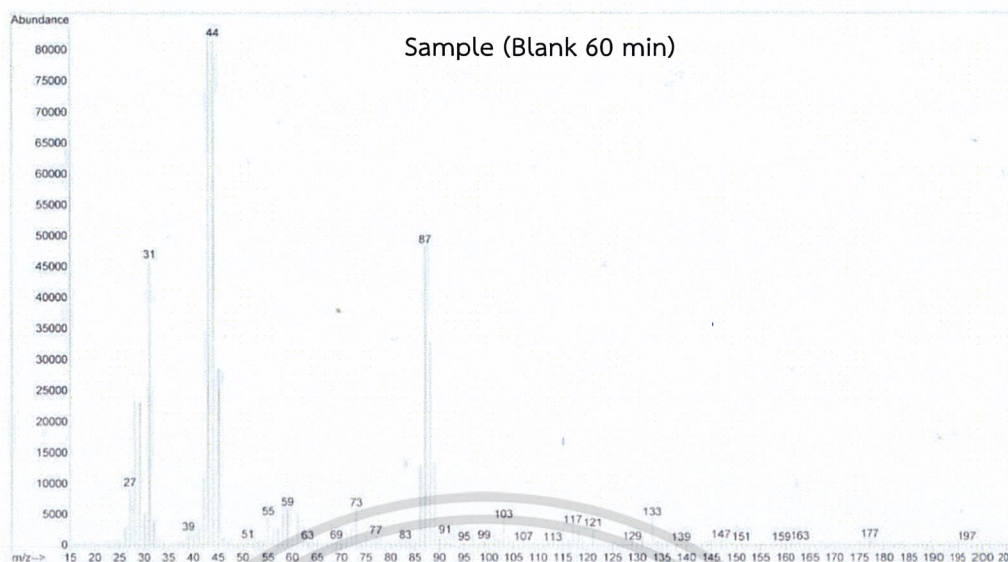
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดง % Conversion Selectivity และ Yield ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:2 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 45 และ 60 นาทีโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ จากรูปที่ 4.11 การสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:0.5 ที่เวลา 30 และ 45 นาที พบว่าที่เวลา 30 นาทีได้ผลของการเปลี่ยนแปลงกลีเซอรอล (Conversion) เท่ากับ 97.56 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่สามารถหาค่าการเลือกเกิด (Selectivity) และผลผลิต (Yield) ของกลีเซอรอลคาร์บอเนตได้ เนื่องจากเมื่อทำการวิเคราะห์ผลด้วย GC-FID แล้วไม่มีพีคของกลีเซอรอลคาร์บอเนตเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยามีสัดส่วนของกลีเซอรอลมากและเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยเกินไป อาจทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นสารอื่น เช่น โพลีกลีเซอรอล (Polyglycerol) เนื่องจากสัดส่วนของกลีเซอรอลมีมากกว่ายูเรียที่เป็นสารกำหนดปริมาณ (Limiting Reagent) ทำให้กลีเซอรอลทำปฏิกิริยากันเองได้โพลีกลีเซอรอล หรือสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือกลีเซอรอลยูรีเทน (Glycerol Urethane) ซึ่งเป็น Intermediate ก่อนเกิดกลีเซอรอลคาร์บอเนต ทำให้ปฏิกิริยายังไม่เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ และการสังเคราะห์ที่เวลา 60 นาที ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีสีน้ำตาลและส่งกลิ่นเหม็นไหม้ซึ่งไม่ใช่ลักษณะของสารกลีเซอรอลคาร์บอเนตที่ควรจะใสหรือไม่มีสี จึงไม่ได้นำมาวิเคราะห์ด้วย GC-FID สำหรับการสังเคราะห์ที่อัตราส่วนโมลกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 ที่เวลา 30 45 และ 60 นาที แสดงผลดังรูปที่ 4.12 ที่เวลา 60 นาทีมีการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล (Conversion) การเลือกเกิดของกลีเซอรอลคาร์บอเนต (Selectivity) และผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนต (Yield) เท่ากับ 98.72 37.43 และ 36.95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นสภาวะที่ได้ผลการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตมากที่สุด แม้ว่าค่าการเลือกเกิดของกลีเซอรอลคาร์บอเนตจะน้อย อาจเกิดจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นสารมัธยันตร์ (Intermediate) อย่างกลี-





รูปที่ 4.15 แสดงแมสสเปกตรัมขององค์ประกอบสารตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยาที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ เป็นเวลา 60 นาที โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

พิจารณาองค์ประกอบของผลผลิตในเชิงคุณภาพด้วยวิธี GC-MS พบว่าแมสสเปกตรัมเปรียบเทียบระหว่างสารมาตรฐานกลีเซอรอลคาร์บอเนต (Std. Glycerol Carbonate) ดังรูปที่ 4.14 กับสารตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยา (Sample: Blank 60 min) ดังรูปที่ 4.15 เมื่อทำการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบแมสสเปกตรัม (Mass spectrum) ของพีคองค์ประกอบในสารตัวอย่างจากเลขมวล (Mass number) หรือมวลต่อประจุ ( $m/z$ ) พบว่า ปรากฏพีคเลขมวล 31, 44 และ 87 ซึ่งตรงกับข้อมูลแมสสเปกตรัมอ้างอิงของสารมาตรฐานกลีเซอรอลคาร์บอเนต จึงสามารถยืนยันองค์ประกอบของสารตัวอย่างได้ว่าเป็นกลีเซอรอลคาร์บอเนต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวารรัตน์ [5]

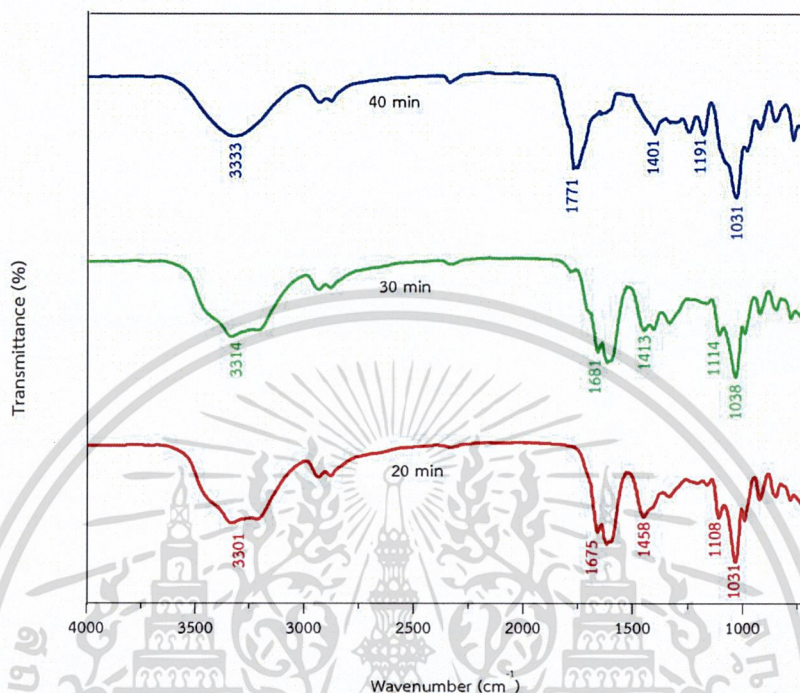
#### 4.3 ผลการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

##### 4.3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของกลีเซอรอลคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (FTIR)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้กลีเซอรอลกับยูเรียเป็นสารตั้งต้นในอัตราส่วนโดยโมล 1:1 ที่กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ แม้เวลาที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็น 60 นาที แต่เมื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงไปแล้วพบว่าอุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงขึ้นเร็วกว่าการทำปฏิกิริยาโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงต้องปรับลดเวลาลงเพื่อให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา โดยปรับเวลาเป็น 20, 30 และ 40 นาทีเพื่อศึกษาผลของเวลาเมื่อทำปฏิกิริยาโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การวิเคราะห์หมู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

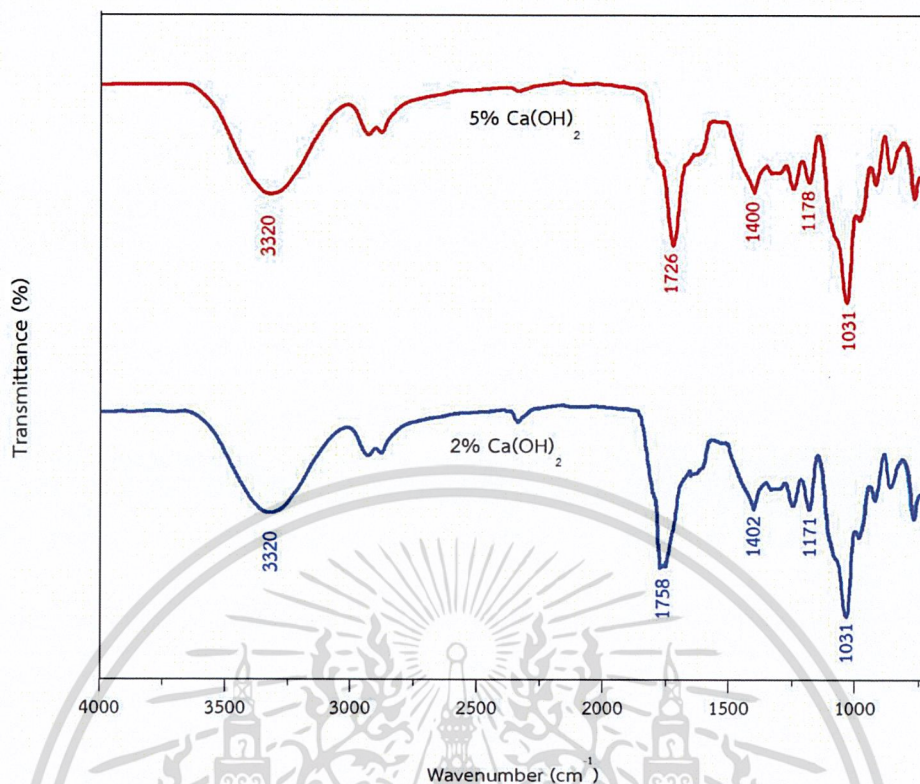
ฟังก์ชันนี้เพื่อตรวจสอบว่าสารที่สังเคราะห์ได้เป็นกลีเซอรอลคาร์บอเนตหรือไม่ โดยจะนำมาเปรียบเทียบกับ ATR-FTIR spectrum ของกลีเซอรอลคาร์บอเนตดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.16 ATR-FTIR spectrum ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 20, 30 และ 40 นาที โดยใช้  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ของกลีเซอรอล

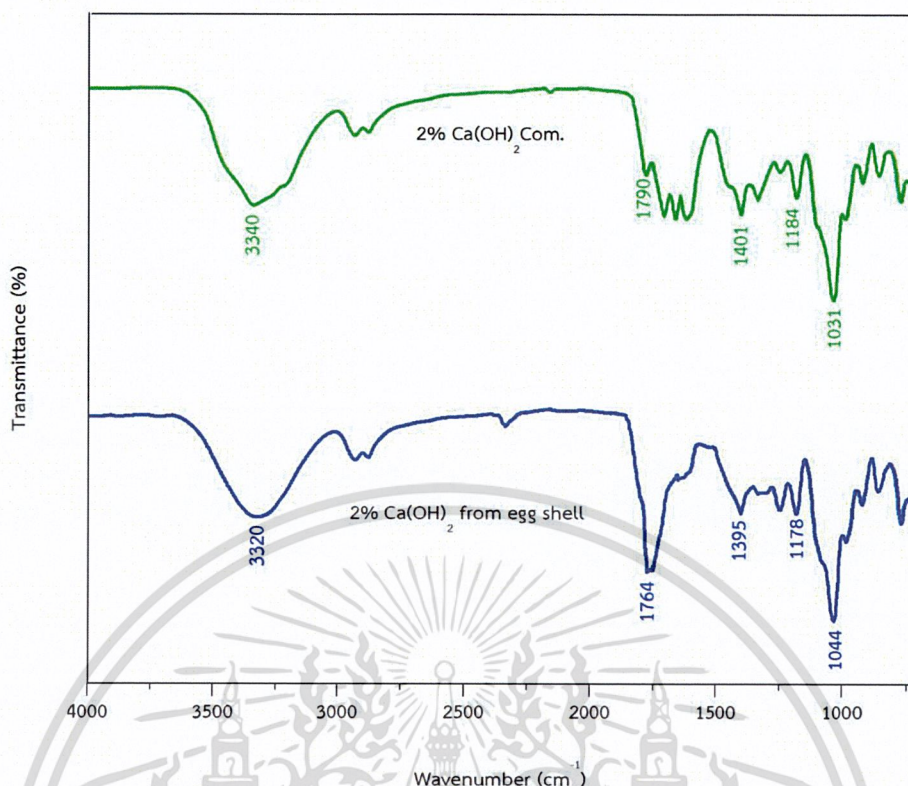
จากรูปที่ 4.16 ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากใช้เวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที ปรากฏพิกเอกลักษณะของกลีเซอรอลยูรีเทน ไม่ปรากฏพิกเอกลักษณะของกลีเซอรอลคาร์บอเนต ส่วนที่เวลา 30 นาที มีพิกเอกลักษณะใกล้เคียงกลีเซอรอลคาร์บอเนตดังรูป 4.7 แต่พิก  $\text{C}=\text{O}$  stretching ที่ขึ้นช่วง  $1700 \text{ cm}^{-1}$  นั้นไม่ชัดเจนรวมทั้งปรากฏพิกของกลีเซอรอลยูรีเทน แต่ที่เวลา 40 นาที พบพิกเอกลักษณะที่สำคัญขึ้นตรงกับพิกเอกลักษณะของกลีเซอรอลคาร์บอเนตอย่างชัดเจน

สรุปได้ว่าที่เวลา 20 และ 30 นาที เกิดกลีเซอรอลยูรีเทนที่เวลา 30 และ 40 นาที เกิดกลีเซอรอลคาร์บอเนต แต่ที่เวลา 40 นาที ปรากฏพิกชัดเจนกว่า ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเวลาที่เหมาะสมสำหรับทำปฏิกิริยาเมื่อใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ คือ ที่เวลา 40 นาที



รูปที่ 4.17 ATR-FTIR spectrum ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 40 นาที โดยใช้  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ของกลีเซอรอล

จากรูปที่ 4.17 ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ทั้ง 2 มีพีคเอกลักษณ์ไม่ต่างกันมาก และพีคเอกลักษณ์ที่มีใกล้เคียงกับกลีเซอรอลคาร์บอนेटดังรูปที่ 4.7 ทั้งคู่ จึงกล่าวได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ทั้ง 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ เกิดกลีเซอรอลคาร์บอนेटรวมถึงยังได้ผลไม่ต่างกัน ทำให้สามารถสรุปได้ว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่าอย่าง 2 เปอร์เซ็นต์ เป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेट



รูปที่ 4.18 ATR-FTIR spectrum ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 40 นาที โดยใช้  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่และ  $\text{Ca(OH)}_2$  เกรดวิเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ของกลีเซอรอล

จากรูปที่ 4.18 ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากใช้  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับเกรดวิเคราะห์ทั่วไป พบพิกัดเอกลักษณ์ที่ใกล้เคียงกับกลีเซอรอลคาร์บอนेटดังรูปที่ 4.7 ทั้งคู่ แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ให้พิกัดเอกลักษณ์ที่ตรงกับกลีเซอรอลคาร์บอนेटที่ชัดเจนมากกว่า และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาเกรดวิเคราะห์ปรากฏพิกัดของกลีเซอรอลยูรีเทนด้วย

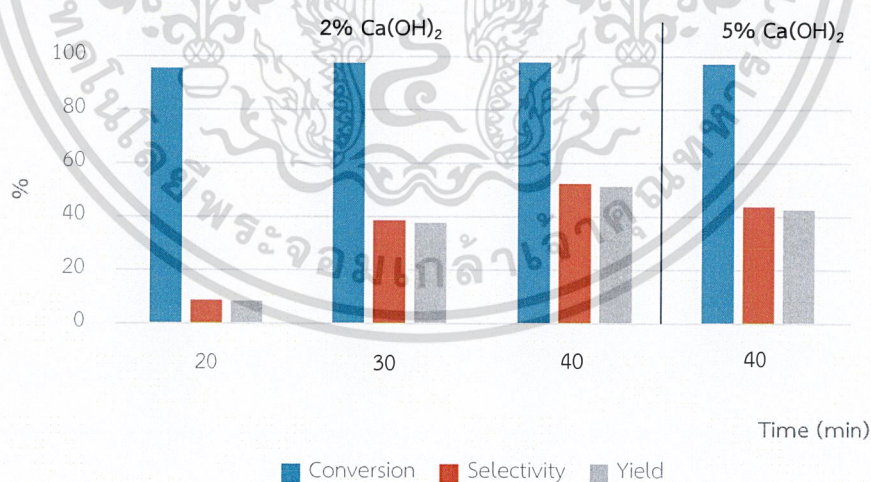
สรุปได้ว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Ca(OH)}_2$  ไม่ว่าจะจากการสังเคราะห์จากเปลือกไข่หรือเกรดวิเคราะห์ทั่วไป ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลคาร์บอนेट ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ให้ผลใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยาเกรดวิเคราะห์ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ให้ผลดีกว่า

#### 4.3.2 การวิเคราะห์หาค่าการเปลี่ยนแปลง (Conversion) ของกลีเซอรอล ค่าการเลือกเกิด (Selectivity) และผลผลิต (Yield) ของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง Gas Chromatography – Flame Ionization Detector (GC-FID)

สารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกนำมาวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ของ Conversion, Selectivity และ Yield ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลการทดลองการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेटโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

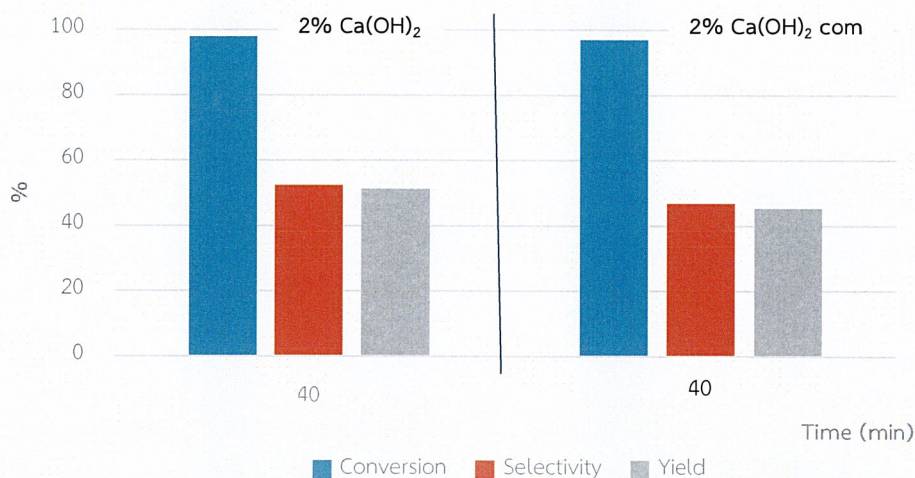
ตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วน โดยโมล กลีเซอรอล ต่อยูเรีย	% ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	เวลา (นาที)	Conversion (%)	Selectivity (%)	Yield (%)
Ca(OH) <sub>2</sub>	1:1	2	20	95.6131	8.8552	8.4667
			30	97.6002	38.7291	37.7996
			40	97.9027	52.4631	51.3628
Ca(OH) <sub>2</sub> เกรดวิเคราะห์	1:1	2	40	97.2828	43.8494	42.6579
Ca(OH) <sub>2</sub> เกรดวิเคราะห์	1:1	2	40	96.9273	46.8945	45.4535



รูปที่ 4.19 แสดง % Conversion Selectivity และ Yield ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดย

ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 20 30 และ 40 นาทีโดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Ca(OH)<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้

จากเปลือกไข่ 2% ของกลีเซอรอล และเวลา 40 นาทีของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Ca(OH)<sub>2</sub> ราคาไม่ต่ำกว่า 100 บาท ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ 5% ของกลีเซอรอลจนถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดง % Conversion Selectivity และ Yield ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ ที่เวลา 40 นาทีโดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ และตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  เกรดวิเคราะห์ 2% ของกลีเซอรอล

จากผลการทดลองในข้อ 4.2.3 จึงนำสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยา คืออัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 เวลา 60 นาที มาทำการทดลองโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่เมื่อนำสภาวะนี้มาใช้กับตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่จะทำให้คุณสมบัติของปฏิกิริยาสูงขึ้นเร็วกว่าการทำปฏิกิริยาโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จึงต้องทำการลดเวลาลงเพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา โดยปรับเวลาเป็น 20, 30 และ 40 นาที เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ และนำเวลาที่ได้ผลการทดลองดีที่สุดมาทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น และตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด

จากการศึกษาการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेटโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 และกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ จากรูปที่ 4.19 พบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ 2 เปอร์เซ็นต์ของกลีเซอรอล ให้ผลการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนेटมากที่สุดที่เวลา 40 นาทีที่มีการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล (Conversion) การเลือกเกิดของกลีเซอรอลคาร์บอนेट (Selectivity) และผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอนेट (Yield) เท่ากับ 97.90 52.46 และ 51.36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ 5 เปอร์เซ็นต์ของกลีเซอรอลที่เวลา 40 นาที การเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล (Conversion) การเลือกเกิดของกลีเซอรอลคาร์บอนेट (Selectivity) และผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอนेट (Yield) เท่ากับ

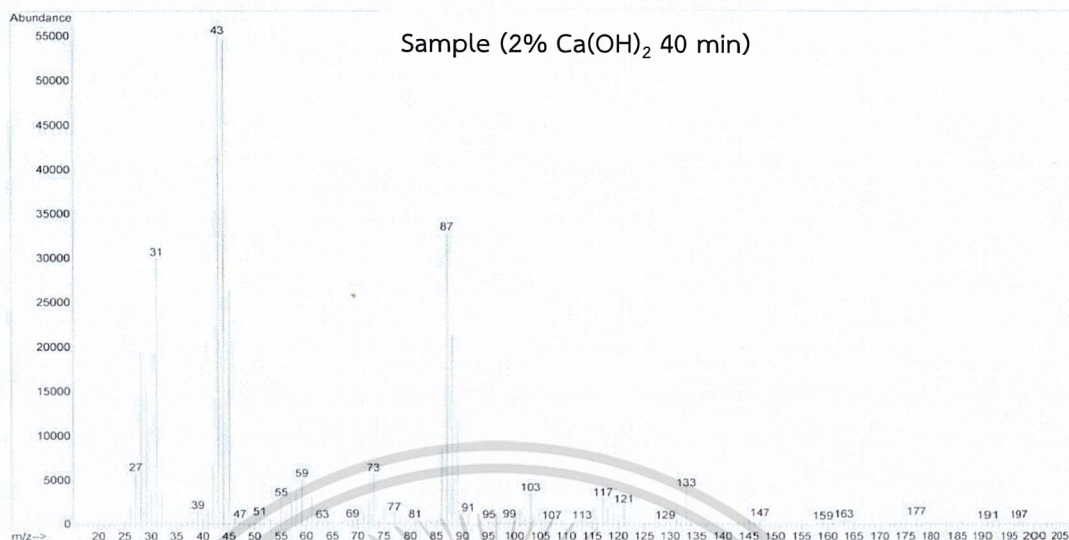
เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

97.28 43.85 และ 42.66 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นว่า การเพิ่มปริมาณตัวเร่งที่โหลดเข้าทำปฏิกิริยาจาก 2 เป็น 5 เปอร์เซ็นต์ของกลีเซอรอล ให้ค่าการเลือกเกิดของกลีเซอรอลคาร์บอเนต (Selectivity) ลดลง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจอยู่ในรูปของกลีเซอรอลยูรีเทน หรือเกิดเป็นผลพลอยได้ (by-product) ได้แก่ 4-(hydroxymethyl)oxazolidin-2-one และ (2-oxo1,3-dioxolan-4-yl)methyl carbamate [13] จากนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตด้วยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่กับตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกรดวิเคราะห์ 2 เปอร์เซ็นต์ของกลีเซอรอล ที่เวลา 40 นาที ดังรูปที่ 4.20 พบว่า ผลการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล (Conversion) การเลือกเกิดของกลีเซอรอลคาร์บอเนต (Selectivity) และผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนต (Yield) ใกล้เคียงกัน แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ให้ผลการสังเคราะห์ที่มากกว่า แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่มีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยา ช่วยทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น และได้ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนตมากขึ้น

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเพื่อสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ คือ อัตราส่วนโดยโมลกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ 2 เปอร์เซ็นต์ของกลีเซอรอล เป็นเวลา 40 นาที

#### 4.3.3 การวิเคราะห์ชนิดขององค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography - Mass Spectrometry (GC-MS)

สารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ เป็นเวลา 40 นาที โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า Retention time ของสารตัวอย่างขึ้นพีคที่ 15.59 min ตรงกับ Retention time ของสารมาตรฐานกลีเซอรอลคาร์บอเนต (Std. Glycerol Carbonate) ที่ขึ้นพีคที่ 15.68 min หลังจากนั้นพิจารณาดูองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างเพื่อยืนยันว่าเลขมวลของสารที่สังเคราะห์ได้ว่าเป็นกลีเซอรอลคาร์บอเนต ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แสดงแมสสเปกตรัมขององค์ประกอบกลีเซอรอลคาร์บอเนตในสารมาตรฐานกลีเซอรอลคาร์บอเนต และสารตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยาที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 450 วัตต์ เป็นเวลา 40 นาทีโดยใช้  $\text{Ca(OH)}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

พิจารณาองค์ประกอบของผลผลิตในเชิงคุณภาพด้วยวิธี GC-MS พบว่าแมสสเปกตรัมเปรียบเทียบระหว่างสารมาตรฐานกลีเซอรอลคาร์บอเนต (Std. Glycerol Carbonate) ดังรูปที่ 4.14 กับสารตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยา (Sample: 2%  $\text{Ca(OH)}_2$  40 min) ดังรูปที่ 4.21 เมื่อทำการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบแมสสเปกตรัม (Mass spectrum) ของพีคองค์ประกอบในสารตัวอย่างจากเลขมวล (Mass number) หรือมวลต่อประจุ ( $m/z$ ) พบว่า ปรากฏพีคเลขมวล 31, 43 และ 87 ซึ่งตรงกับข้อมูลแมสสเปกตรัมอ้างอิงของสารมาตรฐานกลีเซอรอลคาร์บอเนต จึงสามารถยืนยันองค์ประกอบของสารตัวอย่างได้ว่าเป็นกลีเซอรอลคาร์บอเนต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวารรัตน์ [5]

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

1) จากการศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากเปลือกไข่พบว่า เปลือกไข่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จึงสามารถนำเปลือกไข่ไปใช้ในการสังเคราะห์เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [ $\text{Ca(OH)}_2$ ] เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตได้ โดยสามารถใช้ในการปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนได้สูงถึง 730 องศาเซลเซียส

2) จากการศึกษาผลการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยา คือ 160 องศาเซลเซียส จึงเลือกใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟที่ 450 วัตต์ และสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเพื่อสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามากที่สุดคือ อัตราส่วนโดยโมลกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 ที่เวลา 60 นาที จะให้การเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล (Conversion) 98.72 เปอร์เซ็นต์ และค่าการเลือกเกิดของกลีเซอรอลคาร์บอเนต (Selectivity) 37.43 เปอร์เซ็นต์ และผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนต (Yield) 36.95 เปอร์เซ็นต์

3) จากการศึกษาผลการสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า สภาวะที่อัตราส่วนโดยโมลกลีเซอรอลต่อยูเรีย 1:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ 2 เปอร์เซ็นต์ของกลีเซอรอล เป็นเวลา 40 นาที จะให้การเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล (Conversion) 97.90 เปอร์เซ็นต์ ค่าการเลือกเกิดของกลีเซอรอลคาร์บอเนต (Selectivity) 52.46 เปอร์เซ็นต์ และผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนต (Yield) 51.36 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกรดวิเคราะห์ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลาเดียวกัน จะให้การเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล (Conversion) 96.93 เปอร์เซ็นต์ ค่าการเลือกเกิดของกลีเซอรอลคาร์บอเนต (Selectivity) 46.89 เปอร์เซ็นต์ และผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนต (Yield) 45.45 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้ผลการทดลองใกล้เคียงกัน แต่สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ให้ผลของกลีเซอรอลคาร์บอเนตได้มากกว่า จึงแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่มีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยา ช่วยทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น และได้ผลผลิตของกลีเซอรอลคาร์บอเนตมากขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นการลดปริมาณของเสียและเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกไข่อีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) สามารถเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ได้
- 2) ศึกษาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยปรับปริมาณให้อยู่ในช่วง 3-4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกลีเซอรอล ซึ่งไม่ได้ศึกษาในโครงการพิเศษครั้งนี้
- 3) การใช้เครื่องไมโครเวฟแบบมาตรฐานในการให้ความร้อนควรคำนึงถึงปริมาณสาร ชนิดของสาร และกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ เนื่องจากส่งผลให้ได้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน
- 4) ทำการปรับปรุงเครื่องไมโครเวฟ โดยเพิ่มอุปกรณ์ที่ช่วยในการปั่นกวนสารในระหว่างการทำปฏิกิริยา เพื่อช่วยให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากันได้ดีขึ้น
- 5) ควรให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา เพื่อให้สารละลายเข้ากันได้ดีมากขึ้น
- 6) วิเคราะห์ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค Gas Adsorption Analysis ตามทฤษฎีของ Brunauer, Emmett and Teller (BET)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Widayat, Agam Duma Kalista Wibowo and Hadiyantoa. 2013. "Study on production process of biodiesel from rubber seed (hevea brasiliensis) by in situ transesterification method with acid catalyst." *Energy Procedia*. 32 : 64-73.
- [2] นรินทร์ ต้นไพบูลย์. 2560. แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2560 อุตสาหกรรมไบโอดีเซล อุตสาหกรรมไบโอดีเซล. [Online]. Available: [https://www.krungsri.com/bank/getmedia/9f400e98-f5be-4db9-b120-338e20d86ec4/IO\\_Biodiesel\\_201705\\_TH.aspx](https://www.krungsri.com/bank/getmedia/9f400e98-f5be-4db9-b120-338e20d86ec4/IO_Biodiesel_201705_TH.aspx). เข้าถึงเมื่อวันที่ 27 ม.ค. 2562.
- [3] Saifuddin Nomanbhay, Refal Hussein and Mei Yin Ong. 2018. "Sustainability of biodiesel production in Malaysia by production of bio-oil from crude glycerol using microwave pyrolysis: A review." *Green Chemistry Letters and Reviews*. 11(2) : 135-157.
- [4] แพรพรรณ ศรีสอ้าน. 2560. "ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรอลและโดเมทิลคาร์บอเนตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] วรรัตน์ เลิศสนเมธากุล. 2553. "กระบวนการผลิตกลีเซอรอลคาร์บอเนตจากกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [6] S. E. Kondawar, R. B. Mane, A. Vasishta, S. B. More, S. D. Dhengale and C. V. Rode. 2017. "Carbonylation of glycerol with urea to glycerol carbonate over supported Zn catalysts." *Appl Petrochem Res*. 7 : 41-53.
- [7] ปริญา ฉากจนโรดม. 2557. "การให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟและการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปวัสดุ." ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 27(87) : 57-67.
- [8] คลื่นไมโครเวฟ คุณสมบัติ และประโยชน์คลื่นไมโครเวฟ.[Online]. Available: <https://www.siamchemi.com/คลื่นไมโครเวฟ/>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 27 ม.ค. 2562.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [9] ภิเชก รุ่งโรจน์ชยพร. 2557. “กลีเซอรอล:การใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน.”  
วิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. 23(2) : 140-159.
- [10] กลีเซอริน/กลีเซอรอล. [Online]. Available: <https://www.siamchemi.com/กลีเซอริน/>.  
เข้าถึงเมื่อวันที่ 27 ม.ค. 2562.
- [11] สมาคมผู้เลี้ยงสุกรแห่งชาติ. 2015. กลีเซอรอล:แหล่งพลังงานและสารเพิ่มความน่ากินของ  
อาหารลูกสุกรหย่านมการผลิตไบโอดีเซล. [Online] Available:  
<http://thongmabiodiesel.blogspot.com/2007/05/naoh-0.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่  
27 ม.ค. 2562
- [12] Thafertilizer. ปุ๋ยยูเรีย (Urea). [Online] Available: <http://www.thafertilizer.com/urea-fertilizer>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 3 ก.พ. 2562.
- [13] Huy Nguyen-Phu, Chan-yi Park, and Eun WooShin. 2018. “Dual catalysis over ZnAl mixed oxides in the glycerolysis of urea: Homogeneous and heterogeneous reaction routes.” *Applied Catalysis A: General*. 25(552) : 1-10.
- [14] Sonnati, M. O., Amigoni, S., Taffin de Givenchy, E. P., Darmanin, T., Choulet, O., and Guittard, F. 2013. “Glycerol carbonate as a versatile building block for tomorrow: synthesis, reactivity, properties and applications.” *Green Chem*. 15(2) : 283–306.
- [15] กันยารัตน์ นวมโคกสูง, กาญจนา ชีพนรัตน์ และเทพอนันต์ เฟื่องฟู. 2552. “การสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่เตรียมด้วยวิธีทางเคมีเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.”  
ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์,  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [16] แคลเซียมไฮดรอกไซด์. [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/แคลเซียมไฮดรอกไซด์>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 3 ก.พ. 2562.
- [17] สุภกร บุญยีน, มณฑา มาลัยทอง, อภิสสิทธิ์ โพธิ์แก้ว, เบญญา เชิดหิรัญกร และอิสรพงษ์ เชื้อ  
สันเทียะ. 2558. “การสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอย.” *Thai Journal of Science and Technology*. 4(2) : 115-122.

- [18] ปัตตะ ฮาแว, พนิตา สุมานะตระกูล, ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ และนิติธร ชูศรี. 2558. “การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงด้วยเทคนิคการขยายตัวอย่างรวดเร็วของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือสภาวะวิกฤต.” วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. 18(2) : 37-45.
- [19] ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาเคมี. [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/saisamorn333/paccay-thi-mi-phl-tx-ptikiriya-khemi>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ก.พ. 2562.
- [20] Thermogravimetric Analyzer(PERKIN ELMER TGA7). [Online]. Available: <http://www.sec.psu.ac.th/tga.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ก.พ. 2562.
- [21] [Online]. Available : [html://www.mwit.ac.th/pornmong/PPT\\_X-ray.pdf](html://www.mwit.ac.th/pornmong/PPT_X-ray.pdf). เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ก.พ. 2562.
- [22] [Online]. Available : <https://www.slideshare.net/christophsonntag/spectroscopy-xrd>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ก.พ. 2562.
- [23] [Online]. Available : <http://pws.npru.ac.th/arunrat/data/files/ch3%20IR.pdf?fbclid=IwAR06ir0PcDpWJDZ8xFwZ6Co1LdcqnoGQ6BgnOaOmRfhLZ3jFTGXgP8zsU4Q>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ก.พ. 2562.
- [24] [Online]. Available : [http://www.thaitechno.net/t1/knowledge\\_detail.php?id=1230&uid=41046](http://www.thaitechno.net/t1/knowledge_detail.php?id=1230&uid=41046). เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ก.พ. 2562.
- [25] ธัญญา ศูนย์คุ้ม. 2557. “การพิสูจน์น้ำมันเบนซินบนฝ่ามือและเสื้อผ้าของผู้วางเพลิงโดยเทคนิค Gas Chromatography - Flame Ionization Detector (GC-FID)” ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [26] [Online]. Available : <http://www.particulatesystems.com/Products/HPVA-II-High-Pressure-Volumetric-Analyzer/HPVA-II-Supplemental-Reporting.aspx>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ก.พ. 2562.
- [27] [Online]. Available : <http://bdms.nmlindia.org/oleinfo/?q=content/accelerated-surface-area-and-porosimetry-analyzer>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ก.พ. 2562.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส Non-contact Thermometer (Infrared Thermometer). [Online]. Available: <https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=147>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ก.พ. 2562.
- [29] Infrared thermometer/เทอร์โมมิเตอร์ชนิดอินฟราเรด. [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/4305/infrared-thermometer-เทอร์โมมิเตอร์ชนิดอินฟราเรด>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ก.พ. 2562.
- [30] Diego M. Chaves and Marcio J. Da Silva. 2018. "A selective synthesis of glycerol carbonate from glycerol and urea over  $\text{Sn}(\text{OH})_2$ : a solid and recyclable in situ generated catalyst." *Royal society of chemistry*.
- [31] พรพรรณ สิริสมนต์ และวิทยา ปันสุวรรณ. "การสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนตจากกลีเซอ-รอลดิบผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลของน้ำมันปาล์ม." การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 53 : 230-237.
- [32] Lujun Zhang, Zhaofu Zhang, Congyi Wu, Qingli Qian, Jun Ma, Long Jiang and Buxing Han. 2018. "Microwave assisted synthesis of glycerol carbonate from glycerol and urea." *Pure Appl. Chem.* 90(1) : 1-6.
- [33] Wanichaya Praikaew, Worapon Kiatkittipong, Kunlanan Kiatkittipong, Navadol Laosiripojana, Navin Viriyaempikul, Sunya Boonyasuwat, Farid Aiouache, Vesna Najdanovic and Suttichai Assabumrungrat. 2018. "Synthesis of glycerol carbonate from dimethyl carbonate and glycerol using  $\text{CaO}$  derived from eggshells." *MATEC Web of Conferences*. 192 : 1-4.
- [34] Wai Keng Teng, Gek Cheng Ngoh, Rozita Yusoff, Mohamed Kheireddine Aroua and Joe Shen Heng. 2015. "Microwave Assisted Solvent-Free Catalytic Transesterification of Glycerol to Glycerol Carbonate." *World Academy of Science*. 9(9) : 1140-1143.
- [35] Godfree P. Fernandes and Ganapati D. Yadav. 2018. "Selective glycerolysis of urea to glycerol carbonate using combustion synthesized magnesium oxide as catalyst." *Catalysis Today*. 309 : 153-160.

- [36] สุภกร บุญยืน, มณฑา มาลัยทอง และอภิสิทธิ์ โพธิ์แก้ว. 2559. “การแปรรูปฝาปิดเปลือกหอยตาวัวเหลือทิ้งสำหรับการผลิตไบโอดีเซล Utilization of Modified Waste Outer Lip of Turbo jourdani (Turbinidae) Shells for Biodiesel Production.” *ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ศูนย์รังสิต*. 24(6) : 898-903.
- [37] Diane Render, Temesgen Samuel, Howard King, Madan Vig, Shaik Jeelani, Ramapuram Jayachandra Babu and Vijaya Rangari. 2016. “Biomaterial-Derived Calcium Carbonate Nanoparticles for Enteric Drug Delivery.” *Journal of Nanomaterials*.
- [38] U. Anjaneyulu, Deepak K. Pattanayak and U. Vijayalakshmi. 2015. “Snail Shell Derived Natural Hydroxyapatite: Effects on NIH-3T3 Cells for Orthopedic Applications.” *Materials and Manufacturing Processes*. 0 : 1–11.
- [39] M. Khachani, A. El Hamidi, M. Halim and S. Arsalane. 2013. “Non-isothermal kinetic and thermodynamic studies of the dehydroxylation process of synthetic calcium hydroxide  $\text{Ca(OH)}_2$ .” *J. Mater. Environ*. 5(2) :615-624.
- [40] Vidhyaa Paroo Indran, Nor Ain Syuhada Zuhaimi, Mohd Asyrak Deraman, Gaanty Pragas Maniam, Mashitah Mohd. Yusoff, Taufiq-Yap Yun Hin and Mohd Hasbi Ab. Rahim. 2014. “An Accelerated Route of Glycerol Carbonate Formation from Glycerol using Waste Boiler Ash as Catalyst.” *The Royal Society of Chemistry*. 1-10.
- [41] V. Calvino-Casilda, G. Mul, J.F. Fernández, F. Rubio-Marcos and M.A. Banares. 2011. “Monitoring the catalytic synthesis of glycerol carbonate by real-time attenuated total reflection FTIR spectroscopy.” *Applied Catalysis A: General*. 409 : 106-112.
- [42] Marilien Van Oudenhove. 2015. “Synthesis of glycerol carbonate from glycerol and urea by using gold-supported catalysts.” *Faculty of Engineering and Architecture Academic*.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### 1. การหาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ในเปลือกไข่

ต้องการหาค่าร้อยละของแคลเซียมคาร์บอเนตในสารตัวอย่างเปลือกไข่ 0.45-0.55 กรัม โดยนำเปลือกไข่ละลายด้วยสารละลายกรด HCl แล้วนำมาไทเทรต (Titrate) แบบย้อนกลับกับสารละลายเบส NaOH



สูตร  $\text{mol} = V \times M$

mol คือ โมลของสารละลาย (mol)

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)

M คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (mol/L)

#### 1.1 หาโมลของ HCl เริ่มต้น

$$\begin{aligned} \text{mol}_{\text{HCl}} &= V_{\text{HCl}} \times M_{\text{HCl}} \\ \text{mol}_{\text{HCl}} &= 0.01 \text{ L} \times 1.0280 \text{ mol/L} \\ &= 0.01028 \text{ mol} \end{aligned}$$

#### 1.2 หาโมลของ HCl ที่เหลือ

$$\begin{aligned} \text{mol}_{\text{HCl}} &= V_{\text{NaOH}} \times M_{\text{NaOH}} \\ \text{mol}_{\text{HCl}} &= 0.0092 \text{ L} \times 0.0965 \text{ mol/L} \\ &= 8.878 \times 10^{-4} \text{ mol} \end{aligned}$$

#### 1.3 หาโมลของ HCl ที่เกิดปฏิกิริยา

$$\text{mol}_{\text{HCl}} = 0.01028 \text{ mol} - 8.878 \times 10^{-4} \text{ mol} = 9.3922 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

#### 1.4 หาโมลของ $\text{CaCO}_3$ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างเปลือกไข่

$$\text{mol}_{\text{CaCO}_3} = \frac{1}{2} \times \text{mol}_{\text{HCl}} \text{ ที่เกิดปฏิกิริยา}$$

$$= \frac{1}{2} \times 9.3922 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$= 4.6961 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะส่งเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 หาร้อยละ  $\text{CaCO}_3$  เปลือกไข่

$$\begin{aligned} \text{สูตร ร้อยละ } \text{CaCO}_3 &= \frac{\text{น้ำหนักของ } \text{CaCO}_3 \text{ ที่คำนวณได้ (g)}}{\text{น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ชั่ง (g)}} \times 100 \\ \text{ร้อยละ } \text{CaCO}_3 &= \frac{4.6961 \times 10^{-3} \text{ mol} \times \frac{100.0869 \text{ g}}{1 \text{ mol}}}{0.4885 \text{ g}} \times 100 \\ &= 96.2166 \% \end{aligned}$$

2. การหาปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) สำหรับการละลายเปลือกไข่ และปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการตกตะกอนแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ 

## 2.1 หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 M

ชั่ง NaOH 40.0021 g ละลายในน้ำกลั่น ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 2000 ml ชั่ง KHP 4.0742 g ละลายด้วยน้ำกลั่น ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml ปิเปตใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 10 ml แล้วนำไปไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตาราง ก-1 แสดงปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต

ขวดที่	ปริมาตร NaOH ที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)
1	4.10
2	4.10
3	3.90
เฉลี่ย	4.03

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของสารละลาย KHP หาได้จาก } \frac{g}{MW} &= \frac{MV}{1000} \\ \frac{4.0742 \text{ g}}{204.22 \text{ g/mol}} &= \frac{M(100\text{ml})}{1000 \text{ mL/L}} \\ M &= 0.1995 \text{ mol/L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของ NaOH หาได้จาก } M_{\text{KHP}} \times V_{\text{KHP}} &= M_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}} \\ (0.1995 \text{ mol/L})(10\text{ml}) &= M_{\text{NaOH}} \times 4.03 \text{ ml} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม ความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.4950 M ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 6 M

เจือจางสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 6 M 12 เท่า และนำมาไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนจาก 2.1

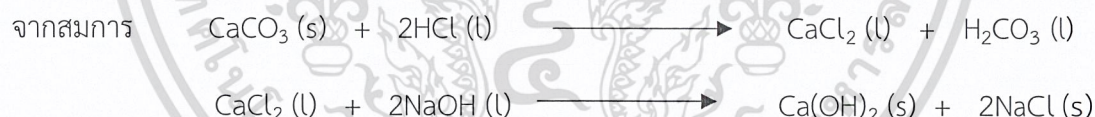
ตาราง ก-2 แสดงปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต

ขวดที่	ปริมาตร NaOH ที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)
1	10.10
2	10.20
3	9.90
เฉลี่ย	10.07

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของ HCl หาได้จาก} \quad M_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}} &= M_{\text{HCl}} \times V_{\text{HCl}} \\ (0.4950 \text{ mol/L})(10.07 \text{ ml}) &= M_{\text{HCl}} \times 10 \text{ ml} \\ M_{\text{HCl}} &= 0.4985 \text{ mol/L} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความเข้มข้นที่แน่นอนของไฮโดรคลอริก เท่ากับ  $0.4985 \text{ M} \times 12 = 5.9820 \text{ M}$

## 2.3 หาปริมาตรสารละลายกรด HCl สำหรับการละลายเปลือกไข่ และปริมาตรสารละลาย NaOH ในการตกตะกอน $\text{Ca(OH)}_2$



$$\begin{aligned} \text{ถ้า CaCO}_3 \text{ จำนวน } 1 \text{ g} \text{ เท่ากับ } \frac{1 \text{ g}}{100.0869 \text{ g/mol}} &= 0.01 \text{ mol} \\ \text{จะต้องใช้ HCl จำนวน } 2 \text{ g} \text{ เท่ากับ } 2 \times 0.01 \text{ mol} &= 0.02 \text{ mol} \end{aligned}$$

จาก HCl เข้มข้น 5.9820 M

$$\text{HCl } 0.02 \text{ mol} \text{ จะต้องใช้ HCl ปริมาตร} = \frac{0.02 \text{ mol}}{5.9820 \text{ mol/L}} = 3.34 \times 10^{-3} \text{ L} \text{ หรือ } 3.34 \text{ ml}$$

ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ใช้ในการละลายแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ )

$$\text{ละลาย CaCO}_3 \quad 1 \text{ g} \quad \text{จะต้องใช้ HCl} \quad 3.34 \text{ ml}$$

$$\text{ละลาย CaCO}_3 \quad 40 \text{ g} \quad \text{จะต้องใช้ HCl} \quad = 3.34 \times 40 = 133.6 \text{ ml}$$

ดังนั้น จะต้องละลาย  $\text{CaCO}_3$  40 g ด้วย HCl เข้มข้น 5.9820 M จำนวน 133.6 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้บทบัญญัติว่าด้วยการคุ้มครองสิทธิในปัญญาประดิษฐ์ที่พัฒนาโดยระบบปัญญาประดิษฐ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้ในการตกตะกอนแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$

$$M_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}} = M_{\text{HCl}} \times V_{\text{HCl}}$$

$$(0.4950 \text{ M})(V_{\text{NaOH}}) = (5.9820 \text{ M})(133.6 \text{ ml})$$

$$V_{\text{NaOH}} = 1614.53 \text{ ml}$$

ดังนั้น จะต้องตกตะกอน  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ด้วย NaOH เข้มข้น 0.4950 M จำนวน 1614.53 ml



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค GC-FID โดยสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังตาราง ข-1

ตาราง ข-1 สภาวะที่ใช้สำหรับการทดลองด้วย GC-FID

Gas Chromatography	
Detector	FID
Column	DB-WAX
- Column material	Polyethylene glycol (PEG)
- Length (m)	30
- Inner diameter (mm)	0.250
- film Thickness (um)	0.25
- Maximum Temperature (°C)	250
Carrier gas	Hydrogen
Carrier gas flow (ml/min)	1.1
Column Temperature	
- Initial (°C)	70 (maintained for 3 min)
- final (°C)	230 (maintained for 17 min)
- Rate (°C/min)	25
Injector Temperature (°C)	250
Detector Temperature (°C)	280
Analyzed compounds	Glycerol, Glycerol carbonate, methanol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. กลีเซอรอลบริสุทธิ์ ความเข้มข้น 99.5%
2. กลีเซอรอลคาร์บอเนต ความเข้มข้น 90%

## การเตรียมสารละลายมาตรฐานและการวิเคราะห์กลีเซอรอล

1. เตรียม Stock. ของกลีเซอรอลที่ ความเข้มข้น 180 g/L ปริมาตร 25 ml ของสารละลายมาตรฐานกลีเซอรอล โดยใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย

## 1.1 น้ำหนักของกลีเซอรอลที่ต้องใช้

สารละลาย 1000 ml ใช้สารมาตรฐาน 180 g

สารละลาย 25 ml ใช้สารมาตรฐาน  $\frac{25 \text{ ml} \times 180 \text{ g}}{1000 \text{ ml}} = 4.5 \text{ g}$

## 1.2 กลีเซอรอลที่ต้องใช้

มีเนื้อสารกลีเซอรอลจริงอยู่ 99.5 g จากสารละลาย 100 g

ต้องการเนื้อสารกลีเซอรอล 4.5 g ต้องใช้สารละลาย  $\frac{4.5 \text{ g} \times 100 \text{ g}}{99.5 \text{ ml}} = 4.52 \text{ g}$

## 1.3 เติมตัวทำละลายเมทานอลจนถึงขีดระดับปริมาตรและเขย่าให้ผสมเข้ากัน

2. เตรียมสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นดังนี้ 20, 40, 80, 120, 140, 160 และ 180 g/L ในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 ml ซึ่งปริมาตรที่คำนวณแสดงดังตาราง ข-2 โดยคำนวณได้จาก

$$\text{สูตร } C_1V_1 = C_2V_2$$

$C_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายก่อนเจือจาง (g/L)

$C_2$  = ความเข้มข้นของสารละลายหลังเจือจาง (g/L)

$V_1$  = ปริมาตรสารละลายก่อนเจือจาง (ml)

$V_2$  = ปริมาตรสารละลายหลังเจือจาง (ml)

- ความเข้มข้น 160 g/L

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$180 \text{ g/L} \times V_1 = 160 \text{ g/L} \times 10$$

$$V_1 = 8.89 \text{ ml}$$

ดูดสารละลายจาก Stock. 180 g/L ปริมาตร 8.89 ml ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความเข้มข้น 140 g/L

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$160 \text{ g/L} \times V_1 = 140 \text{ g/L} \times 10$$

$$V_1 = 8.75 \text{ ml}$$

ดูดสารละลายจาก Stock. 160 g/L ปริมาตร 8.75 ml ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 ml

- ความเข้มข้น 120 g/L

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$140 \text{ g/L} \times V_1 = 120 \text{ g/L} \times 10$$

$$V_1 = 8.57 \text{ ml}$$

ดูดสารละลายจาก Stock. 140 g/L ปริมาตร 8.57 ml ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 ml

- ความเข้มข้น 80 g/L

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$120 \text{ g/L} \times V_1 = 80 \text{ g/L} \times 10$$

$$V_1 = 6.67 \text{ ml}$$

ดูดสารละลายจาก Stock. 120 g/L ปริมาตร 6.67 ml ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 ml

- ความเข้มข้น 40 g/L

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$80 \text{ g/L} \times V_1 = 40 \text{ g/L} \times 10$$

$$V_1 = 5 \text{ ml}$$

ดูดสารละลายจาก Stock. 80 g/L ปริมาตร 5 ml ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 ml

- ความเข้มข้น 20 g/L

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$40 \text{ g/L} \times V_1 = 20 \text{ g/L} \times 10$$

$$V_1 = 5 \text{ ml}$$

ดูดสารละลายจาก Stock. 180 g/L ปริมาตร 5 ml ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-2 ปริมาตรที่ต้องใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 ml

ขวดวัดปริมาตร	ความเข้มข้นสารมาตรฐาน (g/L)	Stock ที่ใช้	ปริมาตรที่ใช้ (ml)
1	20	ใช้จาก stock 40 g/L	5
2	40	ใช้จาก stock 80 g/L	5
3	80	ใช้จาก stock 120 g/L	6.67
4	120	ใช้จาก stock 140 g/L	8.57
5	140	ใช้จาก stock 160 g/L	8.75
6	160	ใช้จาก stock 180 g/L	8.89
7	180	ใช้จาก stock 180 g/L	

2.1 เติมตัวทำละลายเมทานอลให้ถึงขีดระดับของขวดวัดปริมาตรขนาด 10 ml เขย่าผสมให้เข้ากัน

3. วิเคราะห์สารละลายมาตรฐานขวดละ 1 ไมโครลิตรด้วย GC-FID โดยวิเคราะห์ตามสภาวะที่กำหนดไว้ข้างต้น

การเตรียมสารละลายมาตรฐานและการวิเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนเนต

1. เตรียม Stock. ของกลีเซอรอลคาร์บอนเนตที่ความเข้มข้น 840 g/L ปริมาตร 10 ml ของสารละลายมาตรฐานกลีเซอรอลคาร์บอนเนต โดยใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย

1.1 น้ำหนักของกลีเซอรอลคาร์บอนเนตที่ต้องใช้

$$\begin{array}{l} \text{สารละลาย } 1000 \text{ ml} \quad \text{ใช้สารมาตรฐาน } 840 \text{ g} \\ \text{สารละลาย } 10 \text{ ml} \quad \text{ใช้สารมาตรฐาน } \frac{840 \text{ ml} \times 10 \text{ g}}{1000 \text{ ml}} = 8.4 \text{ g} \end{array}$$

1.2 กลีเซอรอลคาร์บอนเนตที่ต้องใช้

มีเนื้อสารกลีเซอรอลคาร์บอนเนตจริงอยู่ 90 g จากสารละลาย 100 g

$$\text{ต้องการเนื้อสารกลีเซอรอลคาร์บอนเนต } 8.4 \text{ g} \quad \text{ต้องใช้สารละลาย } \frac{8.4 \text{ g} \times 100 \text{ g}}{90 \text{ ml}} = 9.33 \text{ g}$$

1.3 เติมตัวทำละลายเมทานอลจนถึงขีดระดับของขวดวัดปริมาตรและเขย่าให้ผสมเข้ากัน

2. เตรียมสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นดังนี้ 40, 200, 360, 520, 680 และ 840 g/L ในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 ml โดยปริมาณที่คำนวณแสดงดังตาราง ข-3 โดยคำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร  $C_1V_1 = C_2V_2$

$C_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายก่อนเจือจาง (g/L)

$C_2$  = ความเข้มข้นของสารละลายหลังเจือจาง (g/L)

$V_1$  = ปริมาตรสารละลายก่อนเจือจาง (ml)

$V_2$  = ปริมาตรสารละลายหลังเจือจาง (ml)

- ความเข้มข้น 680 g/L

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$840 \text{ g/L} \times V_1 = 680 \text{ g/L} \times 10$$

$$V_1 = 8.10 \text{ ml}$$

ดูดสารละลายจาก Stock. 840 g/L ปริมาตร 8.10 ml ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 ml

- ความเข้มข้น 520 g/L

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$680 \text{ g/L} \times V_1 = 520 \text{ g/L} \times 10$$

$$V_1 = 7.65 \text{ ml}$$

ดูดสารละลายจาก Stock. 680 g/L ปริมาตร 7.65 ml ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 ml

- ความเข้มข้น 360 g/L

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$520 \text{ g/L} \times V_1 = 360 \text{ g/L} \times 10$$

$$V_1 = 6.92 \text{ ml}$$

ดูดสารละลายจาก Stock. 520 g/L ปริมาตร 6.92 ml ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 ml

- ความเข้มข้น 200 g/L

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$360 \text{ g/L} \times V_1 = 200 \text{ g/L} \times 10$$

$$V_1 = 5.56 \text{ ml}$$

ดูดสารละลายจาก Stock. 360 g/L ปริมาตร 5.56 ml ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความเข้มข้น 40 g/L

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$200 \text{ g/L} \times V_1 = 40 \text{ g/L} \times 10$$

$$V_1 = 2 \text{ ml}$$

ดูดสารละลายจาก Stock. 200 g/L ปริมาตร 2 ml ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 ml

ตาราง ข-3 ปริมาตรที่ต้องใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 ml

ขวดวัดปริมาตร	ความเข้มข้นสารมาตรฐาน (g/L)	Stock ที่ใช้	ปริมาตรที่ใช้ (ml)
1	40	ใช้จาก stock 200 g/L	2
2	200	ใช้จาก stock 360 g/L	5.56
3	360	ใช้จาก stock 520 g/L	6.92
4	520	ใช้จาก stock 680 g/L	7.65
5	680	ใช้จาก stock 840 g/L	8.10
6	840	ใช้จาก stock 840 g/L	

2.1 เติมตัวทำละลายเมทานอลให้ถึงขีดระดับของขวดวัดปริมาตรขนาด 10 ml เขย่าผสมให้เข้ากัน

3. วิเคราะห์สารละลายมาตรฐานขวดละ 1 ไมโครลิตรด้วย GC-FID โดยวิเคราะห์ตามสภาวะที่กำหนดไว้ข้างต้น

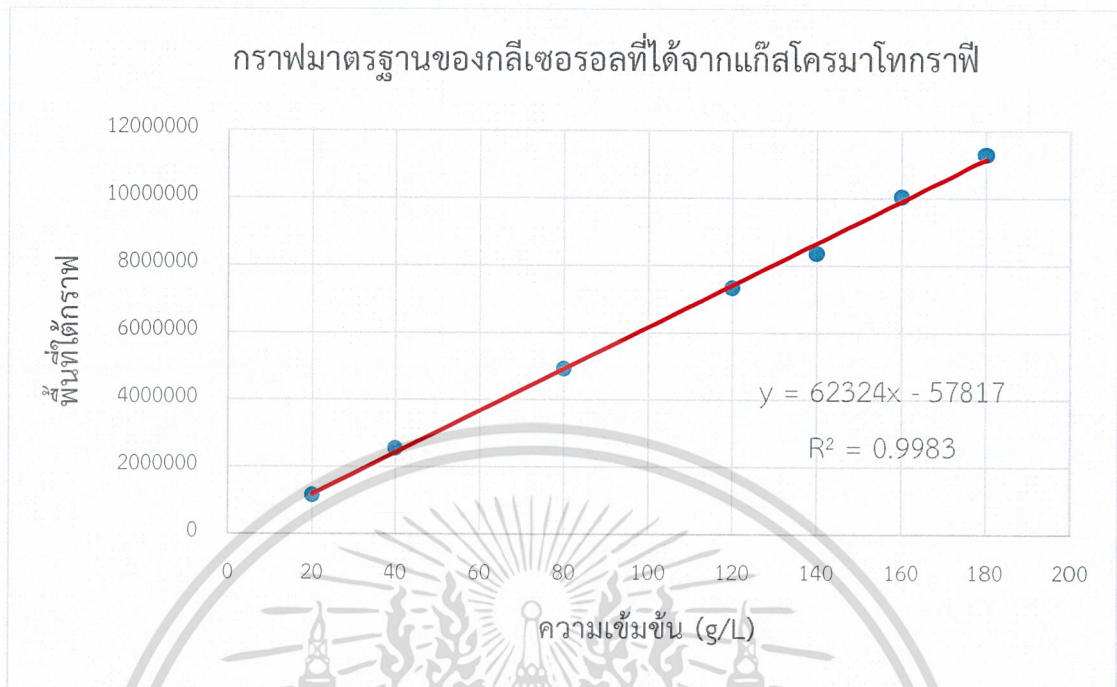
**การเตรียมสารตัวอย่างและการวิเคราะห์**

1. นำสารตัวอย่างที่ได้จากการทำปฏิกิริยามาเจือจางด้วยตัวทำละลายเมทานอล 20 เท่า โดยใช้ปริมาตรสารตัวอย่าง 0.5 ml และเมทานอล 9.5 ml

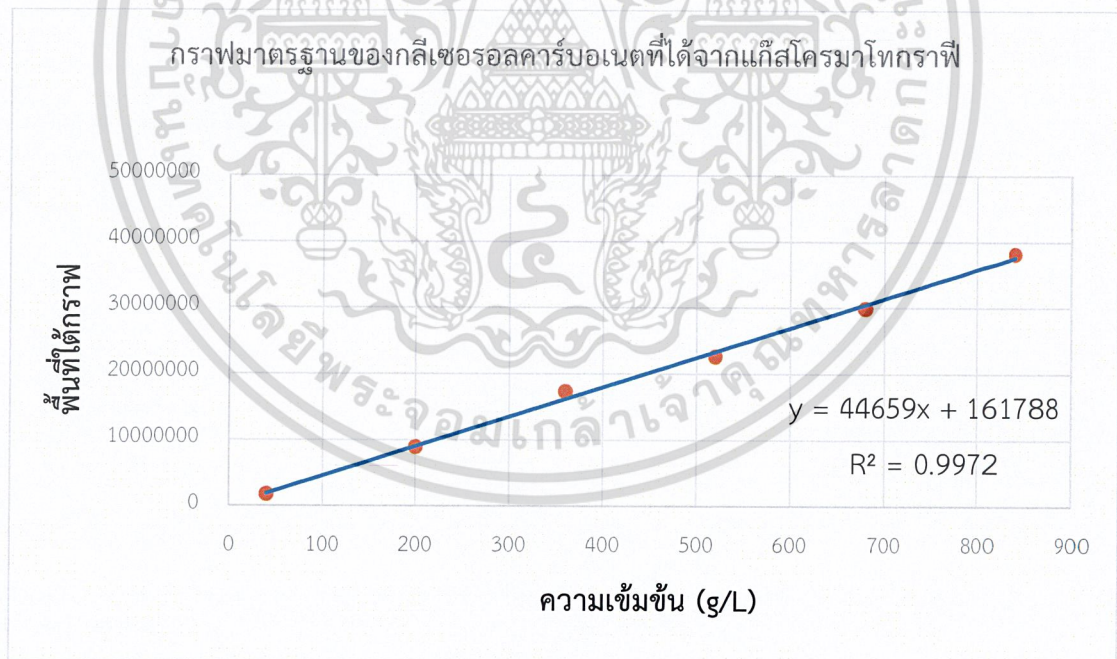
2. วิเคราะห์สารตัวอย่างขวดละ 1 ไมโครลิตรด้วย GC-FID โดยวิเคราะห์ตามสภาวะที่กำหนดไว้ข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ของสารมาตรฐานที่ได้จาก GC-FID



รูป ข-1 ลักษณะกราฟมาตรฐานของกลีเซอรอลที่ได้จากแก๊สโครมาโทกราฟี GC-FID



รูป ข-2 ลักษณะกราฟมาตรฐานของกลีเซอรอลคาร์บอนेटที่ได้จากแก๊สโครมาโทกราฟี GC-FID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

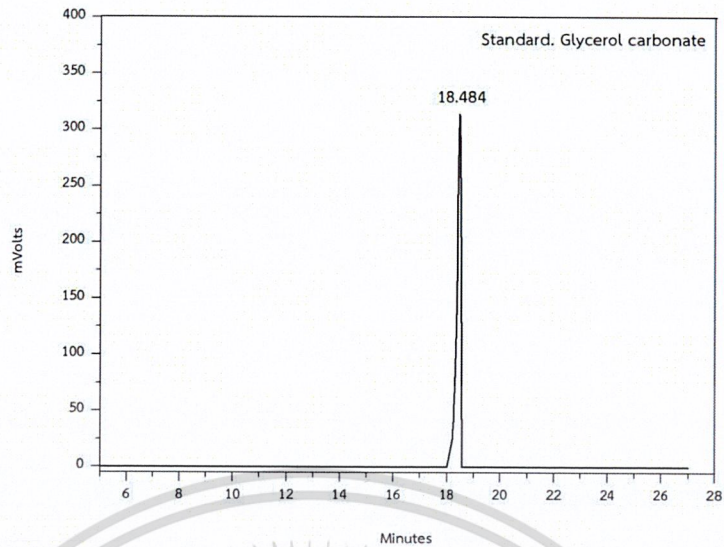
#### เทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

ในการทดลอง 3.3.4 การสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอเนต จะนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลการทดลองด้วย ATR-FTIR เพื่อตรวจสอบเบื้องต้นว่ากลีเซอรอลทำปฏิกิริยากับยูเรียแล้วเปลี่ยนแปลงเป็นกลีเซอรอลคาร์บอเนต โดยดูจากการปรากฏขึ้นของพีคการสั่นแบบยืดหดของหมู่ฟังก์ชัน O-H (O-H stretching) พีคการสั่นแบบยืดหดของหมู่ฟังก์ชัน C=O (C=O stretching) พีคการสั่นแบบบิดงอของหมู่ฟังก์ชัน O-H (O-H bending) และพีคการสั่นแบบยืดหดของหมู่ฟังก์ชัน C-O (C-O stretching) หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ต่อด้วยเทคนิค Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC-FID)

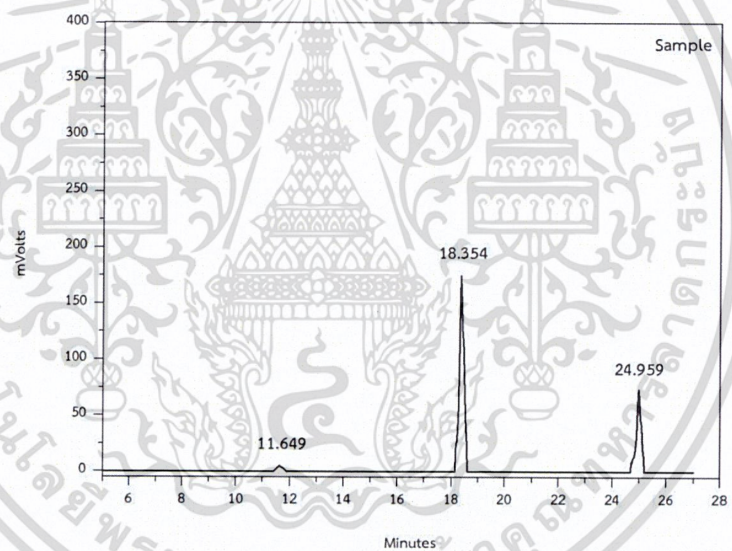
#### เทคนิค Gas Chromatography - Flame Ionization Detector (GC-FID)

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี หลังจากได้ผลการวิเคราะห์นำมาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) เพื่อเปรียบเทียบหาความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่เหลืออยู่และความเข้มข้นของกลีเซอรอลคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ แล้วนำค่าความเข้มข้นที่ได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง (Conversion) เปอร์เซ็นต์การเลือกเกิดของกลีเซอรอลคาร์บอเนต (Selectivity) และเปอร์เซ็นต์ผลผลิต (Yield) แล้วนำไปวิเคราะห์ต่อด้วยเทคนิค Gas Chromatography - Mass Spectrometry (GC-MS)

ผลการวิเคราะห์จากเทคนิค GC-FID สาร Standard, Glycerol carbonate ปรากฏพีคของกลีเซอรอลคาร์บอเนตที่ Retention time เท่ากับ 18.484 min ดังแสดงในรูป ค-1 ส่วนผลของการวิเคราะห์สารตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ (Sample) ปรากฏ 3 พีค ที่ Retention time เท่ากับ 11.649, 18.354 และ 24.959 min ดังแสดงในรูป ค-2 ซึ่งพีคที่ 18.354 min ตรงกับพีคของกลีเซอรอลคาร์บอเนต ส่วนที่ 11.649 และ 24.959 min นั้นอาจเป็นกลีเซอรอลที่เหลืออยู่และกลีเซอรอลยูรีเทน (Glycerol urethane) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Marilien Van Oudenhove [42] ที่ให้ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC ปรากฏพีคของกลีเซอรอลที่เวลาก่อนเกิดพีคของกลีเซอรอลคาร์บอเนต และปรากฏพีคของกลีเซอรอลยูรีเทนที่เวลาหลังจากเกิดพีคกลีเซอรอลคาร์บอเนตในระยะห่างของช่วงเวลาเท่าๆ กัน



รูป ค-1 โครมาโทแกรมของ Standard. Glycerol carbonate ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-FID



รูป ค-2 โครมาโทแกรมของสารตัวอย่างที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-FID

$$\text{การคำนวณ Conversion (\%)} = \frac{C(\text{glycerol เริ่มต้น}) - C(\text{glycerol ที่เหลือ})}{C(\text{glycerol เริ่มต้น})} \times 100$$

C คือ ความเข้มข้นของกลีเซอรอล (mol/L)

$$\text{การคำนวณ Selectivity (\%)} = \frac{\text{โมลของกลีเซอรอลคาร์บอนेटที่เกิดขึ้น}}{\text{โมลของกลีเซอรอลที่ใช้ไป}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ โมลของกลีเซอรอลที่ใช้ไป ให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ Yield (%) = ค่าการเลือกเกิดของกลีเซอรอลคาร์บอนเนต x ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง

### เทคนิค Gas Chromatography - Mass Spectrometry (GC-MS)

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-FID ทำให้ทราบสถานะของการทดลองที่ทำให้ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล (Conversion) ค่าร้อยละการเลือกเกิดของกลีเซอรอลคาร์บอนเนต (Selectivity) และค่าร้อยละผลผลิต (Yield) สูงสุด แล้วนำสารตัวอย่างที่ได้จากสถานะดังกล่าวมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) เพื่อตรวจสอบยืนยัน Fingerprint ของเลขมวล (Mass number) ของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานกลีเซอรอลคาร์บอนเนต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้