

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระยะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่เหลือทิ้งสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่ง โดยในส่วนแรกเป็นการศึกษาระยะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ด้วยวิธีเผาแคลไซน์ ซึ่งมีการศึกษาอิทธิพลของสองตัวแปรคือ อัตราการให้ความร้อน (0.5-30 องศาเซลเซียสต่อนาที) และอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ (200-1000 องศาเซลเซียส) รวมถึงได้มีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ได้แก่ เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค และเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยวิธีบีอีที สำหรับในส่วนที่สองเป็นการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและเปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ได้ซึ่งดำเนินการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบกะ โดยมีการศึกษาถึงอิทธิพลที่สำคัญต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งในช่วง 0.25-3.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า และช่วง 1.0-4.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ได้ รวมถึงการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำด้วย ในการวิเคราะห์และประเมินผลขั้นต้นนั้นพิจารณาจากปริมาณสารเมทิลเอสเทอร์หรือสารเมทิลริซิโนเลเอต (methyl ricinoleate) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโทกราฟี ซึ่งทำให้ทราบถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์จากน้ำมันละหุ่งภายใต้สภาวะการทดลองการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทเมตรี โดยผลที่ได้จากการศึกษาแสดงดังต่อไปนี้

4.1 ผลวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางกายภาพและทางเคมีของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาคลัสโซน ณ สถานะอัตราการให้ความร้อนต่างๆ

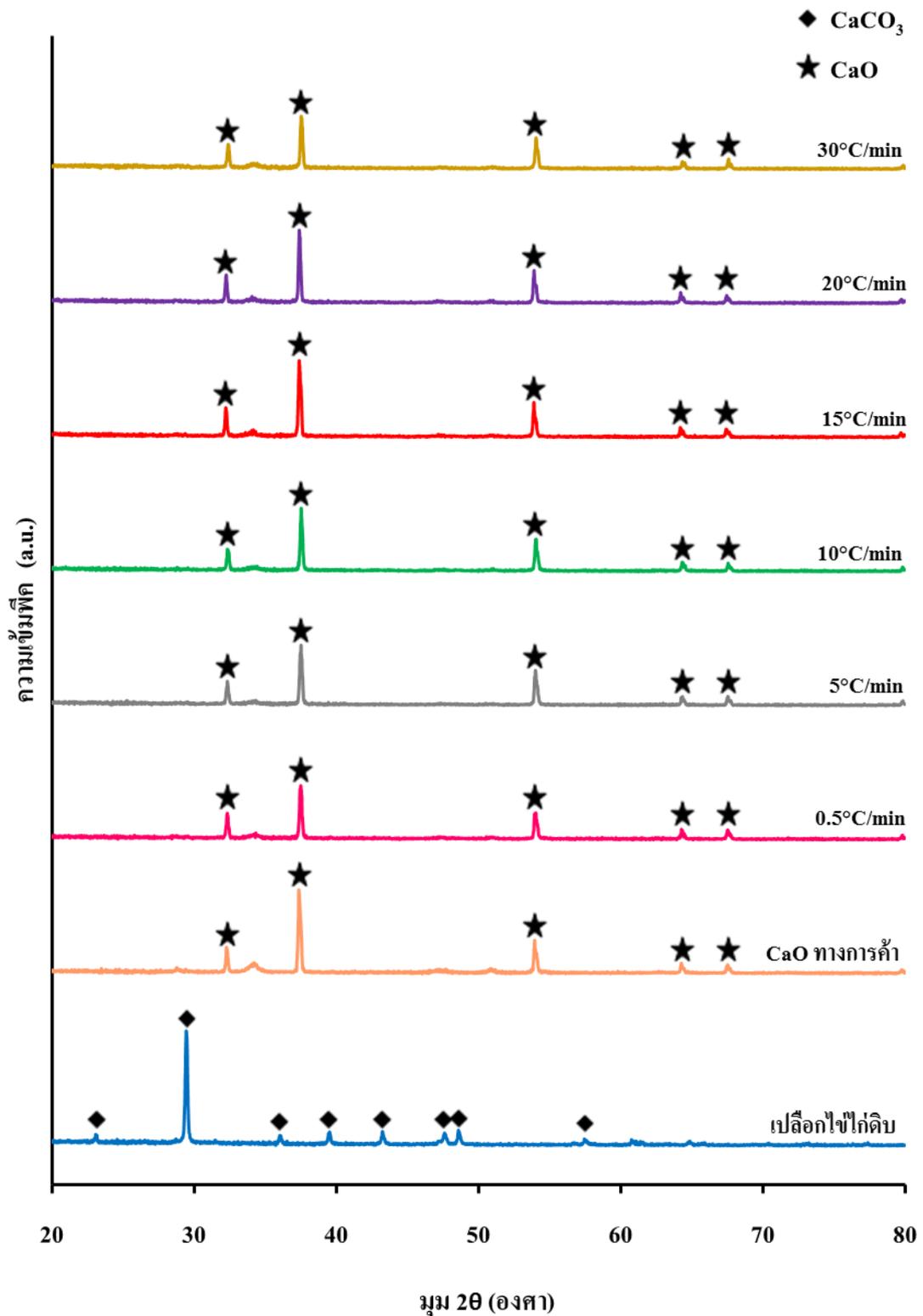
4.1.1 ผลวิเคราะห์วัฏภาคโครงสร้างผลึกและองค์ประกอบทางเคมี

ผลวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เพื่อศึกษาวัฏภาคโครงสร้างผลึกและองค์ประกอบทางเคมี แสดงดังรูป 4.1 โดยศึกษาสถานะการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกไข่ไก่ด้วยวิธีเผาคลัสโซนที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆ ได้แก่ 0.5 5 10 15 20 และ 30 องศาเซลเซียสต่อนาที ตามลำดับ ภายใต้อุณหภูมิเผาคลัสโซนคงที่เท่ากับ 900 องศาเซลเซียส รวมถึงทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับเปลือกไข่ไก่ดิบและแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของมุม 2θ และความเข้มของพีก (peak intensity) ซึ่งพบลักษณะผลึกของเปลือกไข่ไก่ดิบปรากฏพีกหลัก (พีกสูงสุด) ที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 29.5 องศา ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแคลเซียมคาร์บอเนต (เปรียบเทียบด้วยฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 01-085-1108) และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กับเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาคลัสโซนที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆ (เปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ได้) พบพีกหลักที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 32.3 37.5 และ 54.0 องศา ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแคลเซียมออกไซด์ (เปรียบเทียบด้วยฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 01-077-2376) อีกทั้งจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการให้อุณหภูมิความร้อนต่างๆ ยังสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าด้วย

จากผลวิเคราะห์ข้างต้นแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคโครงสร้างผลึกและองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการให้อุณหภูมิความร้อนต่างๆ เปรียบเทียบกับเปลือกไข่ไก่ดิบ ซึ่งจากรูป 4.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการให้อุณหภูมิความร้อนตั้งแต่ 0.5-30 องศาเซลเซียสต่อนาที จะเกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึกทำให้วัฏภาคผลึกและองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการให้อุณหภูมิความร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเกิดการเปลี่ยนรูปผลึกจากแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของเปลือกไข่ดิบไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และเมื่อวิเคราะห์ความเป็นผลึกและขนาดผลึกของเปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆ โดยความเป็นผลึกพิจารณาจากความสูงของพีกหลักที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 37.3 องศา ของผลึกแคลเซียมออกไซด์เปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า ซึ่งคำนวณออกมาเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสัมพัทธ์ (percentage of relative crystallinity) ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ที่

อัตราการให้ความร้อนต่างๆ เทียบกับแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า เมื่อพิจารณาความเป็นผลึกของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาคลอรีนในตาราง 4.1 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการให้ความร้อนจาก 0.5 เป็น 15 องศาเซลเซียสต่อนาที ความเป็นผลึกสัมพัทธ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 64.46 เป็น 91.80 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเพิ่มอัตราการให้ความร้อนจาก 15 เป็น 30 องศาเซลเซียสต่อนาที ความเป็นผลึกสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงจาก 91.80 เป็น 63.33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งที่อัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียส มีความเป็นผลึกสัมพัทธ์สูงที่สุด และในส่วนของขนาดผลึกพิจารณาความกว้างของพีกที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูง (full width at half maximum, FWHM) พบว่าเมื่อใช้สมการของ Scherrer (ภาคผนวก ข) สามารถคำนวณขนาดผลึกของสารตัวอย่างได้ เมื่อพิจารณาขนาดผลึกจากพีกสูงสุดของแคลเซียมออกไซด์ที่ตำแหน่งมุม 2 θ เท่ากับ 37.5 องศา พบว่าเปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที มีขนาดผลึกเล็กที่สุดเท่ากับ 35.06 นาโนเมตร และที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที มีขนาดผลึกใหญ่ที่สุดเท่ากับ 64.71 นาโนเมตร มากไปกว่านั้นยังพบว่าเปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที มีขนาดของผลึกใกล้เคียงกับแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า โดยที่แคลเซียมออกไซด์ทางการค้ามีขนาดผลึกเท่ากับ 34.95 นาโนเมตร ดังนั้นจากผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้นี้จึงสามารถสรุปได้ว่าเปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเปลือกไข่ไก่ดิบ แคลเซียมออกไซด์ทางการคั่ว และเปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ได้ผ่านการเผาแคลไซต์ ณ สภาวะอัตราการให้ความร้อนต่างๆ

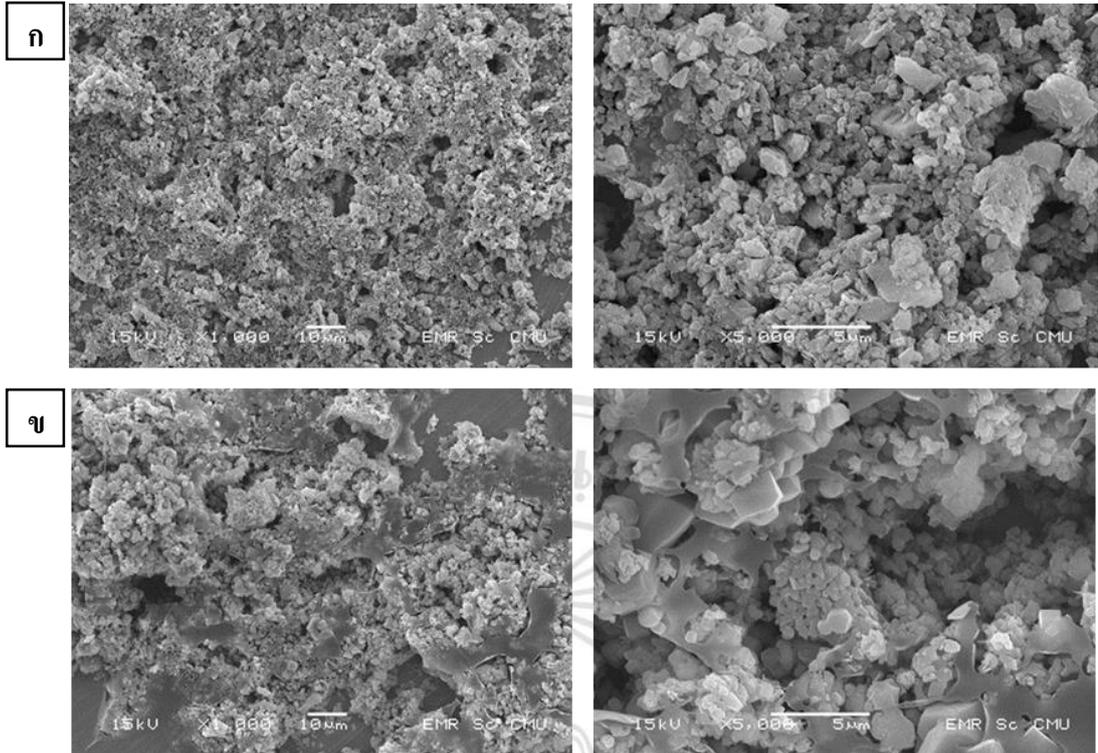
ตาราง 4.1 ค่า FWHM ขนาดผลึก และความเป็นผลึกสัมพัทธ์ของเปลือกไขไก่ที่ผ่านการเผาด้วยไชนัน สภาวะอัตราการให้ความร้อนต่างๆ

อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียสต่อนาที)	ความสูง ของพีคหลัก (a.u.)	FWHM	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)	ความเป็นผลึก สัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)
0.5	283	0.20	42.07	64.46
5	316	0.21	40.07	71.98
10	332	0.18	46.75	75.63
15	403	0.24	35.06	91.80
20	383	0.13	64.71	87.24
30	278	0.20	42.08	63.33

หมายเหตุ : แคลเซียมออกไซด์ทางการค้า ความสูงของพีคหลัก 439 a.u.; FWHM 0.22; ขนาดผลึก 39.95 นาโนเมตร

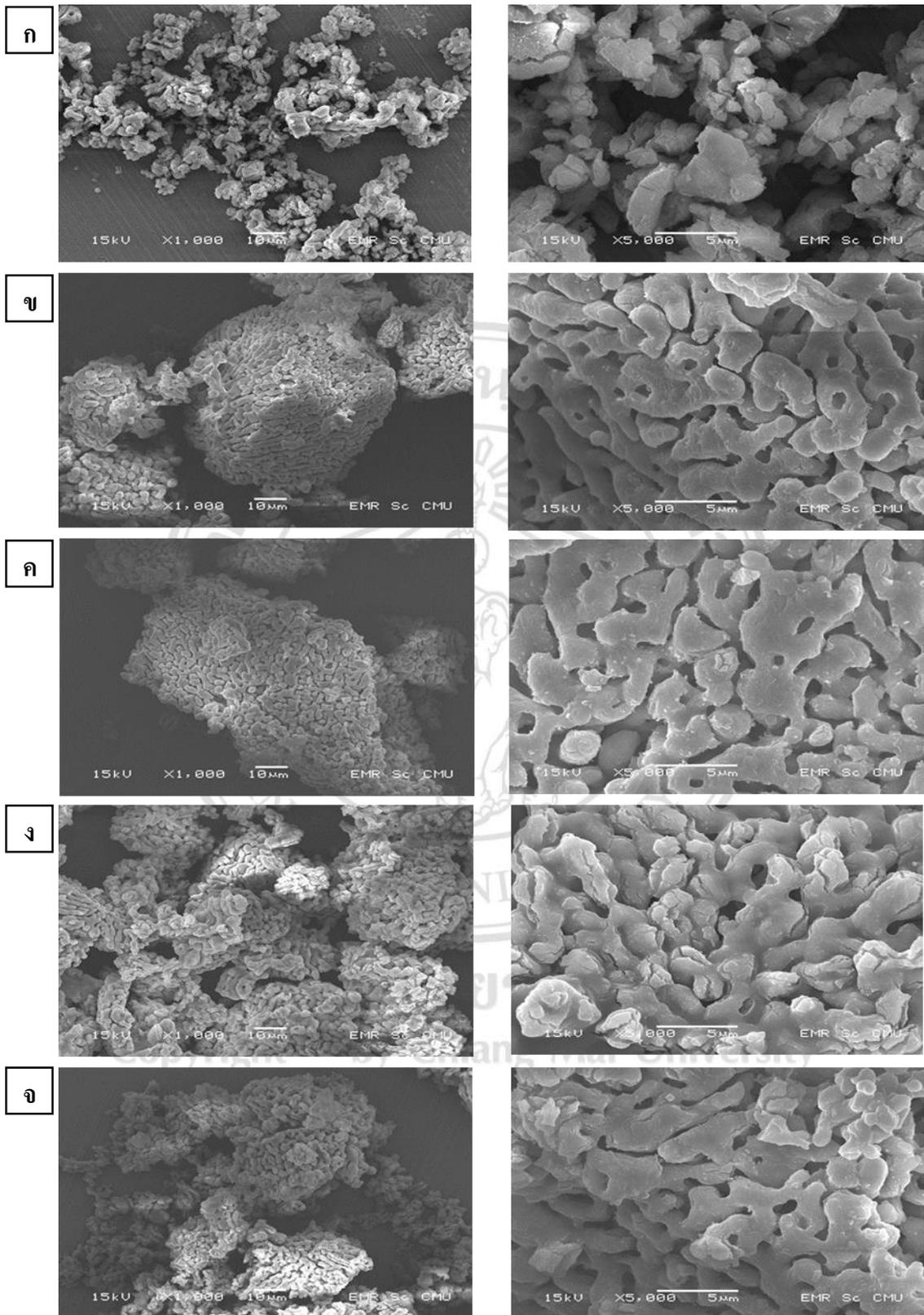
4.1.2 ผลวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว

ผลวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเปลือกไขไก่ดิบ แคลเซียมออกไซด์ทางการค้า และเปลือกไขไก่ที่สังเคราะห์ได้ที่สภาวะอัตราการให้ความร้อนต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 2 ขนาดคือ 1000 และ 5000 เท่า แสดงดังรูป 4.2 และ 4.3 โดยจากรูป 4.2 ซึ่งแสดงลักษณะพื้นผิวของเปลือกไขไก่ดิบและแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า พบว่าอนุภาคของเปลือกไขไก่ดิบมีลักษณะที่มีการเกาะกลุ่มกันแน่นและมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ส่วนแคลเซียมออกไซด์ทางการค้ามีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็กใหญ่ปนกันและมีลักษณะพื้นผิวที่มีช่องว่างและเป็นรูพรุน และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเปลือกไขไก่ที่ผ่านการเผาด้วยไชนันที่อัตราการให้ความร้อน 0.5 10 15 20 30 องศาเซลเซียสต่อนาที ดังรูป 4.3 พบว่าที่อัตราการให้ความร้อน 0.5 องศาเซลเซียสต่อนาที อนุภาคเริ่มมีการรวมตัวเชื่อมติดกัน และเมื่อเพิ่มอัตราการให้ความร้อนตั้งแต่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีขึ้นไป อนุภาคของเปลือกไขไก่มีลักษณะพื้นผิวที่เกิดจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กรวมตัวเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างคล้ายรังปลวก (termite nest-like structure) มีรูปร่างมนหรือคล้ายคัมเบล (dumbbell-like) ชัดเจน [3] และยังสังเกตได้ว่าลักษณะพื้นผิวมีรูพรุน มีความขรุขระ และเกิดรอยหยักบริเวณพื้นผิว



รูป 4.2 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงลักษณะพื้นผิวของ (ก) เปลือกไข่ไก่ดิบ และ (ข) แคลเซียมออกไซด์ทางการค้า ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปซ้าย) และ 5000 เท่า (รูปขวา)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved



รูป 4.3 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงลักษณะพื้นผิวของเปลือกไขไก่อที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราการให้ความร้อน (ก) 0.5°C/min (ข) 10°C/min (ค) 15°C/min (ง) 20°C/min และ (จ) 30°C/min ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปซ้าย) และ 5000 เท่า (รูปขวา)

4.2 ผลวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางกายภาพและทางเคมีของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซชน์ ณ สภาวะอุณหภูมิอัลไซชน์ต่างๆ

4.2.1 ผลวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปของเปลือกไข่ไก่

ผลวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซชน์ที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังตาราง 4.2 และรูป 4.4 โดยพบว่าเมื่อเผาอัลไซชน์เปลือกไข่ไก่ที่อุณหภูมิสูงเปลือกไข่ไก่มิ่ลักษณะเป็นสีขาวและมีความอ่อนตัว ลักษณะผงของเปลือกไข่ไก่เมื่อสัมผัสจะพบว่าเป็นผงละเอียด มีความเป็นเนื้อเดียวกันและไม่ม่ก่ลื่น ซึ่งจะเห็นได้ว่าการให้ความร้อนส่งผลทำให้สีและความอ่อนตัวของเปลือกไข่ไก่เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนที่สูงนั้นเปลือกไข่ไก่จะเปลี่ยนจากสีน้ำตาลอ่อนเป็นสีขาวและมีความอ่อนตัวมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดการสลายตัวจากแคลเซียมคาร์บอเนตไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์วัฏภาคผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และเมื่อพิจารณาร่วมกับภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซชน์ที่อุณหภูมิสูง พบว่าขนาดอนุภาคของเปลือกไข่ไก่มิ่ขนาดเล็กและมีความพรุนสูง จึงมีลักษณะเปราะทำให้สามารถบดได้ง่ายกว่าเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซชน์ที่อุณหภูมิต่ำ และการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงยังส่งผลให้เปลือกไข่ไก่มิ่ม่ก่ลื่นเหม็นด้วย ทั้งนี้คาดว่าอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากมีการระเหยของน้ำและการสลายตัวขององค์ประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่ในเปลือกไข่ไก่ออกจนหมด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.2 ลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาคลอรีนที่อุณหภูมิในช่วง 200-1000 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิเผาคลอรีน (องศาเซลเซียส)	ลักษณะทางกายภาพ		
	สี	กลิ่น	ความอ่อนตัว
200	น้ำตาลอ่อน	มีกลิ่นเหม็น	แข็งเล็กน้อย
300	น้ำตาลอ่อน	มีกลิ่นเหม็น	แข็งเล็กน้อย
500	น้ำตาลเข้ม	มีกลิ่นเหม็น	แข็งเล็กน้อย
600	เทาเข้ม	มีกลิ่นเล็กน้อย	อ่อนตัว
700	เทาเข้ม	มีกลิ่นเล็กน้อย	อ่อนตัว
800	เทาอ่อน	ไม่มีกลิ่น	อ่อนตัว
900	ขาว	ไม่มีกลิ่น	อ่อนตัว
1000	ขาว	ไม่มีกลิ่น	อ่อนตัว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



200 อนุภาคเซลเซียส



300 อนุภาคเซลเซียส



500 อนุภาคเซลเซียส



600 อนุภาคเซลเซียส



700 อนุภาคเซลเซียส



800 อนุภาคเซลเซียส



900 อนุภาคเซลเซียส

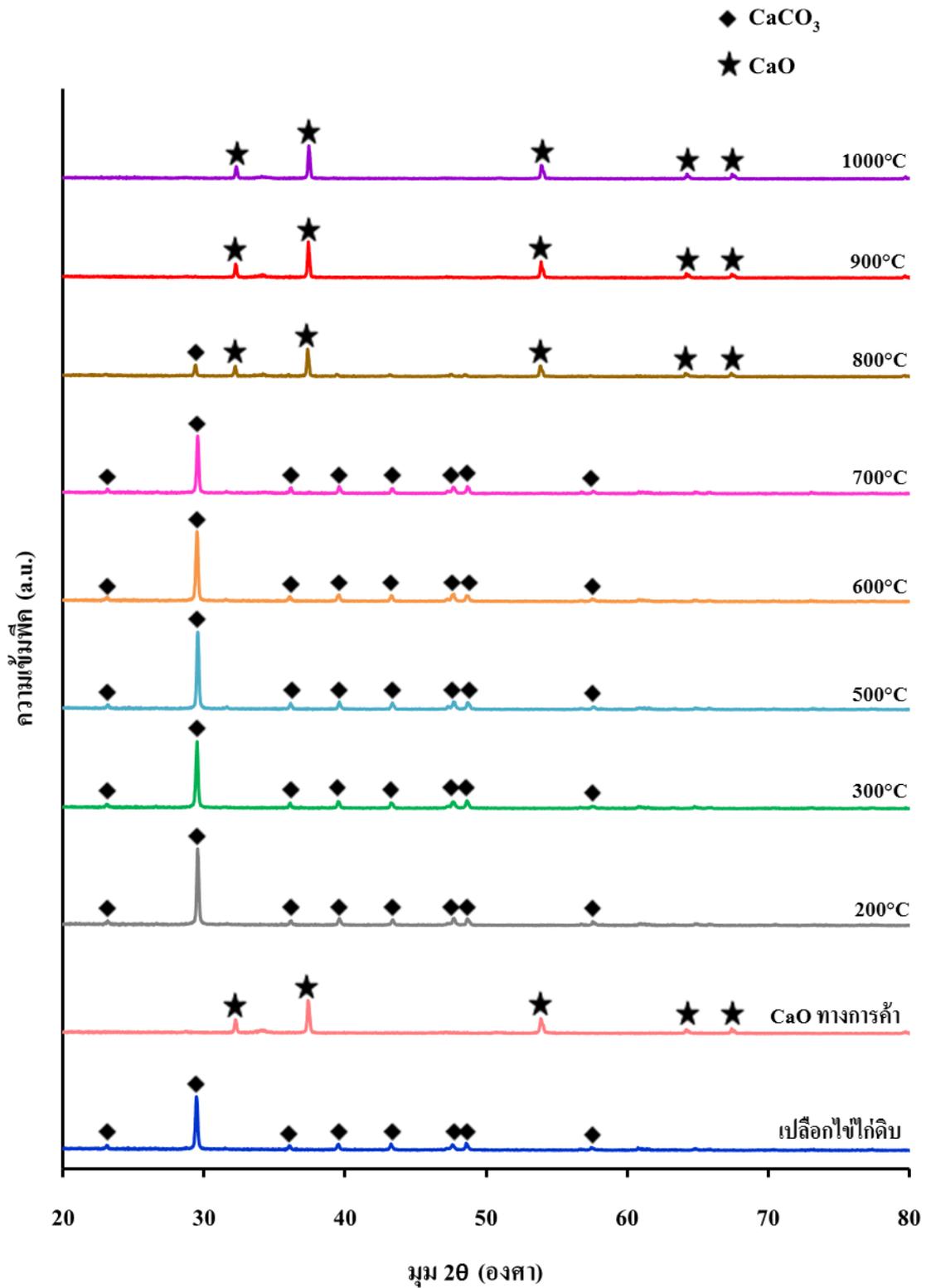


1000 อนุภาคเซลเซียส

รูป 4.4 เปลือกไขไก่ที่ผ่านการเผาคลื่นที่อุณหภูมิต่างๆ

4.2.2 ผลวิเคราะห์วัฏภาคโครงสร้างผลึกและองค์ประกอบทางเคมี

ผลวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เพื่อวิเคราะห์วัฏภาคโครงสร้างผลึกและองค์ประกอบทางเคมีแสดงดังรูป 4.5 โดยศึกษาสภาวะของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาแคล์ไซน์ที่อุณหภูมิ 200 300 500 600 700 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อนคงที่เท่ากับ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที รวมถึงทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับเปลือกไข่ไก่ดิบและแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า โดยเมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเปลือกไข่ไก่ดิบจะพบเฉพาะโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นหลัก โดยพบพีคหลักที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 29.5 องศา (เปรียบเทียบกับฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 01-085-1108) และเมื่อเผาให้ความร้อนเปลือกไข่ไก่ที่อุณหภูมิ 200-700 องศาเซลเซียส ปรากฏว่ายังคงพบโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นพีคหลัก โดยพบพีคหลักที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 29.5 องศา (เปรียบเทียบกับฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 01-085-1108) ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งพีคของเปลือกไข่ดิบ แต่เมื่อมีการเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 800-1000 องศาเซลเซียส จะพบพีคของแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงเล็กน้อย โดยตรวจพบพีคหลักที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 32.3 37.5 และ 54.0 องศา ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแคลเซียมออกไซด์ (เปรียบเทียบกับฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 01-077-2376) และสอดคล้องกับตำแหน่งพีคแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าด้วย ผลที่ได้นี้สามารถอธิบายได้คือเมื่อมีการให้ความร้อนสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส เปลือกไข่ไก่ที่อยู่ในรูปผลึกแคล์ไซน์ของแคลเซียมคาร์บอเนตจะเกิดการสลายตัวเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแคลเซียมออกไซด์ [3,4] และจากการวิเคราะห์ค่าความเป็นผลึกและขนาดผลึก (อ้างอิงจากสมการของ Scherrer) ของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาแคล์ไซน์ในช่วงอุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียส พบว่าเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาแคล์ไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีความเป็นผลึกสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 91.80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับแคลเซียมออกไซด์เกรดทางการค้าและมีขนาดผลึกเล็กที่สุดเท่ากับ 35.06 นาโนเมตร โดยมีขนาดที่ใกล้เคียงกับแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า (34.95 นาโนเมตร) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาแคล์ไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ที่สภาวะอัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เป็นสภาวะเหมาะสมที่สุดสำหรับการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่เหลือทิ้ง



รูป 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ได้ผ่านการเผาที่สภาวะอุณหภูมิที่ต่างกัน

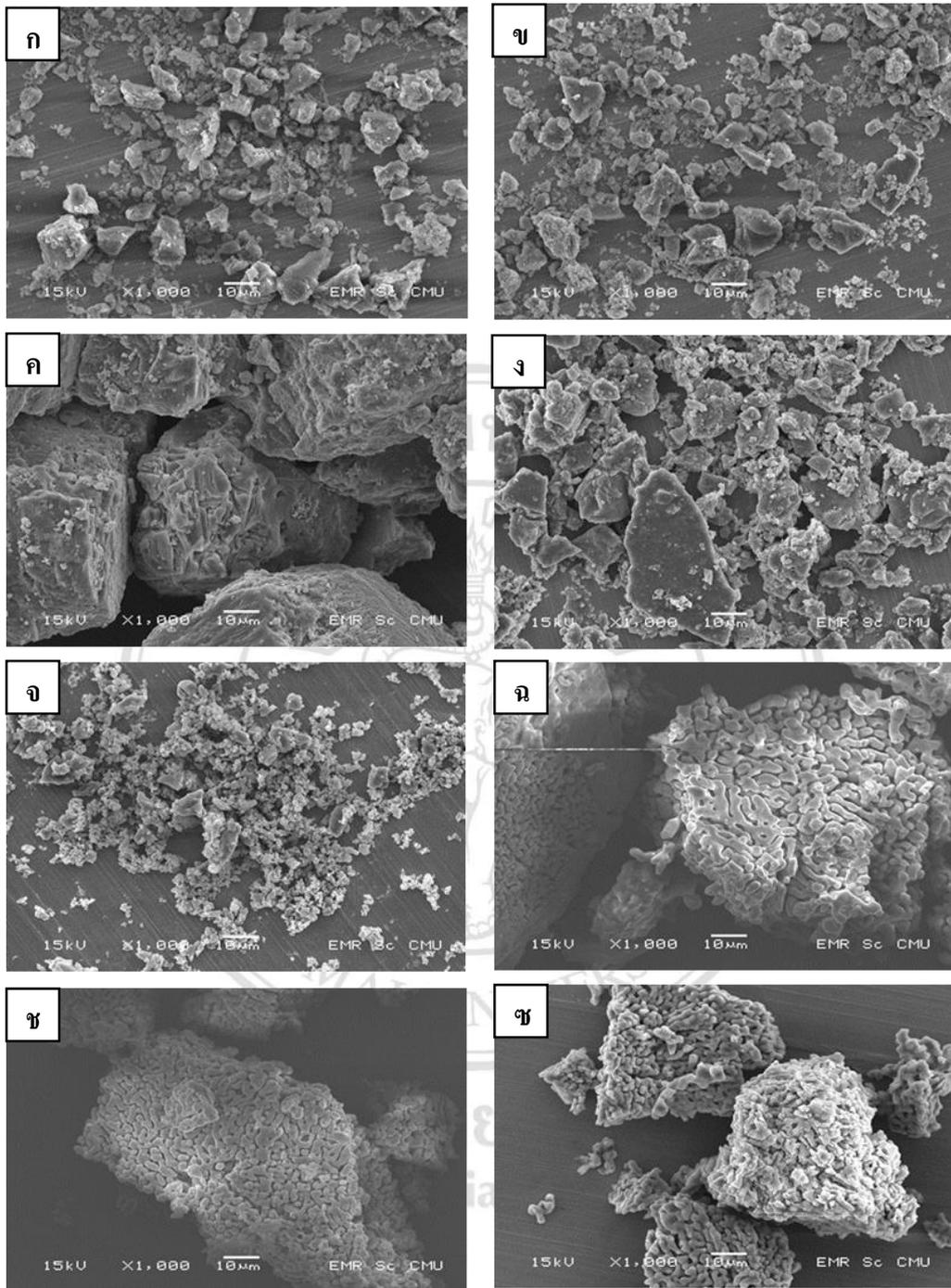
ตาราง 4.3 ค่า FWHM ขนาดผลึกและความเป็นผลึกสัมพัทธ์ของเปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ได้ ณ สภาวะอุณหภูมิการเผาไหม้ 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิการเผาไหม้ (องศาเซลเซียส)	ความสูง ของพีคหลัก (a.u.)	FWHM	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)	ความเป็นผลึก สัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)
800	311	0.17	49.47	70.84
900	403	0.24	35.06	91.80
1000	371	0.18	46.74	84.51

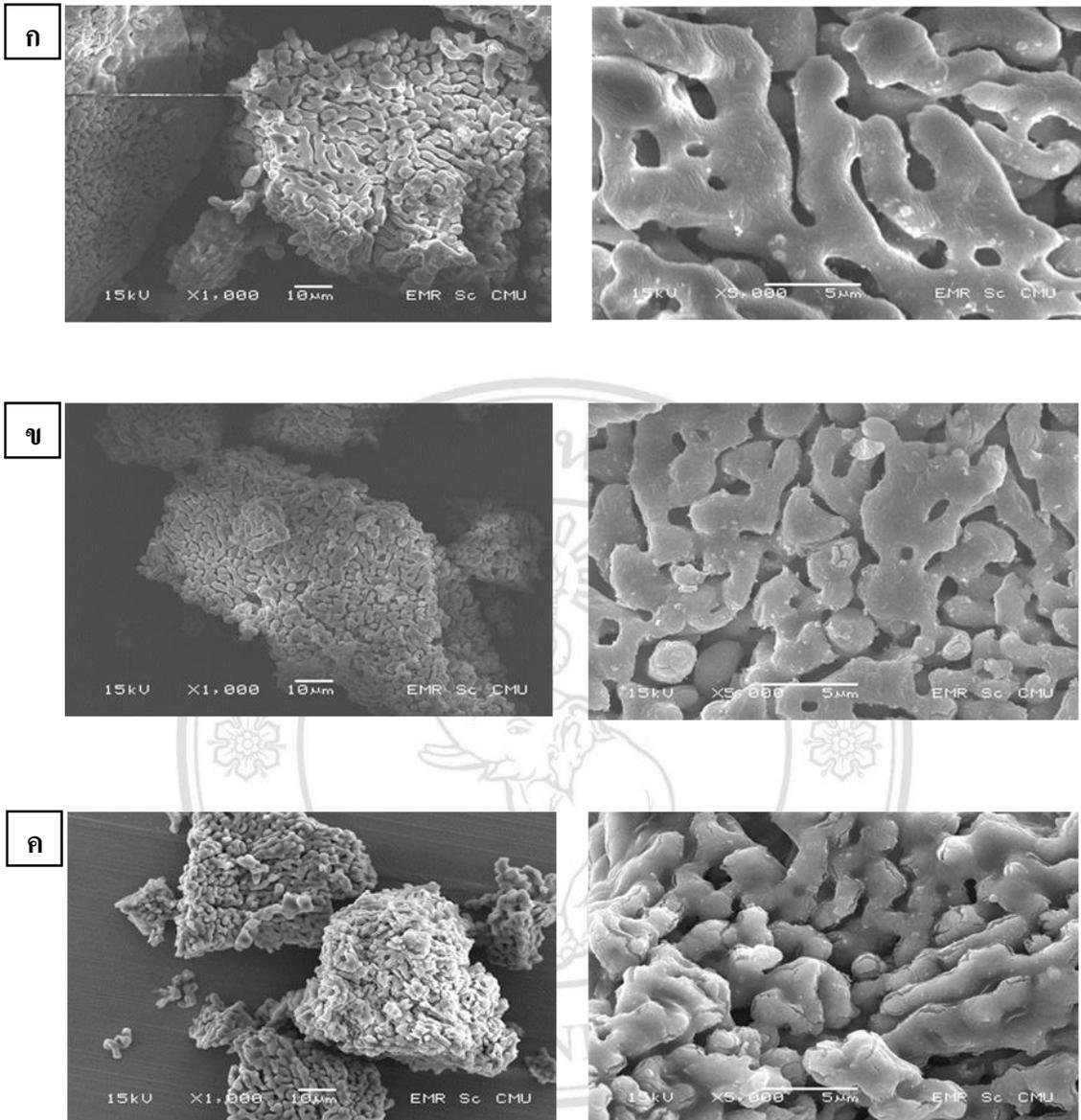
หมายเหตุ : แคลเซียมออกไซด์ทางการค้าความสูงของพีคหลัก 439 a.u.; FWHM 0.22; ขนาดผลึก 39.95 นาโนเมตร

4.2.3 ผลวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว

ผลวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ได้ผ่านการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 200 300 500 600 700 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงดังรูป 4.6 โดยจากภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาไหม้ที่อุณหภูมิในช่วง 200-700 องศาเซลเซียส มีลักษณะกายภาพเป็นเกล็ด ผิวขรุขระ มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ และมีโครงสร้างเกาะกลุ่มกัน โดยเมื่อเปรียบเทียบกับเปลือกไข่ไก่ดิบ (รูป 4.2ก) จะพบว่าเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส มีขนาดและรูปร่างที่เหมือนกันกับเปลือกไข่ไก่ดิบ ซึ่งเหมือนกันกับงานวิจัยของ Wei และคณะ [4] อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาไหม้ในช่วงอุณหภูมิสูงตั้งแต่ 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส ดังรูป 4.7 ที่กำลังขยาย 2 ขนาดคือ 1000 และ 5000 เท่า สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนว่าเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส จะมีขนาดอนุภาคเล็กลงและมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอนมากขึ้น โดยมีรูปทรงมีลักษณะคล้ายคัมเบลร่วมกับแบบแท่ง (rod-dumbbell-like) รวมตัวเชื่อมต่อกันสร้างเป็นโครงสร้างแบบคล้ายรังปลวก (termite nest-like structure) [3] รวมถึงมีลักษณะโครงสร้างเป็นรูปพวงกระจายทั่วบริเวณของพื้นผิวและมองเห็นรอยหยักที่บริเวณพื้นที่ผิว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเปลือกไข่นี้เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี [4] โดยองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกไข่ไก่ดิบเกิดการสลายตัวออกไปจากโครงสร้าง



รูป 4.6 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงลักษณะพื้นผิวของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ (ก) 200°C (ข) 300°C (ค) 500°C (ง) 600°C (จ) 700°C (ฉ) 800°C (ช) 900°C และ (ซ) 1000°C ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูป 4.7 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงลักษณะพื้นผิวของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ (ก) 800°C (ข) 900°C และ (ค) 1000°C ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปซ้าย) และ 5000 เท่า (รูปขวา)

4.2.4 ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน

ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรวมของรูพรุนอนุภาคเปลือกไข่ไก่ดิบ เปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซรน์ที่ต่างๆ และแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า แสดงดังตาราง 4.4 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเปลือกไข่ไก่ดิบและเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซรน์ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเปลือกไข่ไก่ดิบมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 2.47 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรวมของรูพรุนเท่ากับ 0.0169 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม แต่เมื่อทำการเผาอัลไซรน์เปลือกไข่ไก่ที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 200 ถึง 1000 องศาเซลเซียส พบว่าเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซรน์มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรวมของรูพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบจากเปลือกไข่ไก่ดิบ โดยเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซรน์ที่อุณหภูมิในช่วง 200-1000 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มโดยรวมของทั้งพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรวมของรูพรุนเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาอัลไซรน์สูงขึ้น และมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 2.84-19.72 ตารางเมตรต่อกรัม และค่าปริมาตรรวมของรูพรุนอยู่ในช่วง 0.0169-0.0940 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรวมของรูพรุนเมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาอัลไซรน์สูงนั้นมีสาเหตุเนื่องมาจากการที่อุณหภูมิในการเผาอัลไซรน์เพิ่มขึ้นได้ส่งผลทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตเกิดการสลายตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์ และเกิดการคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากเมทริกซ์เปลือกไข่ไก่พร้อมกับมีการระเหยของสารอินทรีย์ในเปลือกไข่ไก่ จึงส่งผลทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นและยังช่วยให้มีความพรุนสูงขึ้น [34] โดยเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซรน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส (สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์) มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 17.66 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรวมของรูพรุน 0.0494 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าแล้วพบว่าแคลเซียมออกไซด์ทางการค้ามีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าแต่มีปริมาตรรวมของรูพรุนมากกว่าเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซรน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส (แคลเซียมออกไซด์ทางการค้ามีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 12.13 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรวมของรูพรุน 0.0940 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)

ตาราง 4.4 พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรวมของรูพรุนของอนุภาคเปลือกไข่ไก่ดิบ เปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาตัดไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ และแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า

สารตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม, m ² /g)	ปริมาตรรวมของรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม, cm ³ /g)
เปลือกไข่ไก่ดิบ	2.47	0.0169
เปลือกไข่ไก่เผาตัดไซน์ที่อุณหภูมิ 200°C	2.84	0.0169
เปลือกไข่ไก่เผาตัดไซน์ที่อุณหภูมิ 300°C	8.71	0.0319
เปลือกไข่ไก่เผาตัดไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C	6.80	0.0216
เปลือกไข่ไก่เผาตัดไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C	12.38	0.0228
เปลือกไข่ไก่เผาตัดไซน์ที่อุณหภูมิ 700°C	10.56	0.0206
เปลือกไข่ไก่เผาตัดไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C	10.54	0.0249
เปลือกไข่ไก่เผาตัดไซน์ที่อุณหภูมิ 900°C	17.66	0.0494
เปลือกไข่ไก่เผาตัดไซน์ที่อุณหภูมิ 1000°C	19.72	0.0460
แคลเซียมออกไซด์ทางการค้า	12.13	0.0940

4.2.5 ผลวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

ตาราง 4.5 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์อนุภาคของเปลือกไข่ไก่ดิบ เปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซน์ที่อุณหภูมิ 200 300 500 600 700 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส และแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคโดยอาศัยการกระเจิงและการเลี้ยวเบนของเลเซอร์ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเปลือกไข่ไก่ดิบและเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ เปลือกไข่ไก่ดิบมีขนาดอนุภาคลดลงเมื่อถูกนำไปเผาอัลไซน์ โดยขนาดอนุภาคของเปลือกไข่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดมากขึ้นที่อุณหภูมิในการเผาอัลไซน์เพิ่มขึ้น ซึ่งขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่าลดลงจาก 47.05 ไปเป็น 13.45 ไมโครเมตร เมื่ออุณหภูมิเผาอัลไซน์เพิ่มขึ้นจาก 200 ไปเป็น 1000 องศาเซลเซียส โดยเป็นผลเนื่องมาจากความร้อนจากการเผาอัลไซน์ทำให้สารอินทรีย์ที่อยู่ในเปลือกไข่และโครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตสลายตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงส่งผลให้อนุภาคมีขนาดลดลง ซึ่งก็สอดคล้องกับผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซน์ และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสกับแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า พบว่าเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 16.77 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า (ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 19.83 ไมโครเมตร)

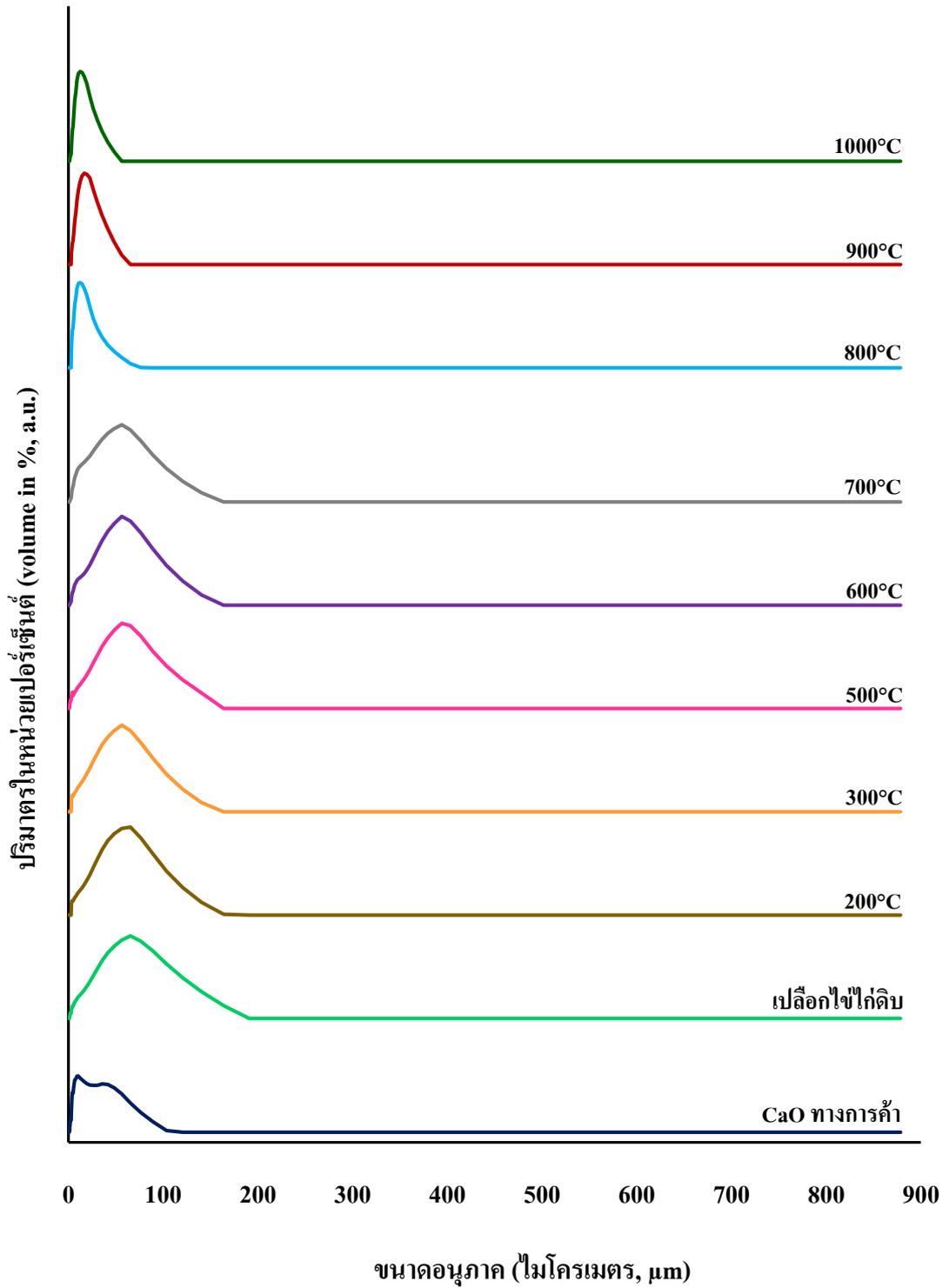
สำหรับการกระจายขนาดอนุภาคของเปลือกไข่ไก่ดิบ เปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ และแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าที่แสดงดังรูป 4.8 พบว่าเปลือกไข่ไก่ดิบมีช่วงการกระจายขนาดอนุภาคคล้ายกับเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซน์ที่อุณหภูมิในช่วง 200-700 องศาเซลเซียส โดยมีค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงกว้างซึ่งมีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.77 ถึง 166.80 ไมโครเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 37.44 ถึง 47.17 ไมโครเมตร ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิในการเผาอัลไซน์เพิ่มขึ้นจาก 800 เป็น 1000 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซน์ มีค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงที่แคบลง ซึ่งแสดงได้ว่าอนุภาคมีการกระจายสม่ำเสมอมากขึ้น โดยมีขนาดอนุภาคกระจายตัวอยู่ระหว่าง 0.85 ถึง 76.32 ไมโครเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 13.45 ถึง 16.77 ไมโครเมตร ในช่วงอุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าเทียบกับเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าแคลเซียมออกไซด์ทางการค้ามีค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.85 ถึง 102.30 ไมโครเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 19.83 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคที่มากกว่าเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาอัลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศา

เซลเซียส โดยเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 2.75 ถึง 56.92 ไมโครเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเป็น 16.77 ไมโครเมตร

ตาราง 4.5 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเปลือกไข่ไก่ดิบ เปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ และแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า

สารตัวอย่าง	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร, μm)
เปลือกไข่ไก่ดิบ	47.17
เปลือกไข่ไก่เผาที่อุณหภูมิ 200°C	43.05
เปลือกไข่ไก่เผาที่อุณหภูมิ 300°C	40.26
เปลือกไข่ไก่เผาที่อุณหภูมิ 500°C	41.66
เปลือกไข่ไก่เผาที่อุณหภูมิ 600°C	41.11
เปลือกไข่ไก่เผาที่อุณหภูมิ 700°C	37.44
เปลือกไข่ไก่เผาที่อุณหภูมิ 800°C	14.26
เปลือกไข่ไก่เผาที่อุณหภูมิ 900°C	16.77
เปลือกไข่ไก่เผาที่อุณหภูมิ 1000°C	13.45
แคลเซียมออกไซด์ทางการค้า	19.83

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 4.8 ลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า เปลือกไข่ไก่ดิบ และเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

4.3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่ไก่ดิบ แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ และแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า

ตาราง 4.6 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ของเปลือกไข่ไก่ดิบ แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ได้ (ที่อุณหภูมิเผาผลาญ 900 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที) และแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า โดยจากผลการวิเคราะห์แสดงเป็นปริมาณสารประกอบออกไซด์ ปริมาณการสูญหายจากการการเผาไหม้ อุณหภูมิสูง (loss on ignition, LOI) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเปลือกไข่ไก่ดิบที่ไม่ได้ผ่านการเผาผลาญมีปริมาณสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) 53.69 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณ LOI และ SO_2 44.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสารประกอบธาตุออกไซด์อื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย โดยในความเป็นจริงแล้วเปลือกไข่ไก่โดยทั่วไปจะมีองค์ประกอบของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งไม่สอดคล้องกับผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ได้โดยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์นี้ อย่างไรก็ตามเทคนิควิเคราะห์นี้ได้มีขั้นตอนการเผาให้ความร้อนกับเปลือกไข่ไก่ ซึ่งส่งผลทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในเปลือกไข่ไก่เกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนที่สูงกลายเป็นแคลเซียมออกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเป็นผลทำให้ค่า LOI และ SO_2 ที่ได้ของเปลือกไข่ไก่ดิบมีปริมาณสูง (44.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) เมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ (18.03 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า (17.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลระหว่างเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาผลาญที่สังเคราะห์ได้เทียบกับแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า พบว่าแคลเซียมออกไซด์ทางการค้ามีปริมาณสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ 80.91 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณ LOI และ SO_2 17.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสารประกอบธาตุออกไซด์อื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย ส่วนเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาผลาญที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ 79.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารอินทรีย์ที่ระเหยได้ 18.03 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และพบสารประกอบธาตุออกไซด์อื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อยเช่นกัน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์บ่งชี้ได้ว่าเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาผลาญที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ใกล้เคียงกับแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า

ตาราง 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่ไก่ดิบ แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ และ แคลเซียมออกไซด์ทางการค้า

ชนิดสาร	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%wt.)		
	เปลือกไข่ไก่ดิบ	แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่	แคลเซียมออกไซด์ทางการค้า
Al ₂ O ₃	0.36	0.37	0.28
Fe ₂ O ₃	0.05	0.06	0.11
K ₂ O	0.06	0.07	0.01
MgO	0.56	1.68	0.44
MnO	<0.01	<0.01	0.01
Na ₂ O	0.15	0.16	0.03
P ₂ O ₅	0.33	0.43	0.02
SiO ₂	0.12	0.12	0.41
TiO ₂	<0.01	<0.01	0.01
CaO	53.69	79.23	80.91
Loss on ignition (LOI) + SO ₃	44.97	18.03	17.38

ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ได้แก่ เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว และรูพรุนด้วยวิธีบีอีที เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค และเครื่องวิเคราะห์เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สามารถสรุปได้ว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ที่สภาวะอัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที และที่อุณหภูมิในการคัลไชน์ 900 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ด้วยวิธีการเผาแคลไชน์ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการเลือกแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ที่สภาวะนี้ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับนำไปทดสอบปฏิกิริยาเชิงเร่งทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันละหุ่งต่อไป

4.4 ผลการทดสอบปฏิกิริยาเชิงเร่งทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันละหุ่ง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

4.4.1 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง

ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งผ่านปฏิกิริยาเชิงเร่งทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่เหลือทิ้ง โดยช่วงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งที่ทำการศึกษายู่ระหว่าง 0.25-3.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า และ 1.0-4.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ และได้กำหนดสภาวะควบคุมการทดลองสำหรับทดสอบปฏิกิริยาเชิงเร่งทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันคือ อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อ น้ำมันละหุ่งเท่ากับ 14:1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ใช้รีฟลักซ์ 60 องศาเซลเซียส (ปริมาณน้ำมันละหุ่งเริ่มต้นที่ใช้คงที่เท่ากับ 88.0 มิลลิลิตร แอลกอฮอล์ที่ใช้คือ เมทานอลชนิดแอนไฮดรัส) ทั้งนี้ได้มีการวิเคราะห์และประเมินผลในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยการบันทึกผลปริมาตรผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารเมทิลเอสเทอร์ในชั้นผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโทกราฟี

ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า

ผลการทดสอบปฏิกิริยาเชิงเร่งทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันละหุ่งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า แสดงได้ดังตาราง 4.7-4.8 และรูป 4.9-4.11 ซึ่งตาราง 4.7 และรูป 4.9 แสดงผลการวัดปริมาตรของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้และกลีเซอรินที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งที่ศึกษามีทั้งหมด 5 สภาวะ ได้แก่ 0.25 0.50 1.00 2.00 และ 3.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาจากกราฟในรูป 4.9 พบว่าปริมาตรไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งในช่วง 0.25-3.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลเฉลี่ยใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วงประมาณ 78-80 มิลลิลิตร โดยที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ผลผลิตไบโอดีเซลเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 80.00 มิลลิลิตร ในขณะที่

การเกิดกลีเซอรินซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ต่อน้ำมันละหุ่งจาก 0.25 เป็น 3.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ปริมาณเฉลี่ยของกลีเซอรินมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดจาก 2.40 เป็น 0.17 มิลลิลิตร โดยที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ผลผลิตพลอยได้กลีเซอรินเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 2.40 มิลลิลิตร ทั้งนี้รูป 4.10 ได้แสดงภาพถ่ายลักษณะผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันละหุ่งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า ซึ่งสามารถเห็นลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ในสภาพที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าในปริมาณที่ต่างกัน โดยเกิดการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์เป็นสองส่วน ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ส่วนบนคือส่วนของผลิตภัณฑ์หลักไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ และผลิตภัณฑ์ส่วนล่างคือส่วนของผลิตภัณฑ์พลอยได้กลีเซอรินที่เกิดขึ้น

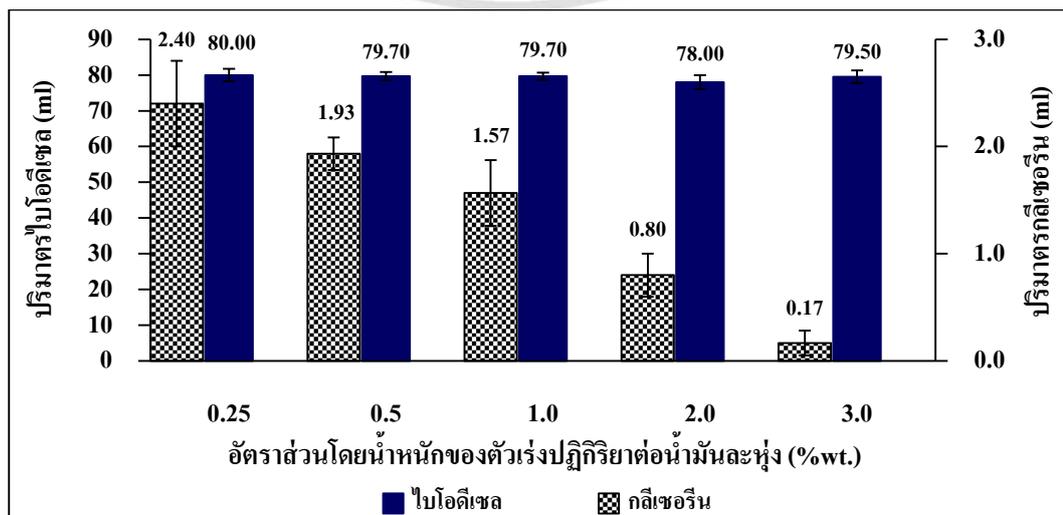
สำหรับผลวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในส่วนผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้นั้นแสดงได้ตามตาราง 4.8 และรูป 4.11 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ (%methyl ester yield หรือ %ME yield) ที่สังเคราะห์ได้กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง พบว่าผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้สูงสุดเท่ากับ 77.29 เปอร์เซ็นต์เมื่อใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งจาก 0.25 เป็น 3.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ชัดว่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 77.29 เป็น 61.35 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลมาจากสามสาเหตุหลักด้วยกัน โดยสาเหตุแรกอาจเป็นเพราะผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์บางส่วนถูกดูดซึมเข้าสู่ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่มากขึ้นเมื่อมีการใช้แคลเซียมออกไซด์ที่มากเกินไป จึงส่งผลให้สารเมทิลเอสเทอร์ที่วิเคราะห์ได้ในชั้นผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Siow และคณะ (2014) [36] ส่วนสาเหตุที่สองคาดว่าในระหว่างการทำปฏิกิริยาอาจมีปฏิกิริยาข้างเคียงอื่นเกิดขึ้น โดยเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นอาจทำปฏิกิริยาต่อเป็นผลิตภัณฑ์อื่น จึงเป็นผลทำให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ในชั้นผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลลดลง และสาเหตุที่สามคาดว่าเกิดเนื่องจากข้อจำกัดการถ่ายเทมวลสารของสารตั้งต้น (สารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ และตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็ง) ในของผสมสารตั้งต้นที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีเฟสต่างกัน (ระบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง) [36,37] โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มากเกินไปได้ส่งผลทำให้สารผสมทั้งระบบมีความหนืดสูง จึงก่อให้เกิดปัญหาในการผสมระหว่างสารตั้งต้น เมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยาได้ไม่ดี และทำให้ความต้านทานการถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้น จึงเป็นผลทำให้ผลผลิต

เมทิลเอสเทอร์ลดลง อีกทั้งยังมีความต้องการใช้พลังงานที่สูงขึ้นเพื่อให้เพียงพอต่อการกวน ซึ่งผลที่ได้ก็สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ziku และคณะ (2009) Nagaraju และคณะ (2013) Guanyi และคณะ (2014) Ying และคณะ(2013) Seik และคณะ (2015) และ Osman และคณะ (2015) [4,37-41] ที่ได้รายงานการลดลงของผลผลิตเมทิลเอสเทอร์เมื่อมีปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็ง (แคลเซียมออกไซด์บริสุทธิ์ แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ และแคลเซียมออกไซด์บนตัวรองรับ) ที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

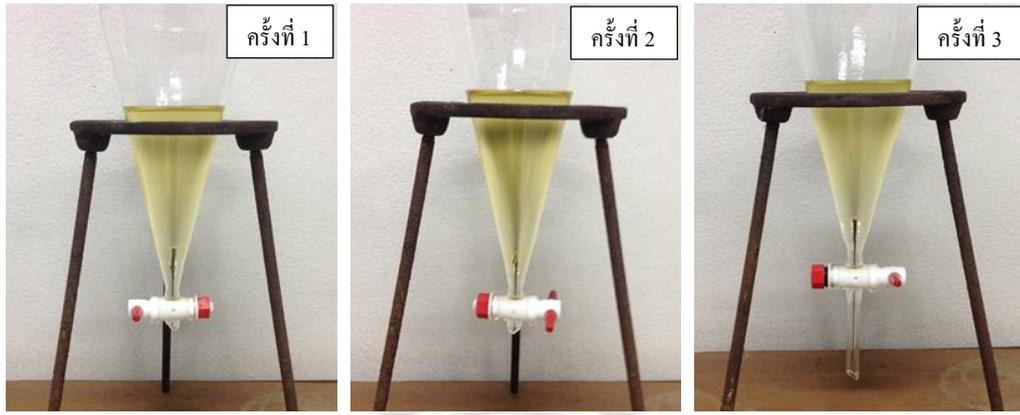
ตาราง 4.7 ปริมาตรไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้และกลีเซอรินที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าต่อน้ำมันละหุ่ง

อัตราส่วน โดยน้ำหนัก ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ น้ำมันละหุ่ง (%wt.)	ไบโอดีเซล (มิลลิลิตร)				กลีเซอริน (มิลลิลิตร)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0.25	81.00	81.00	78.00	80.00	2.40	2.00	2.80	2.40
0.50	79.00	81.00	79.00	79.70	2.10	1.80	1.90	1.93
1.00	78.50	80.00	80.50	79.70	1.30	1.90	1.50	1.57
2.00	78.00	80.00	76.00	78.00	0.60	1.00	0.80	0.80
3.00	77.50	81.00	80.00	79.50	0.30	0.10	0.10	0.17

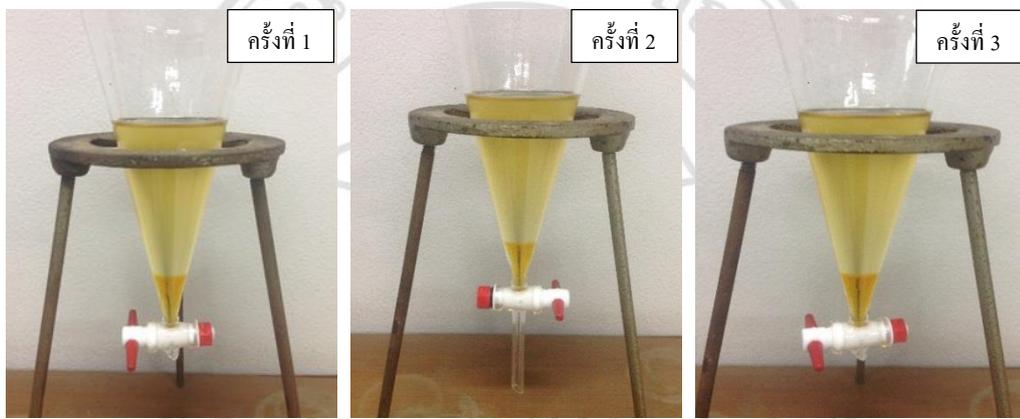
(สภาวะควบคุม: อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันละหุ่งเท่ากับ 14:1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ใช้รีฟลักซ์ 60 องศาเซลเซียส)



รูป 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้และกลีเซอรินกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าต่อน้ำมันละหุ่ง



อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

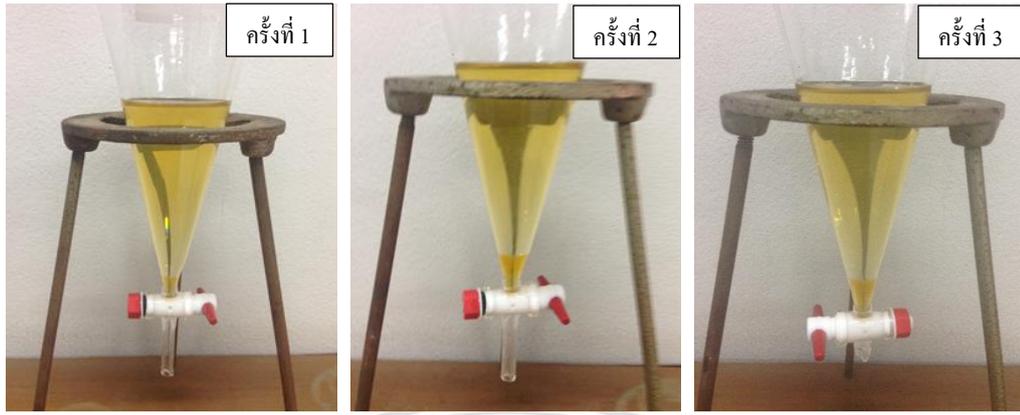


อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

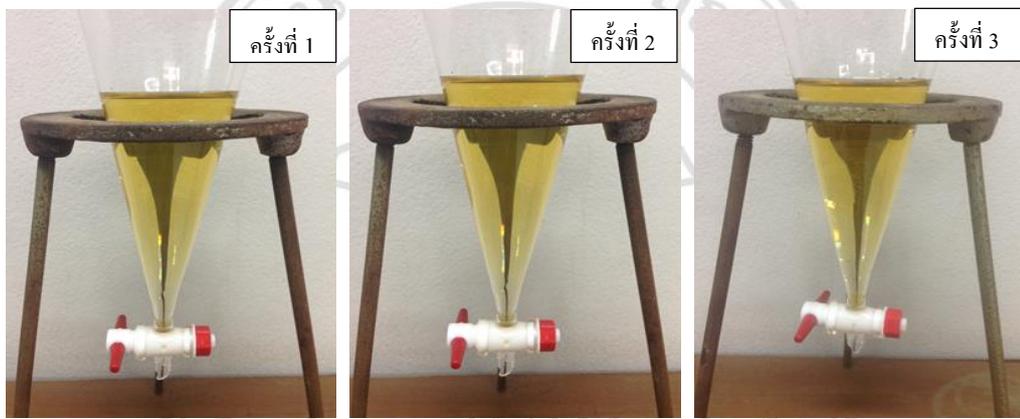


อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 1.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

รูป 4.10 ภาพถ่ายลักษณะผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งต่างๆ



อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 2.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 3.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

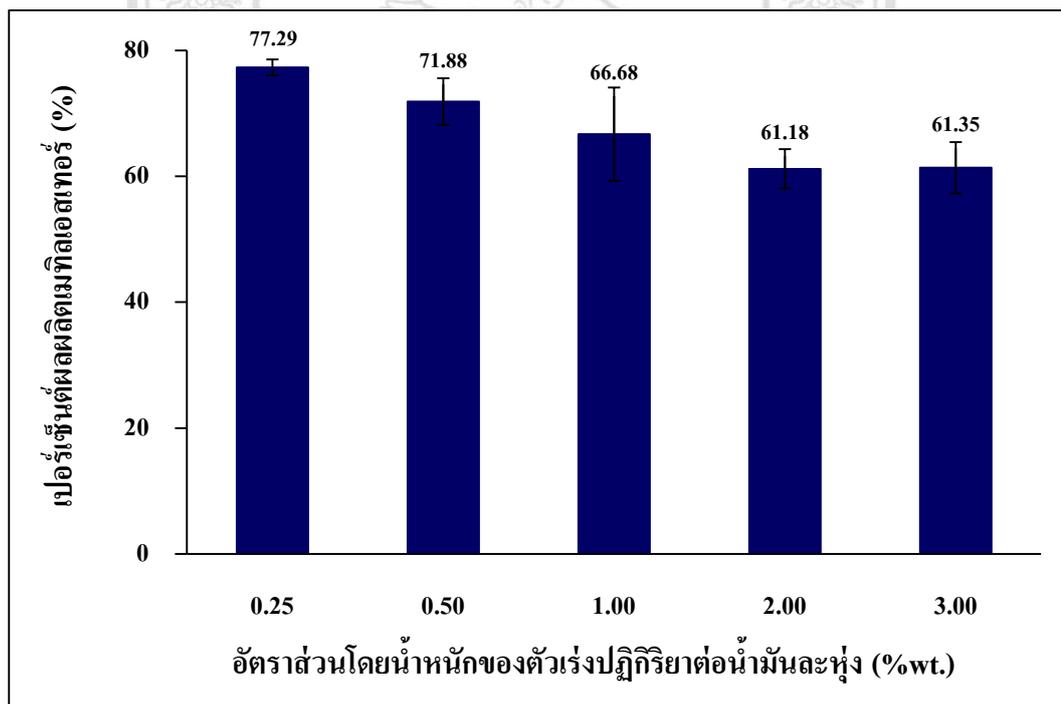
รูป 4.10 ภาพถ่ายลักษณะผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งต่างๆ (ต่อ)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.8 ปริมาณผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าต่อน้ำมันละหุ่ง

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ น้ำมันละหุ่ง (%wt.)	ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ (เปอร์เซ็นต์)			
	1	2	3	เฉลี่ย
0.25	75.85	77.85	78.18	77.29
0.50	73.02	74.89	67.74	71.88
1.00	67.09	59.06	73.89	66.68
2.00	57.69	63.65	62.21	61.18
3.00	62.90	64.43	56.72	61.35

(สภาวะควบคุม: อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันละหุ่งเท่ากับ 14:1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ใช้รีฟลักซ์ 60 องศาเซลเซียส)



รูป 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าต่อน้ำมันละหุ่ง

ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่

ผลการทดสอบปฏิกิริยาเชิงเร่งทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันละหุ่งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ แสดงได้ดังตาราง 4.9-10 และรูป 4.12-4.14 ซึ่งตาราง 4.9 และรูป 4.12 แสดงผลการวัดปริมาตรของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ และกลีเซอรินที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งที่ศึกษามีทั้งหมด 7 สภาวะ ได้แก่ 1.0 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 และ 4.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาจากกราฟในรูป 4.12 พบว่าไม่เกิดการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยคาดว่าอาจเป็นเพราะอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งไม่เพียงพอหรือน้อยเกินไปที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันได้ดีภายใต้สภาวะการทดลองที่ศึกษา แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งเป็น 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 และ 4.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 75-79 มิลลิลิตร โดยที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ผลผลิตไบโอดีเซลเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 78.70 มิลลิลิตร ในขณะที่การเกิดผลผลิตพลอยได้กลีเซอรินพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ต่อน้ำมันละหุ่งจาก 2.0 เป็น 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ปริมาตรเฉลี่ยของกลีเซอรินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 1.46 เป็น 2.40 มิลลิลิตร และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งจาก 2.5 เป็น 4.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาตรเฉลี่ยของกลีเซอรินจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 2.1-2.5 มิลลิลิตร แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งเป็น 4.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาตรเฉลี่ยของกลีเซอรินที่มีแนวโน้มลดลงเป็นอย่างมากโดยมีปริมาณที่ได้เพียง 0.87 มิลลิลิตร ดังนั้นในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 4.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ผลผลิตพลอยได้ที่เป็นกลีเซอรินสูงสุดเท่ากับ 2.50 มิลลิลิตร ทั้งนี้รูป 4.13 ได้แสดงภาพถ่ายลักษณะผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันละหุ่งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ ซึ่งจะเห็นได้จากภาพถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ไม่เกิดการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ ขณะที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งที่มากกว่า 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้นสามารถสังเกตเห็นลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่

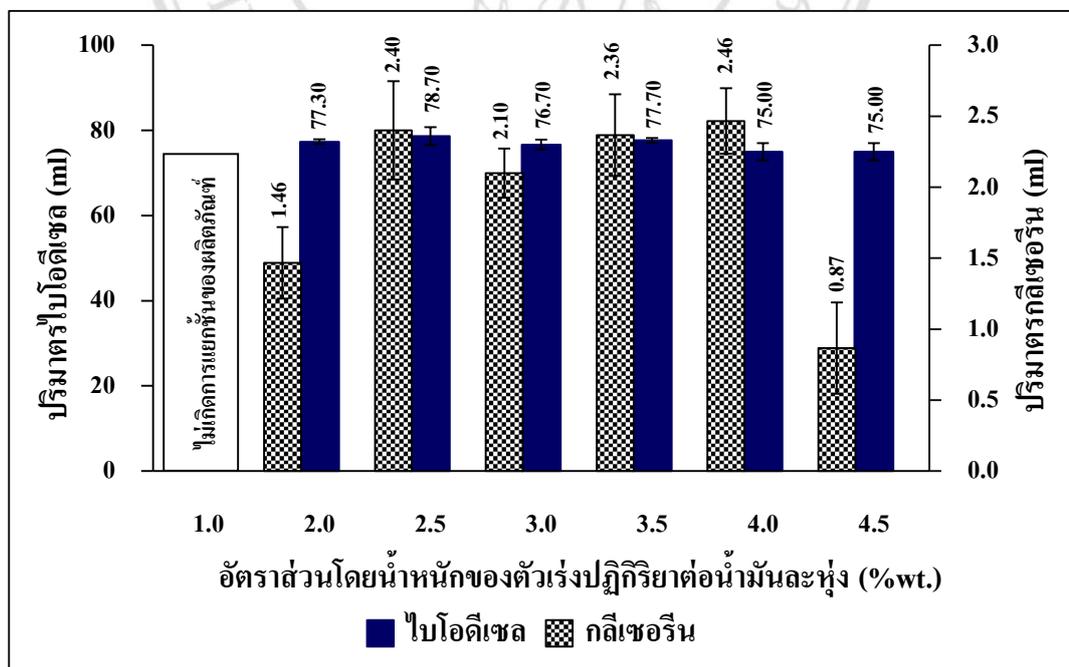
สังเคราะห์ได้ในสภาวะที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ในปริมาณที่ต่างกัน โดยในทุกสภาวะ (ยกเว้นที่อัตราอัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 1.0 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก) เกิดการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์เป็นสองส่วนเช่นเดียวกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า

สำหรับผลวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในส่วนผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้นั้นแสดงตามตาราง 4.10 และ รูป 4.14 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้กับอัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง พบว่าที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ต่อ น้ำมันละหุ่ง 1.0 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ไม่เกิดการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลและกลีเซอริน ขณะที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 2.0-4.5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เกิดการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลและกลีเซอรินทุกสภาวะ ซึ่งจากผลการศึกษา จะเห็นว่าเปอร์เซนต์ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 2.0 เป็น 3.5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก โดยทำให้เปอร์เซนต์ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 65.20 เป็น 71.31 เปอร์เซนต์ ทั้งนี้สามารถอธิบายในทางทฤษฎีได้ว่าการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นหรือทำให้มีตำแหน่งเบสที่ว่องไว (active basic sites) ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มจำนวนมากขึ้น จึงเป็นผลทำให้ได้เปอร์เซนต์ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งมากกว่า 3.5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักนั้นกลับพบว่าเปอร์เซนต์ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลง ซึ่งคาดว่ามีสาเหตุเช่นเดียวกันกับกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์เกรดทางการค้าที่ได้รายงานไว้ก่อนหน้านี้ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปจะทำให้สารผสมทั้งระบบมีความหนืดสูง จึงก่อให้เกิดปัญหาในการผสมระหว่างสารตั้งต้น เมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาได้ไม่ดี และทำให้ความต้านทานการถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีความต้องการใช้พลังงานที่สูงขึ้นเพื่อให้เพียงพอต่อการกวน นอกจากนี้ยังคาดว่าในระหว่างการทำปฏิกิริยาอาจมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น โดยเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นอาจทำปฏิกิริยาต่อเป็นผลิตภัณฑ์อื่น จึงเป็นผลทำให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ในชั้นผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลลดลง ซึ่งแนวโน้มที่ได้นี้ก็สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ziku และคณะ (2009) Nagaraju และคณะ (2013) Guanyi และคณะ (2014) Ying และคณะ(2013) Seik และคณะ (2015) และ Osman และคณะ (2015) [4,37-41]

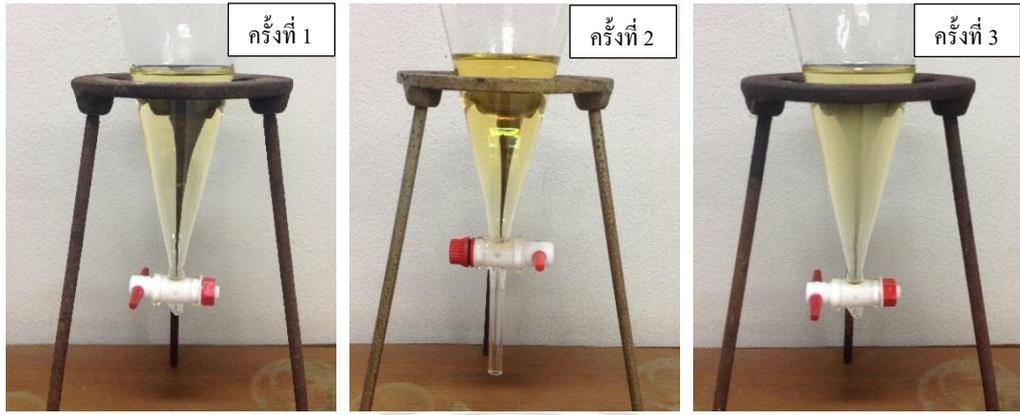
ตาราง 4.9 ปริมาณไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้และกลีเซอรินที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ต่อน้ำมันละหุ่งต่างๆ

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ น้ำมันละหุ่ง (%wt.)	ไบโอดีเซล (มิลลิลิตร)				กลีเซอริน (มิลลิลิตร)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
1.0	ไม่เกิดการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์							
2.0	77.00	78.00	77.00	77.30	1.70	1.50	1.20	1.46
2.5	78.00	77.00	81.00	78.70	2.20	2.20	2.80	2.40
3.0	78.00	76.00	76.00	76.70	2.30	2.00	2.00	2.10
3.5	77.00	78.00	78.00	77.70	2.20	2.70	2.20	2.36
4.0	75.00	77.00	73.00	75.00	2.60	2.60	2.20	2.46
4.5	73.00	77.00	75.00	75.00	1.00	0.50	1.10	0.87

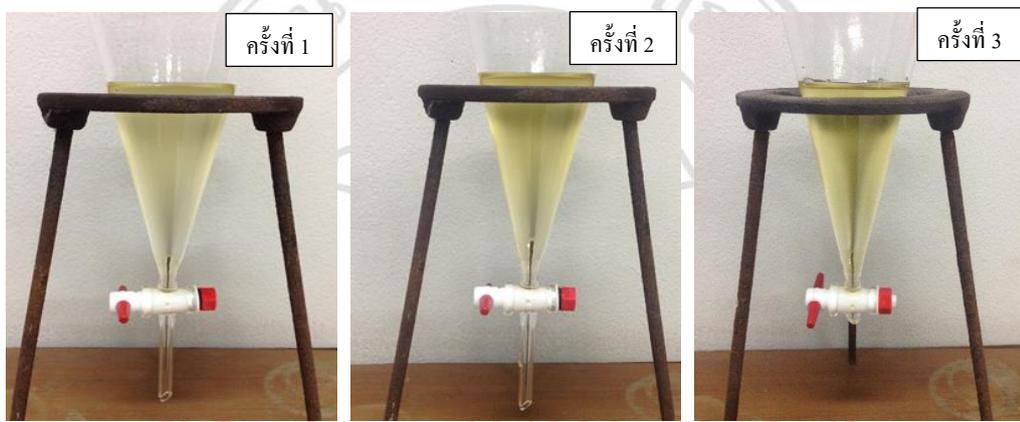
(สภาวะควบคุม: อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันละหุ่งเท่ากับ 14:1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ใช้รีฟลักซ์ 60 องศาเซลเซียส)



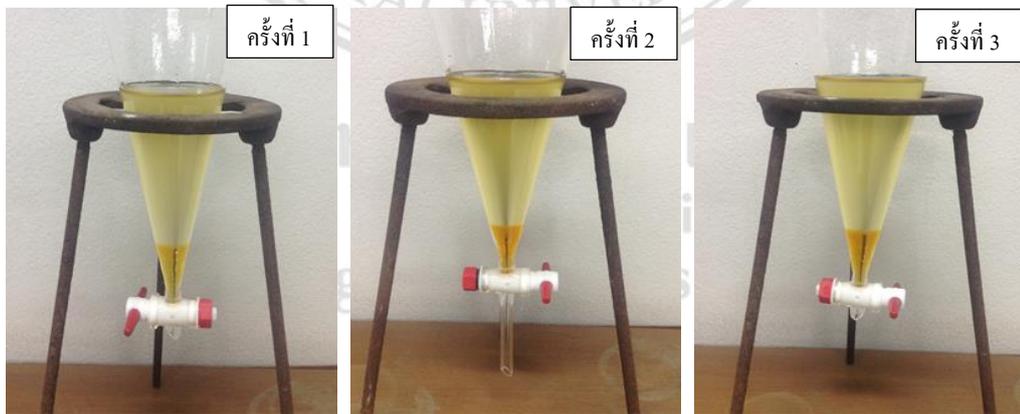
รูป 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไบโอดีเซลและกลีเซอรินกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ต่อน้ำมันละหุ่ง



อัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

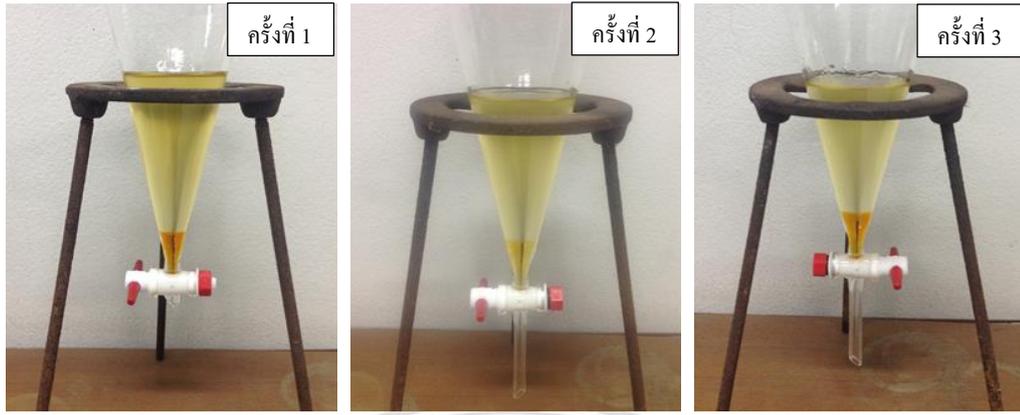


อัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

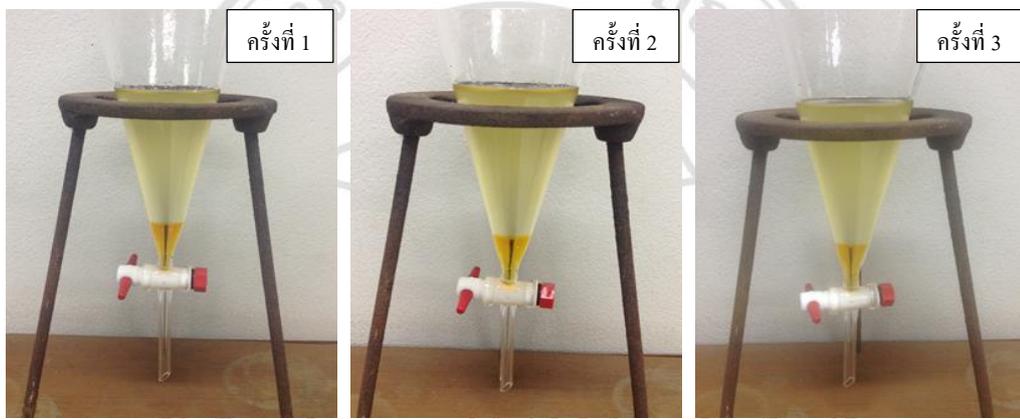


อัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

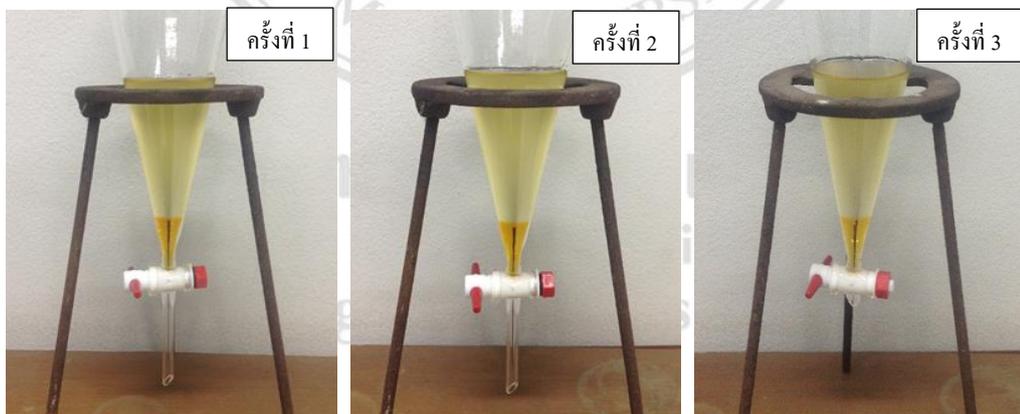
รูป 4.13 ภาพถ่ายลักษณะผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งต่างๆ



อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

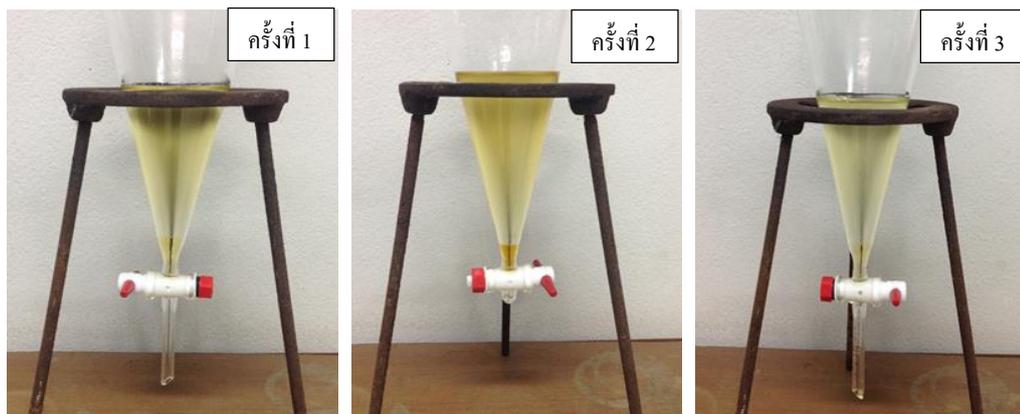


อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 4.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

รูป 4.13 ภาพถ่ายลักษณะผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งต่างๆ (ต่อ)



อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 4.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

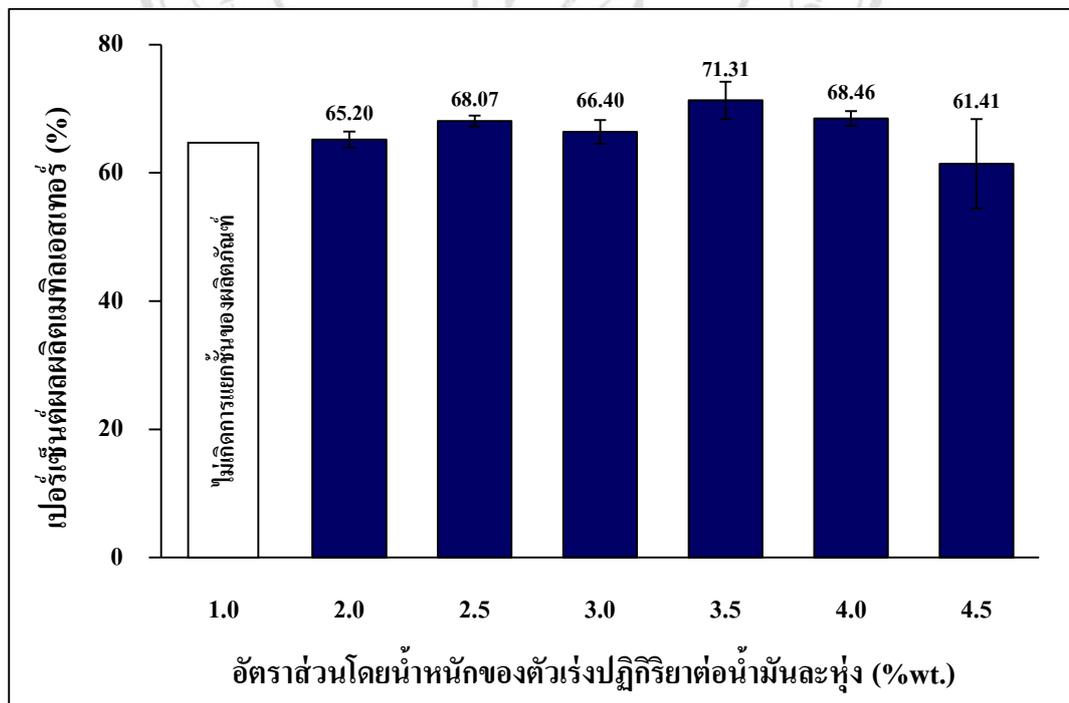
รูป 4.13 ภาพถ่ายลักษณะผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งต่างๆ (ต่อ)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved

ตาราง 4.10 ปริมาณผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ต่อน้ำมันละหุ่ง

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ น้ำมันละหุ่ง (%wt.)	ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ (เปอร์เซ็นต์)			
	1	2	3	เฉลี่ย
1.0	ไม่เกิดการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์			
2.0	66.66	64.54	64.41	65.20
2.5	67.19	68.15	68.88	68.07
3.0	68.53	65.13	65.54	66.40
3.5	68.18	73.93	71.81	71.31
4.0	67.18	69.38	68.84	68.46
4.5	68.24	54.34	61.66	61.41

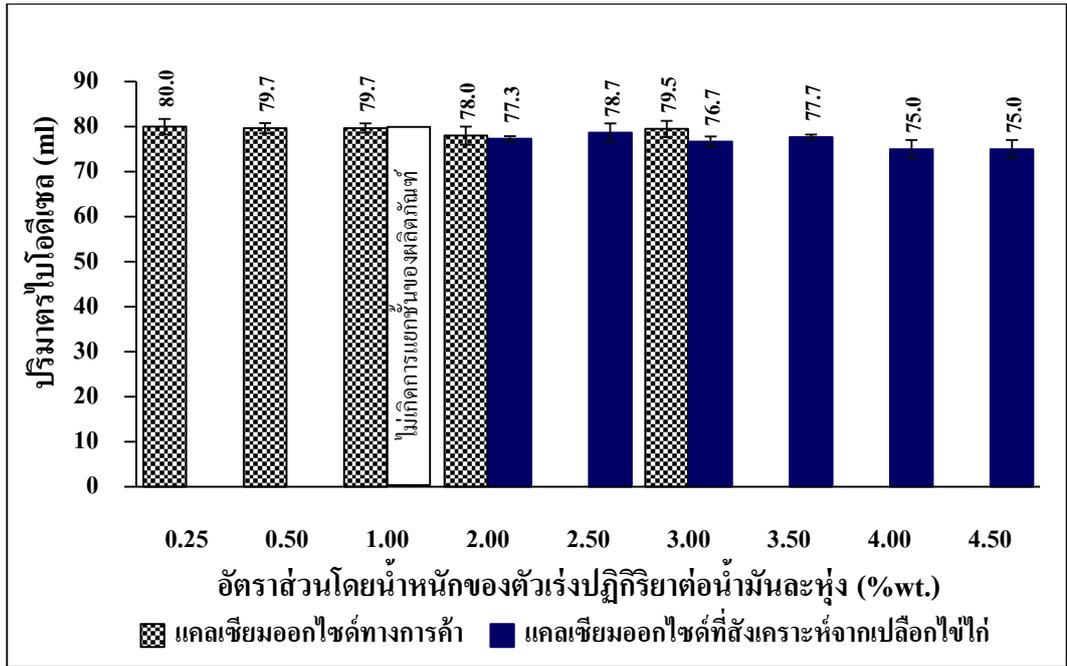
(สภาวะควบคุม: อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันละหุ่งเท่ากับ 14:1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ใช้รีฟลักซ์ 60 องศาเซลเซียส)



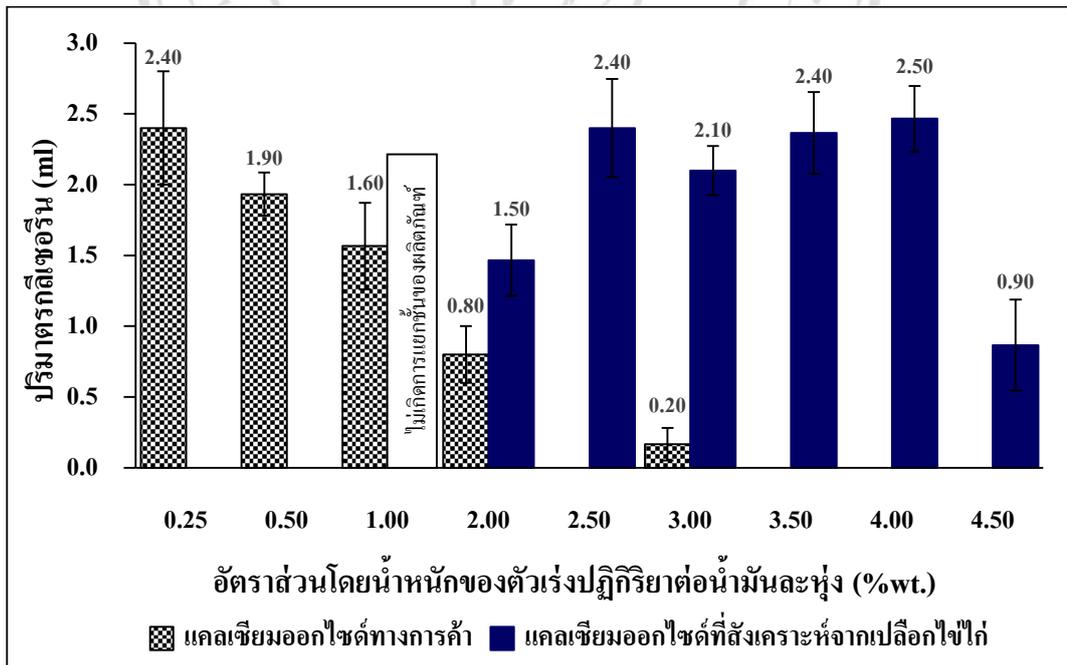
รูป 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์กับอัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ต่อน้ำมันละหุ่ง

4.4.2 ผลเปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้ากับตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่

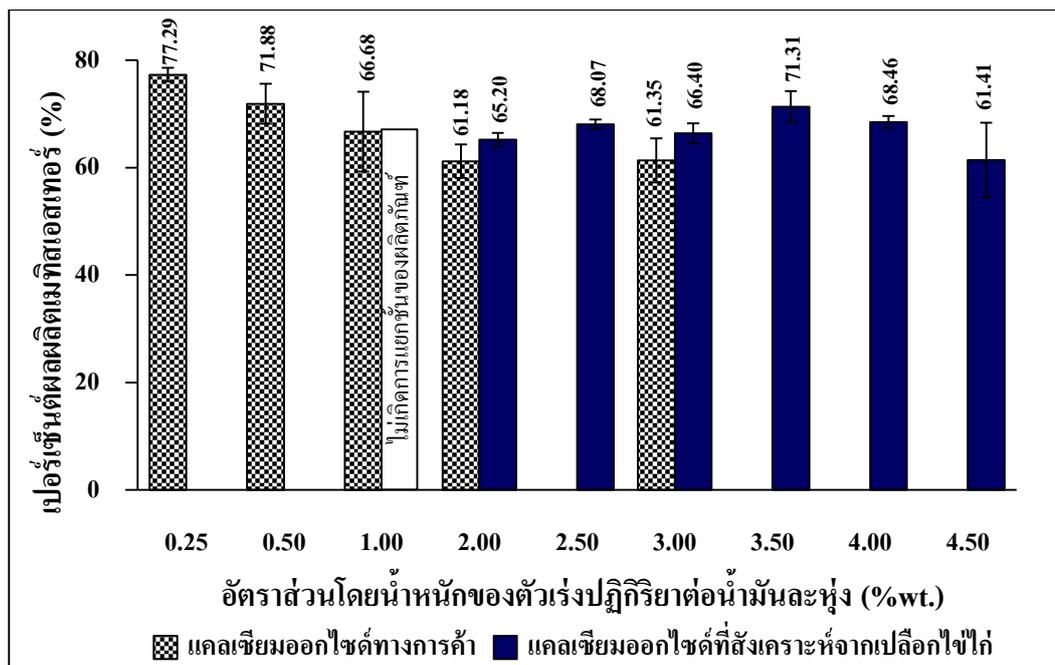
กราฟแสดงผลเปรียบเทียบปริมาณไบโอดีเซล ปริมาตรกลีเซอริน และเปอร์เซ็นต์ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ แสดงดังรูป 4.15 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งที่เท่ากัน (1.00 2.00 และ 3.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) พบว่าที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่ง 1.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลผลิตไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จะไม่เกิดการแยกชั้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ ขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าที่อัตราส่วนเดียวกันนี้เกิดเกิดการแยกชั้นของไบโอดีเซลและกลีเซอริน โดยได้ปริมาณไบโอดีเซล ปริมาตรกลีเซอริน และเปอร์เซ็นต์ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 79.70 มิลลิลิตร 1.60 มิลลิลิตร และ 66.68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งเท่ากับ 2 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทั้งแบบทางการค้าและแบบที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่แสดงค่าปริมาณไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ในปริมาณค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนปริมาตรกลีเซอรินและเปอร์เซ็นต์ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์นั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่จะให้ปริมาตรกลีเซอรินและเปอร์เซ็นต์ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าเล็กน้อย ทั้งนี้คาดว่าเกิดเนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้ามีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก ลักษณะเป็นผงละเอียดน่าจะมีปริมาณที่มากเกินไป จนเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน (พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาลดลง) หรือมีการกระจายตัวได้น้อยในเครื่องปฏิกรณ์ภายใต้สภาวะที่มีการกวนผสมตลอดเวลา จึงส่งผลทำให้โอกาสในการสัมผัสกับสารทำปฏิกิริยาได้น้อยลงเมื่อมีการใช้แคลเซียมออกไซด์ทางการค้าที่เยอะเกินไป อีกทั้งเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งที่ปริมาณน้อยกว่า 1.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในปริมาณยิ่งน้อยก็ยิ่งให้ปริมาณผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่เพิ่มขึ้นและได้มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่อีกด้วย ซึ่งเป็นการสนับสนุนเหตุผลข้างบนด้วย



รูป 4.15 ผลเปรียบเทียบปริมาณไโอดีนที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่



รูป 4.16 ผลเปรียบเทียบปริมาณกลีเซอรินที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่



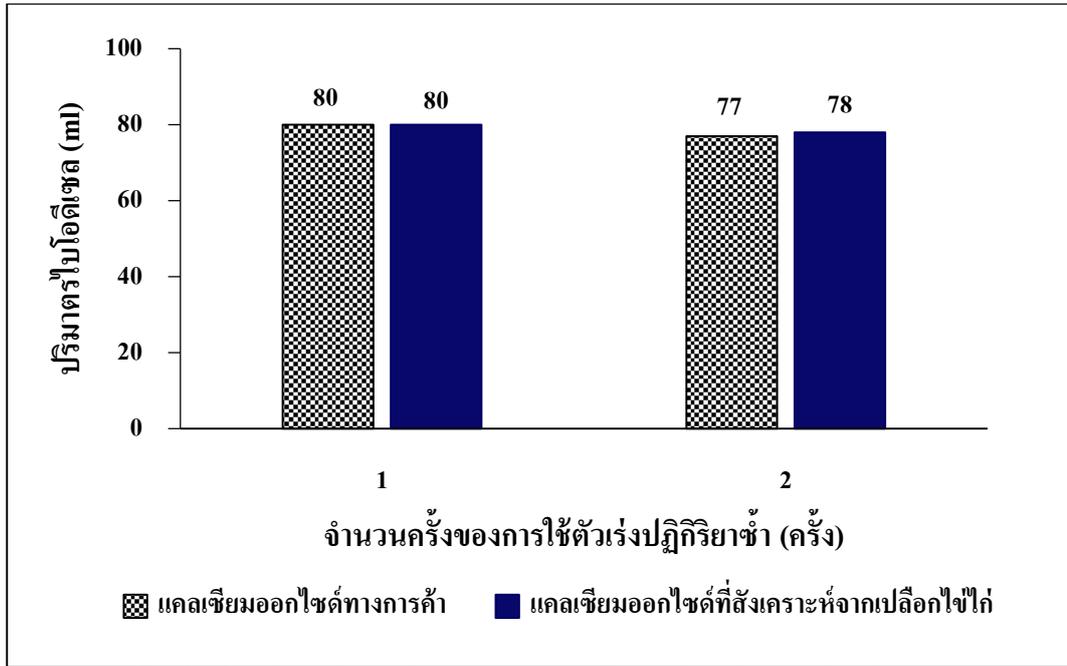
รูป 4.17 ผลเปรียบเทียบปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่

4.4.3 การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ

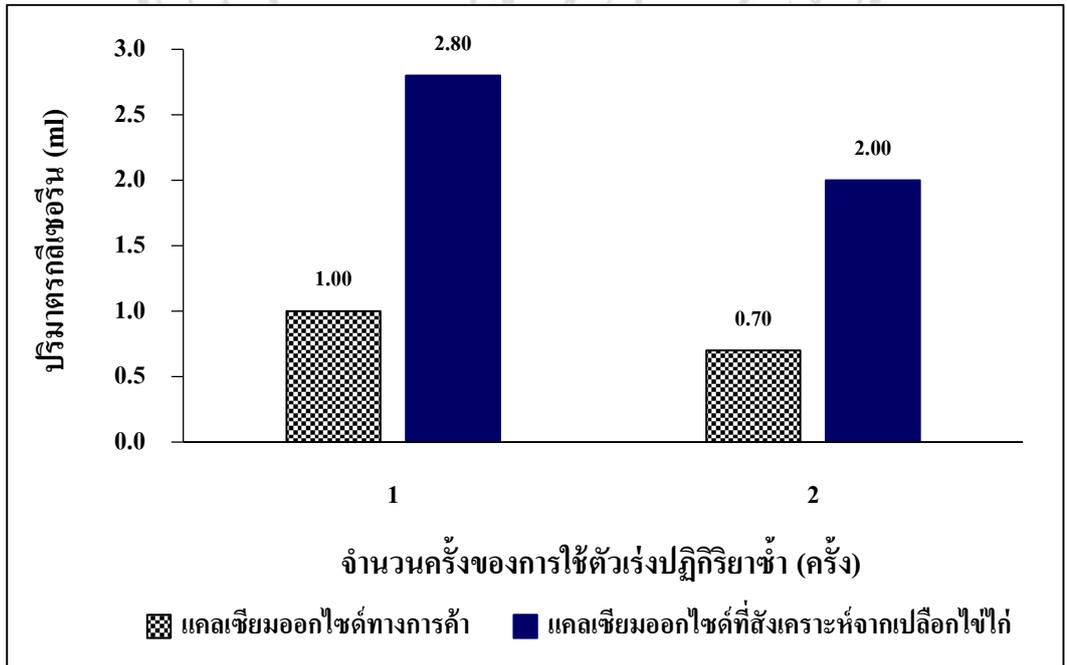
ผลการศึกษานำกลับมาใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ได้สำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งผ่านปฏิกิริยาเชิงเร่งทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เพื่อวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนการผลิต แสดงได้ดังรูป 4.18 และ 4.19 โดยเมื่อหาสถานะของอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อน้ำมันละหุ่งที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันได้แล้ว ในการทดลองครั้งนี้จึงได้ศึกษาในเบื้องต้นถึงการใช้งานซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ ซึ่งได้กำหนดอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันละหุ่งที่ใช้ในการศึกษานี้เท่ากับ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และในการทดลองครั้งนี้ได้นำตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่กลับมาใช้ซ้ำโดยนำตัวเร่งปฏิกิริยามาทำการล้างด้วยเมทานอลเพื่อชะล้างพวกน้ำมันและกลีเซอรินที่ติดมากับตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วนำไปตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้เผาผลาญที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนออก เมื่อพิจารณาจากรูป 4.18 พบว่าตัวเร่ง

ปฏิกริยาทั้ง 2 ชนิด สามารถนำตัวเร่งปฏิกริยากลับมาใช้ซ้ำได้ 2 ครั้ง จากรูป 4.18 แสดงผลของการนำกลับมาใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ต่อปริมาตรไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งจะเห็นว่าปริมาตรไบโอดีเซลที่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและตัวเร่งปฏิกริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่มีแนวโน้มที่ลดลงจาก 80 เป็น 77 เปอร์เซ็นต์ และ 80 เป็น 78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณารูป 4.19 ซึ่งแสดงผลของการนำกลับมาใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ต่อปริมาตรกลีเซอรินที่สังเคราะห์ได้ จะเห็นได้ว่าปริมาตรกลีเซอรินที่เกิดขึ้นจากการใช้ตัวเร่งปฏิกริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและตัวเร่งปฏิกริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่มีแนวโน้มที่ลดลงจาก 1.00 เป็น 0.70 เปอร์เซ็นต์ และ 2.80 เป็น 2.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยความสามารถในการเร่งปฏิกริยาที่ลดลงนี้คาดว่าอาจเกิดจากมีสิ่งสกปรกหรือมีน้ำเข้าไปเกาะสัมผัสกับตำแหน่งพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกริยา ส่งผลทำให้ความว่องไวและความแรงของตัวเร่งปฏิกริยาลดลง ซึ่ง Siow และคณะ (2014) [36] ได้ศึกษาการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกริยาแคลเซียมออกไซด์นิกเกิล แคลเซียมออกไซด์นิกเกิลและตัวเร่งปฏิกริยาแคลเซียมออกไซด์ ผลที่ได้พบว่าผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลงเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกริยาแคลเซียมออกไซด์ซ้ำ 6 ครั้ง ซึ่งการสูญเสียความสามารถในการเร่งปฏิกริยานี้เกิดเนื่องจากการชะของตำแหน่งที่ว่องไวในการทำปฏิกริยาระหว่างการทำปฏิกริยาอย่างต่อเนื่อง Ziku และคณะ (2009) [4] และ Jutika และคณะ (2011) [11] ยังชี้ให้เห็นว่าอาจเป็นเพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแคลเซียมออกไซด์ไปเป็นโครงสร้างอื่น เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และอาจมีการสูญเสียปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาในขั้นตอนระหว่างการล้าง การกรอง หรือการเผาแคล์ไซน์ นอกจากนี้ Seik และคณะ (2015) [40] ยังให้เหตุผลเพิ่มเติมว่าอาจเป็นเพราะการละลายของแคลเซียมออกไซด์บางส่วนในเมทานอลที่ทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกริยาลดลง

Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 4.18 ผลของการนำกลับมาใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ต่อปริมาณไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้



รูป 4.19 ผลของการนำกลับมาใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ต่อปริมาณกลีเซอรินที่เกิดขึ้น

4.5 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) ของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ แสดงดังรูป 4.20 4.21 ตาราง 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

จากรูป 4.20 และตาราง 4.11 ซึ่งแสดงองค์ประกอบทางเคมีในผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า พบว่าประกอบด้วยเมทิลริซิโนเลตในปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 82.53 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังประกอบด้วยกรดไขมันชนิดต่างๆ ดังนี้

1. กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ได้แก่ hexadecanoic acid, methyl ester 1.94 เปอร์เซ็นต์ heptadecanoic acid, methyl ester 0.05 เปอร์เซ็นต์ 10,13-octadecadienoic acid, methyl ester 4.85 เปอร์เซ็นต์ 9,12-octadecadienoic acid, methyl ester 1.60 เปอร์เซ็นต์ 9-octadecenoic acid, methyl ester, (E)- 4.12 เปอร์เซ็นต์ octadecanoic acid, methyl ester 2.78 เปอร์เซ็นต์ 7,10-octadecadienoic acid, methyl ester 0.02 เปอร์เซ็นต์ 9,11-octadecadienoic acid, methyl ester, (E,E)- 0.04 เปอร์เซ็นต์ 10-nonadecenoic acid, methyl ester 0.18 เปอร์เซ็นต์ และ octadecanoic acid, 9,10-dihydroxy, methyl ester 0.63 เปอร์เซ็นต์
2. เอสเทอร์ (ester) ได้แก่ Z,E-7,11-hexadecadien-1-yl acetate 0.34 เปอร์เซ็นต์
3. คีโตน (ketone) ได้แก่ bicyclo [5.2.1] decan-10-one 0.790 เปอร์เซ็นต์
4. แอลดีไฮด์ (aldehyde) ได้แก่ (cis-9-hexadecenal) 0.140 เปอร์เซ็นต์

จากรูป 4.21 และตาราง 4.12 ซึ่งแสดงองค์ประกอบทางเคมีในผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ พบว่าประกอบด้วยเมทิลริซิโนเลตในปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 80.56 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังประกอบด้วยกรดไขมันชนิดต่างๆ ดังนี้

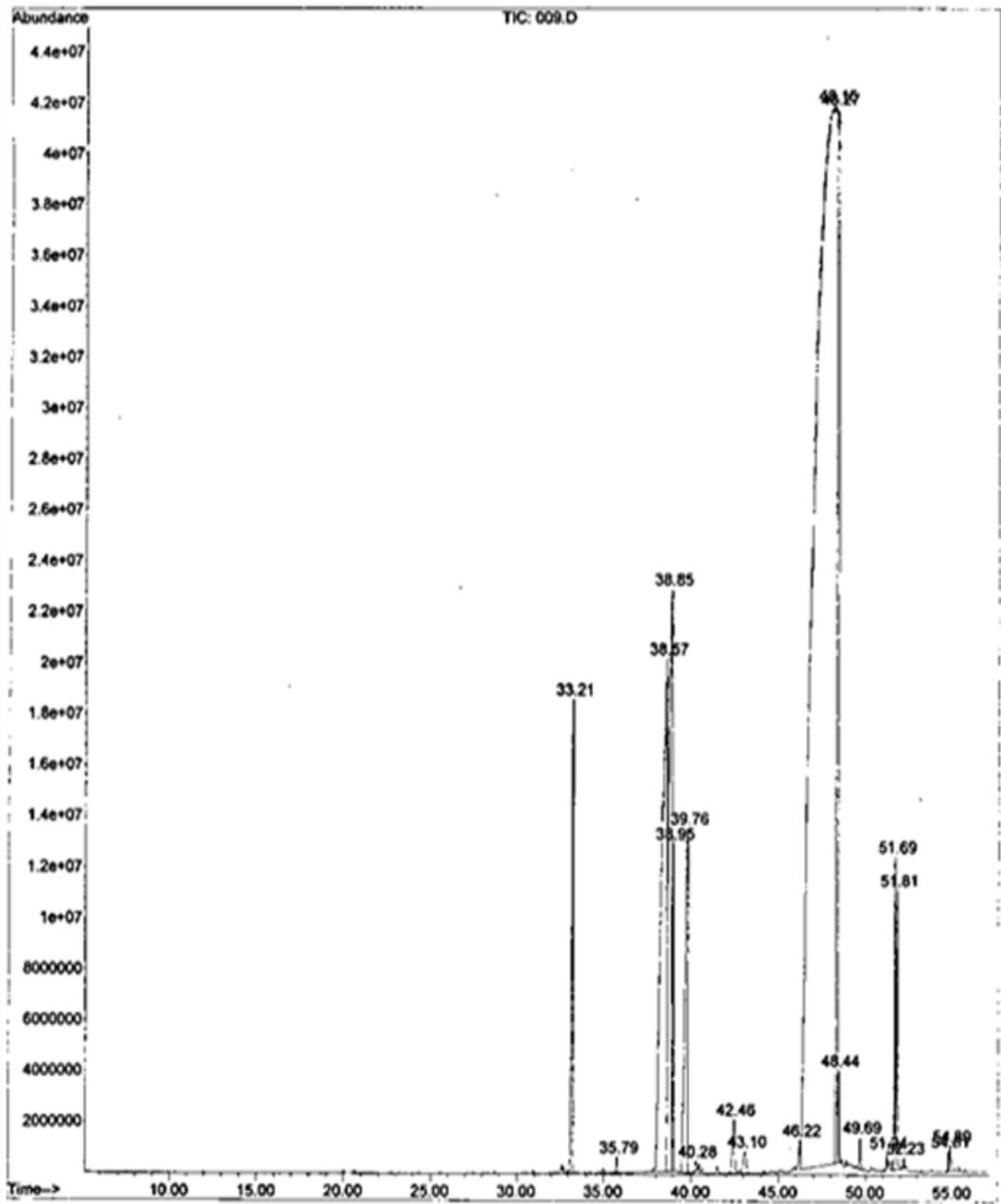
1. กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ได้แก่ hexadecanoic acid, methyl ester 2.11 เปอร์เซ็นต์ 8,11-octadecadienoic acid, methyl ester 2.41 เปอร์เซ็นต์ 10,13-octadecadienoic acid, methyl ester 0.34 เปอร์เซ็นต์ 10,13-octadecadienoic acid, methyl ester 4.59 เปอร์เซ็นต์ 9-octadecenoic acid, methyl ester, (E)- 4.98 เปอร์เซ็นต์ octadecanoic acid, methyl ester 3.02 เปอร์เซ็นต์ 9,12-octadecadienoic acid, methyl ester, (E,E)- 0.35 เปอร์เซ็นต์ 10-

nonadecenoic acid, methyl ester 0.20 เปอร์เซ็นต์ octadecanoic acid, 9,10-dihydroxy-, methyl ester 0.75 เปอร์เซ็นต์ และ 9-Octadecenoic acid (Z)-, 2-hydroxy-1-(hydroxymethyl)ethyl ester 0.19 เปอร์เซ็นต์

2. แอลกอฮอล์ (alcohol) ได้แก่ Z-11-pentadecenol 0.84 เปอร์เซ็นต์

จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าองค์ประกอบหลักที่พบในผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่คือสารเมทิลริซิโนเลเอต โดยเป็นสารประกอบในกลุ่มเอสเทอร์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันละหุ่ง ซึ่งเป็นไตรกลีเซอไรด์ที่พบสารริซิโนเลเอตเป็นองค์ประกอบหลักในการทำปฏิกิริยากับเมทานอล นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าพบองค์ประกอบหลัก (เมทิลริซิโนเลเอต) เท่ากับ 82.53 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่พบองค์ประกอบหลัก (เมทิลริซิโนเลเอต) เท่ากับ 80.56 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่มีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

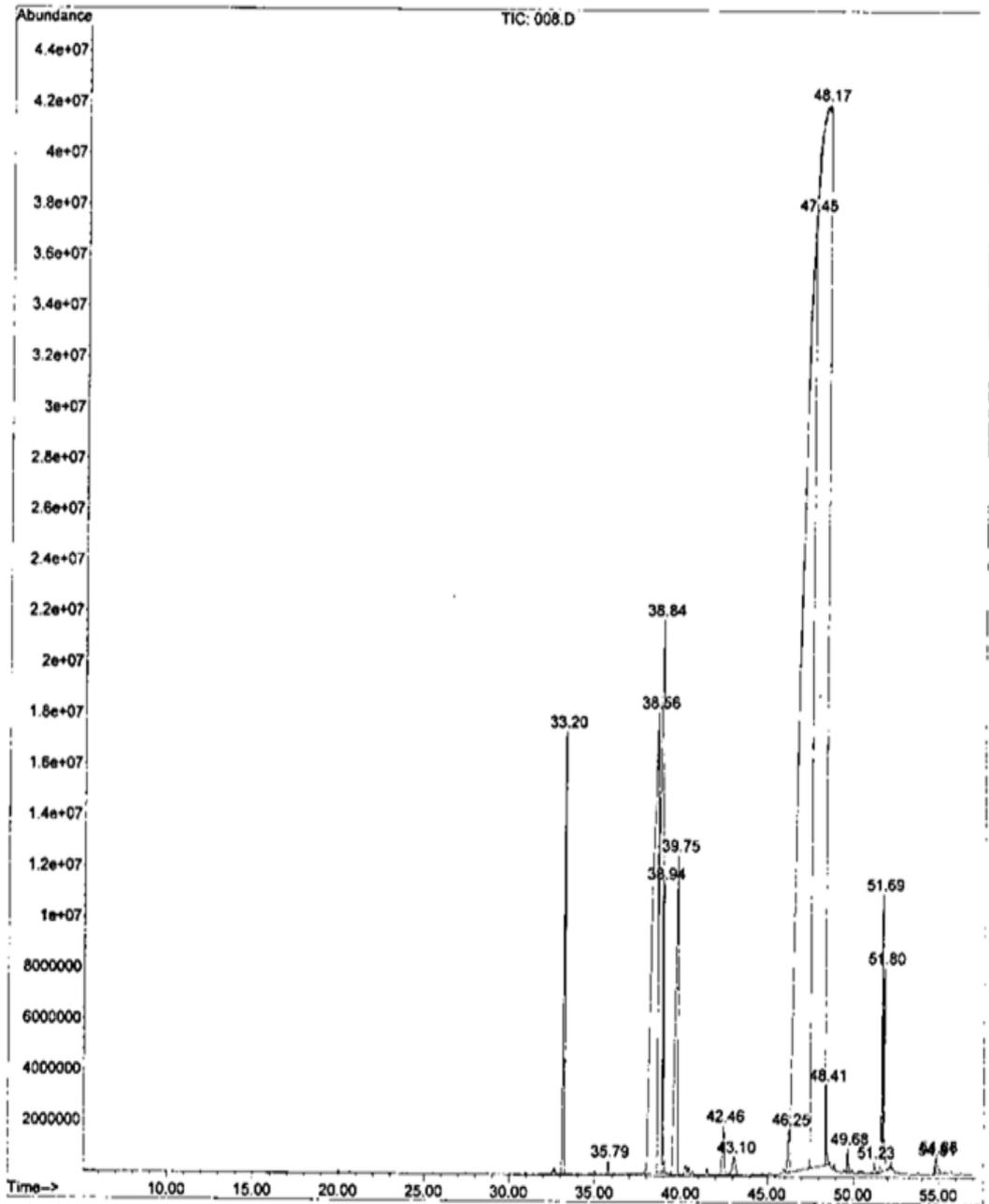


รูป 4.20 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า

ตาราง 4.11 ความน่าจะเป็นขององค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า

R.T.* (min)	ชนิดของสารที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ชั้นน้ำมัน	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)	เปอร์เซ็นต์ ความเหมือน
33.209	Hexadecanoic acid, methyl ester	1.94	98
35.792	Heptadecanoic acid, methyl ester	0.05	97
38.488	10,13-Octadecadienoic acid, methyl ester	4.85	99
38.557	9,12-Octadecadienoic acid, methyl ester	1.57	99
38.845	9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-	4.12	99
39.758	Octadecanoic acid, methyl ester	2.78	99
40.446	9,12-Octadecadienoic acid, methyl ester, (E,E)-	0.03	94
40.671	7,10-Octadecadienoic acid, methyl ester	0.02	83
41.503	9,11-Octadecadienoic acid, methyl ester, (E,E)-	0.04	95
42.454	Z,E-7,11-Hexadecadien-1-yl acetate	0.34	84
43.098	10-Nonadecenoic acid, methyl ester	0.18	99
48.328	Methyl ricinoleate	82.44	94
49.679	Methyl ricinoleate	0.09	81
51.687	Bicyclo[5.2.1]decan-10-one	0.79	45
51.806	Octadecanoic acid, 9,10-dihydroxy-, methyl ester	0.63	91
54.883	cis-9-Hexadecenal	0.14	95

หมายเหตุ * R.T. คือ retention time



รูป 4.21 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่

ตาราง 4.12 ความน่าจะเป็นขององค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่

R.T.* (min)	ชนิดของสารที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ชั้นน้ำมัน	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)	เปอร์เซ็นต์ ความเหมือน
33.208	Hexadecanoic acid, methyl ester	2.11	98
38.319	8,11-Octadecadienoic acid, methyl ester	2.41	99
38.344	10,13-Octadecadienoic acid, methyl ester	0.34	99
38.569	10,13-Octadecadienoic acid, methyl ester	4.25	99
38.845	9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-	4.32	99
38.957	9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-	0.66	99
39.77	Octadecanoic acid, methyl ester	3.02	99
42.46	9,12-Octadecadienoic acid, methyl ester, (E,E)-	0.35	78
43.104	10-Nonadecenoic acid, methyl ester	0.20	99
48.365	Methyl ricinoleate	80.46	94
49.691	Methyl ricinoleate	0.10	93
51.693	Z-11-Pentadecenol	0.84	64
51.818	Octadecanoic acid, 9,10-dihydroxy-, methyl ester	0.75	91
54.883	9-Octadecenoic acid (Z)-, 2-hydroxy-1- (hydroxymethyl)ethyl ester	0.19	95

หมายเหตุ * R.T. คือ retention time

4.6 การศึกษาประเมินมูลค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในเบื้องต้นสำหรับการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกไข่ไก่

สำหรับการประเมินวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ เหลือทิ้ง งานวิจัยนี้ได้พิจารณาจากค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในขั้นตอนการอบแห้งและขั้นตอนการเผาแคลเซียมเปลือกไข่ไก่ โดยมีสถานะการทำงานของอุณหภูมิและเวลาของเตาอบและเตาเผาแคลเซียมดังนี้

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ	100 องศาเซลเซียส
เวลาที่ใช้ในการอบ	24 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลเซียม	900 องศาเซลเซียส
เวลาที่ใช้ในการเผาแคลเซียม	4 ชั่วโมง

การหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้สำหรับการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกไข่ไก่ แสดงดังตาราง 4.13

ตาราง 4.13 พลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้สำหรับการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกไข่ไก่

อุปกรณ์	พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	น้ำหนักเปลือกไข่ไก่ (กรัม)	พลังงานไฟฟ้าต่อน้ำหนักเปลือกไข่ไก่ (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกรัม)
เตาอบ	9.32	1000	0.01
เตาเผา	21.39	30	0.71
	รวม		0.72

จากตาราง 4.13 ซึ่งแสดงข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ต่อหน่วยน้ำหนักของเปลือกไข่ไก่ในกระบวนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ จะเห็นได้ว่าการใช้ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งหมดเท่ากับ 0.72 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกรัมของเปลือกไข่ไก่

โดยเมื่อเผาแคลเซียมเปลือกไข่ไก่จำนวน 30 กรัม จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ 12 กรัม ดังนั้นเมื่อคิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ต่อการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ จะได้ว่า

$$= \frac{0.72 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง}}{\text{กรัมของเปลือกไข่ไก่}} \times \frac{30 \text{ กรัมของเปลือกไข่ไก่}}{12 \text{ กรัมของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่}}$$

$$= 1.80 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกรัมของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่}$$

การประมาณราคาต้นทุนการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำไปวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์นั้นสามารถคำนวณได้จากผลคูณของค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์กับค่าไฟฟ้า ซึ่งอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 150 หน่วยแรก ค่าไฟฟ้าคิดในราคาหน่วยละ 2.76 บาท (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2558) โดยแสดงตามสูตรคำนวณดังนี้

$$\text{Cost} = \text{Energy} \times C$$

เมื่อ

Cost	=	ราคาค่าต้นทุนการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ (บาทต่อกรัมของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่)
Energy	=	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกรัมของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่)
C	=	ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง)

จะได้ว่า

Cost	=	1.80 x 2.76
	=	4.97 บาทต่อกรัมของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่

ดังนั้นต้นทุนการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่คิดเป็นจำนวนเงินได้เท่ากับ 4.97 บาท หรือประมาณ 5 บาทต่อกรัมของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ โดยแคลเซียมออกไซด์ทางการค้ามีราคาอยู่ที่ 10.54 บาท หรือประมาณ 11 บาท เมื่อคิดเทียบต่อหน่วยกรัมของแคลเซียมออกไซด์