



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การเตรียมแคลเซียมออกไซด์ที่มีความเสถียรสูง เพื่อใช้ในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Preparation of Highly Stable CaO Sorbent for CO₂ Capture

นามผู้วิจัย นายเอกวิทย์ อักษรเพือก

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธงไทย วิฑูรย์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์เมตตา เจริญพานิช, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อภิญญา ดวงจันทร์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกูล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเตรียมแคลเซียมออกไซด์ที่มีความเสถียรสูง เพื่อใช้ในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Preparation of Highly Stable CaO Sorbent for CO₂ Capture

โดย

นายเอกรัฐ อักษรเผือก

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสาร อักษรเฟือก 2556: การเตรียมแคลเซียมออกไซด์ที่มีความเสถียรสูง เพื่อใช้ในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชงไทย วิฑูรย์, Ph.D. 65 หน้า

การดูดซับและคายซับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซร้อนได้ ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือการเสื่อมสภาพของตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อจำนวนรอบในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งทำการศึกษากการสังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจลและวิธีตกตะกอน โดยใช้เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) เป็นสารช่วยลดการเกาะตัวกันของอนุภาค และศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง Ca^{2+} : CTAB ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์และประสิทธิภาพในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ขนาดผลึก ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และพื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการสลายตัวทางความร้อน การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การดูดซับด้วยก๊าซไนโตรเจน และทดสอบประสิทธิภาพในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าการเพิ่มปริมาณ CTAB มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ ในกรณีของวิธีโซลเจลพบว่า CTAB ช่วยลดขนาดอนุภาคของอนุภาค ทำให้ได้แคลเซียมออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูง โดยอัตราส่วนของ Ca^{2+} : CTAB ที่ 10: 3.0 ทำให้เกิดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $11.85 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $0.31 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ และเมื่อทดสอบประสิทธิภาพการในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าให้ค่าการผันแปลงสูงสุดที่ 82.4 และ 68.6 เปอร์เซ็นต์ ในรอบแรกและรอบที่ 11 ตามลำดับ ในกรณีของวิธีตกตะกอนพบว่า CTAB ช่วยลดขนาดอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ โดยอัตราส่วน Ca^{2+} : CTAB ที่ 25: 6.0 มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $6.66 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $0.06 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ และเมื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพการในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าค่าการผันแปลงสูงสุดอยู่ที่ 54.60 และ 56.60 เปอร์เซ็นต์ ในรอบแรกและรอบที่ 11 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าอีกว่าการสังเคราะห์ตัวดูดซับด้วยวิธีตกตะกอนทำให้ค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนรอบในการดูดซับและคายซับมากขึ้น หรือที่เรียกว่า “Self-reactivation”

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Akarat Akgornpeak 2013: Preparation of Highly Stable CaO Sorbent for CO₂ Capture. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Thongthai Witoon, Ph.D. 65 pages.

The alternation between uptake and release of CO₂ by CaO sorbents is a promising way for removal of CO₂ from a hot gas stream. The main drawback of this method is the deterioration of CO₂ capture capacity following multiples cycles. This research presents the development of synthetic CaO sorbents via a sol-gel and precipitation methods using cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) as an agglomeration inhibitor. Effect of Ca²⁺:CTAB molar ratios on physical properties of the CaO sorbents as well as their CO₂ capture performance were investigated. Calcination behavior, crystal type and crystallinity, morphology and BET surface area of the obtained products were characterized by means of thermal gravimetric and differential temperature analysis (TG-DTA), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM), and N₂-sorption. The CO₂ uptake – release cycles were carried out using TG unit with high purity CO₂. The addition of CTAB had a significant influence on the physical properties of the CaO sorbents. In case of sol-gel method, the presence of CTAB was found to effectively prevent an agglomeration of CaO particles, and to greatly increase BET surface area and total pore volume of the resulting CaO sorbents. The CaO sorbent prepared via sol-gel method at the Ca²⁺:CTAB molar ratio of 10:3.0 had the highest surface area and total pore volume of 11.85 m²/g and 0.31 cm³/g respectively. It achieved the highest carbonation conversion of 82.42% in the first cycle, and retained an excellent carbonation conversion of 68.63% subsequent to 11 consecutive test cycles. In case of precipitation method, the CTAB could reduce the size of CaO particles. Self-reactivation phenomenon was found for all CaO sorbents prepared via precipitation method. The CaO sorbent prepared at the Ca²⁺:CTAB molar ratio of 25:6.0 exhibited the highest carbonation conversion of 54.60% in the first cycle. Subsequent to 11 consecutive test cycles, the carbonation conversion was almost constant at 56.60%.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและการให้คำแนะนำสั่งสอนจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ในโอกาสที่ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ. ดร.ชงไทย วิฑูรย์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เมตตา เจริญพานิช กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยดูแลเอาใจใส่ในการให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์อย่างดียิ่ง และขอขอบพระคุณ ดร.อนุสรณ์ สืบสาย ประธานการสอบ และ ดร.ชนาธิป สามารถ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่เสียสละเวลาเพื่อเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำแนะนำและแนวคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย

ขอกราบขอพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณ คุณชนาธิป อุทัย คุณสุพัตรา ศรีจิว เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและบุคคลรอบข้างทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และความรู้สึกที่ดีตลอดมา

ประโยชน์อันใดอันจะเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่ คุณพ่อ คุณแม่และคณาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาอบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำต่างๆ จนถึงปัจจุบัน

เอกรัฐ อักษรเฟือก

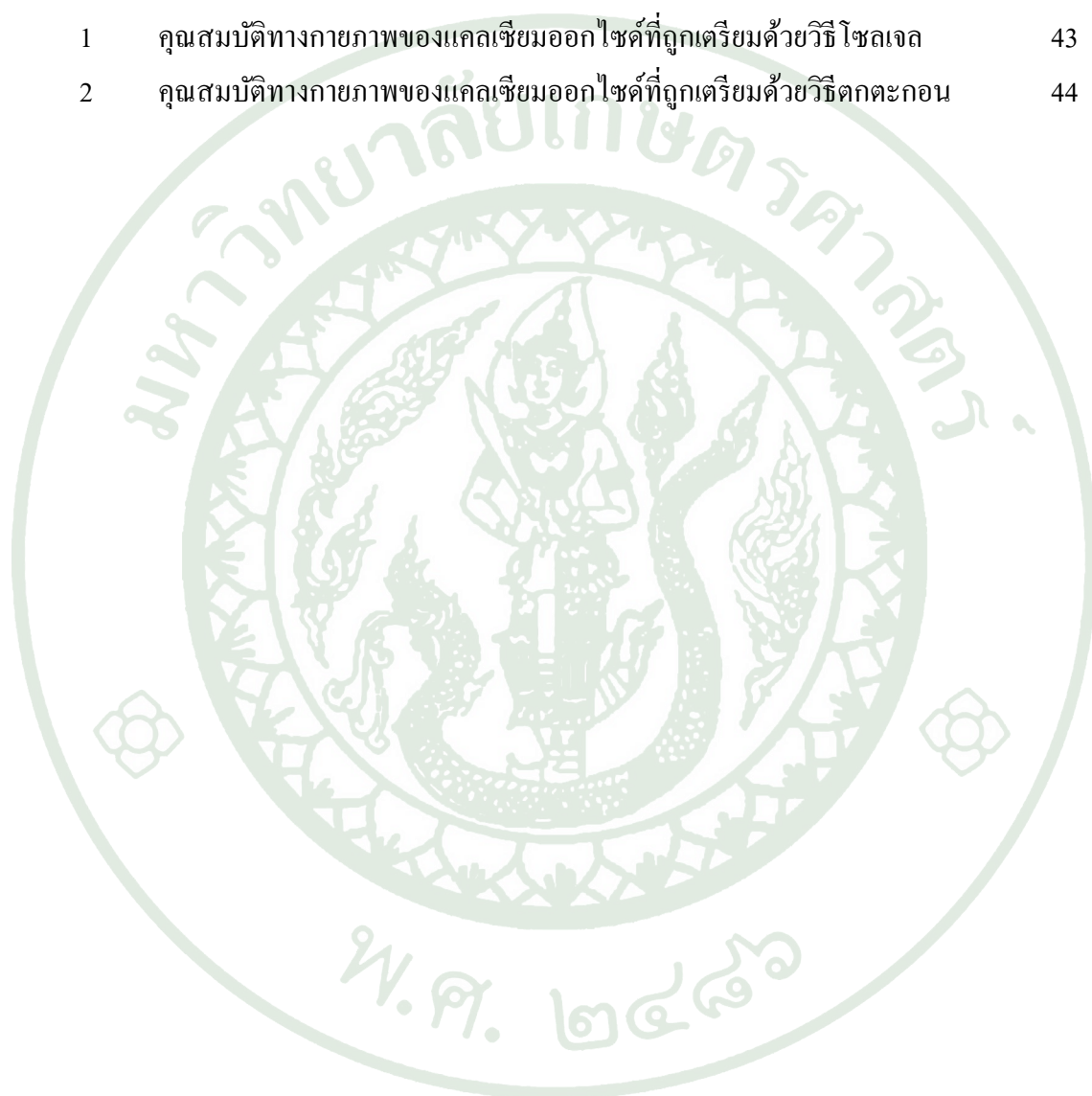
กันยายน 2556

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	26
อุปกรณ์	26
วิธีการ	28
ผลและวิจารณ์	32
สรุปและข้อเสนอแนะ	52
สรุป	52
ข้อเสนอแนะ	53
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	54
ภาคผนวก	61
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	65

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติทางกายภาพของแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกรีดิวซ์ด้วยวิธีโซลเจล	43
2	คุณสมบัติทางกายภาพของแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกรีดิวซ์ด้วยวิธีตกตะกอน	44



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบทวีคูณในระหว่างการปฏิบัติอุตสาหกรรม	5
2	ผลกระทบจากความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออุณหภูมิทั่วโลก	6
3	แผนผังของเทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบต่างๆ เช่น การกักเก็บหลังการเผาไหม้ การกักเก็บก่อนการเผาไหม้ และการกักเก็บหลังจากการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ โดยที่ทุกเทคโนโลยีจำเป็นต้องมีขั้นตอนแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	8
4	แผนผังการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นและแคลซิเนชั่นของหินปูนที่ได้จากธรรมชาติ	10
5	แสดงการผลิตก๊าซชีววมวลและแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาพร้อมๆกัน โดยที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ด้านซ้าย และคายซับออกในเครื่องปฏิกรณ์ด้านขวาโดยเกิดผ่านปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น และแคลซิเนชั่นระหว่างเครื่องปฏิกรณ์	11
6	การนำเสนอในรูปแบบรูปทรงโครงกระดูก	14
7	ผล SEM ของหินปูน Katowice (a) ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ภายใต้อุณหภูมิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ (b) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้อุณหภูมิของก๊าซไนโตรเจน	15
8	การตกตะกอนแบบเปียกของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีการเติมฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	19
9	ค่าการแปลงผันการบดผสมทางกายภาพของแมกนีเซียมออกไซด์กับแคลเซียมออกไซด์ และการสังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างๆ	20
10	การสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส	21
11	แผนผังวิธีการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล	29
12	แผนผังวิธีการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ด้วยวิธีตกตะกอน	30
13	การสลายตัวทางความร้อนของตัวดูดซับแคลเซียมที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจล โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
14	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับอนุหภูมิของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจล โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิ โมล	34
15	การสลายตัวทางความร้อนของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธี ตกตะกอนในปริมาณ CTAB ต่างๆ กัน โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิ โมล (b) 25 มิลลิโมล	35
16	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับอนุหภูมิของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ ถูกเตรียมด้วยวิธีตกตะกอน โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล	35
17	XRD pattern หลังกระบวนการแคลไซน์ของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูก เตรียมด้วยวิธีโซลเจลในปริมาณ CTAB ต่างๆ กัน โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล	36
18	XRD pattern หลังกระบวนการแคลไซน์ของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูก เตรียมด้วยวิธีตกตะกอนในปริมาณ CTAB ต่างๆ กัน โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล	37
19	ขนาดผลึกแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจลในปริมาณ CTAB ต่างๆ กัน โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล	38
20	ขนาดผลึกแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจลในปริมาณ CTAB ต่างๆ กัน โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล	38
21	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวดูดซับแคลเซียม ออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจล ภาพด้านซ้ายใช้ปริมาณแคลเซียม 10 มิลลิ โมลและภาพด้านขวาใช้แคลเซียม 25 มิลลิโมล ที่ปริมาณ CTAB ต่างๆ (a) และ (f) 0 มิลลิโมล, (b) และ (g) 1.5 มิลลิโมล, (c) และ (h) 3.0 มิลลิโมล, (d) และ (i) 4.5 มิลลิโมล, (e) และ (f) 6.0 มิลลิโมล	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ ถูกเตรียมด้วยวิธีตกตะกอน ภาพด้านซ้ายคือปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 10 มิลลิโมล และ ภาพด้านขวาคือปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 25 มิลลิโมล ที่ปริมาณ CTAB ต่างๆ กัน (a) และ (d) 0 มิลลิโมล, (b) และ (e) 1.5 มิลลิโมล, (c) และ (f) 6.0 มิลลิโมล	42
23	การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเทียบกับเวลาของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูก เตรียมด้วยวิธีโซลเจล และถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงทาง น้ำหนัก TGA/DTA เพื่อแสดงถึงเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นและปฏิกิริยาแคล ซิเนชั่นที่มีจำนวน 11 รอบ โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิ โมล	45
24	ค่าการแปลงผันเทียบกับจำนวนรอบที่ใช้ในเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นและ ปฏิกิริยาแคลซิเนชั่นของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจล โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล	48
25	การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเทียบกับเวลาของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูก เตรียมด้วยวิธีตกตะกอน และถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงทาง น้ำหนัก TGA/DTA เพื่อแสดงถึงเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นและปฏิกิริยาแคล ซิเนชั่นที่มีจำนวน 11 รอบ โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิ โมล	49
26	ค่าการแปลงผันเทียบกับจำนวนรอบที่ใช้ในเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นและ ปฏิกิริยาแคลซิเนชั่นของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจล โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล	51
ภาพผนวกที่		
1	XRD pattern หลังกระบวนการแคลไซน์ของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูก เตรียมด้วยวิธีโซลเจล โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 10 มิลลิโมล ไม่มี CTAB	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
2	การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเทียบกับเวลาของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจล และถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงทางน้ำหนัก TGA/DTA เพื่อแสดงถึงเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นและปฏิกิริยาแคลซิเนชั่นที่มีจำนวน 11 รอบ โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 10 มิลลิโมล ไม่มี CTAB	64

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\text{Al}_2(\text{CO}_3)_3$	=	อะลูมิเนียมคาร์บอเนต
CaAc	=	แคลเซียมอะซิเตท
CaCO_3	=	แคลเซียมคาร์บอเนต
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	=	แคลเซียมไฮดรอกไซด์
CaO	=	แคลเซียมออกไซด์
CCS	=	เทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บคาร์บอน
CTAB	=	เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์
MgCO_3	=	แมกนีเซียมคาร์บอเนต
SEM	=	การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
Na_2CO_3	=	โซเดียมคาร์บอเนต
TGA	=	การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน
XRD	=	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การเตรียมแคลเซียมออกไซด์ที่มีความเสถียรสูง เพื่อใช้ในการกักเก็บก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์

Preparation of Highly Stable CaO Sorbent for CO₂ Capture

คำนำ

ปัจจุบันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกๆ ปี และเป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าหาวิธีลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจึงเป็นเรื่องสำคัญ และเร่งด่วนอย่างยิ่งที่ทุกคนต้องตระหนัก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมเพื่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้า การขนส่ง การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ จากการตรวจสอบข้อมูลพบว่าอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นโรงงานที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 5 ของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด (Jos *et al.*, 2011) ส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการผลิตเม็ดปูนซีเมนต์ (clinker) ซึ่งเม็ดปูนซีเมนต์ 1 ตัน จะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาถึง 510 กิโลกรัม ดังนั้นจึงมีนักวิจัยได้มุ่งเน้นที่จะทำการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตเม็ดปูนซีเมนต์ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ และเนื่องจากว่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตเม็ดปูนซีเมนต์ มีอุณหภูมิสูงประมาณ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส จึงจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีที่สามารถแยกก๊าซที่อุณหภูมิสูงได้ เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน โดยไม่ต้องลดอุณหภูมิของก๊าซผสมลง

วิธีที่มีการศึกษากันอย่างแพร่หลายคือ การใช้แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide; CaO) เนื่องจากมีราคาถูกและมีปริมาณมากมายในธรรมชาติ แคลเซียมออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิประมาณ 650 ถึง 700 องศาเซลเซียส เกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate; CaCO₃) ดังสมการ (1)



แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเรียกว่า ปฏิกิริยาแคลซิเนชัน (calcination) เป็นปฏิกิริยาผันกลับของปฏิกิริยา (1) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อจำนวนรอบในการดูดซับและคายซับเพิ่มมากขึ้น สาเหตุมาจากการหลอม

รวมตัวของอนุภาค (sintering) เนื่องจาก 1) กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อนอย่างสูง 2) เกิดการขยายตัวของปริมาตรจากแคลเซียมออกไซด์เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต 3) อุณหภูมิ Tammann ของแคลเซียมคาร์บอเนตต่ำกว่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชันและแคลซิเนชัน (อุณหภูมิที่สูงสุดก่อนเกิดการหลอมรวมกันของอนุภาค) และเมื่อนำแคลเซียมออกไซด์ที่ได้มาจากธรรมชาติมาใช้เป็นตัวดูดซับพบว่าหลังจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชันและแคลซิเนชันจำนวน 50 รอบ มีค่าการแปลงผันเหลือเพียงร้อยละ 7 (Grasa and Abanades, 2006)

จากปัญหาดังกล่าว จึงได้มีนักวิจัยพยายามปรับปรุงคุณภาพของแคลเซียมออกไซด์ให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น โดยศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งวิธีที่นิยมใช้คือวิธีการตกตะกอน เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ง่าย โดยเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตกับเกลือของแคลเซียม จึงได้มีนักวิจัยได้เตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีตกตะกอนและนำมาใช้ศึกษาเป็นตัวดูดซับในการกักเก็บก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าการแปลงผันร้อยละ 32 หลังจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชันและแคลซิเนชันจำนวน 30 รอบ ซึ่งมีความมากกว่าเมื่อใช้แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากธรรมชาติถึง 2 เท่า (Broda *et al.*, 2011) นอกจากนี้มีหลายงานวิจัยได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล (sol-gel) เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำให้สารมีความบริสุทธิ์สูง จึงได้มีนักวิจัยเตรียมแคลเซียมออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจลและนำมาใช้ศึกษาเป็นตัวดูดซับในการกักเก็บก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส โดยปริมาณก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีค่าการแปลงผันร้อยละ 43 หลังจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชันและแคลซิเนชันจำนวน 20 รอบ (Luo *et al.*, 2011) ปัจจุบันนักวิจัยได้พยายามปรับปรุงโครงสร้างของแคลเซียมออกไซด์ด้วยการเติมสารพอลิเมอร์เข้าไป เช่น พลูโรนิค พี123 (Yang *et al.*, 2009) พบว่ารูปร่างของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นทรงกลมและเมื่อนำไปศึกษาการกักเก็บก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์พบว่ามีค่าการแปลงผันมากกว่าร้อยละ 50 หลังจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชันและแคลซิเนชันจำนวน 50 รอบ

งานวิจัยนี้มุ่งทำการศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบวิธีในการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ 2 วิธีคือ วิธีตกตะกอน และวิธีโซลเจล โดยใช้เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียม โบรไมด์ (cetyltrimethyl ammonium bromide; CTAB) เป็นสารช่วยลดการเกาะตัวกันของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ สมบัติทางกายภาพของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2 -sorption) เทคนิคการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (thermal gravimetric analysis; TGA) เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction; XRD) เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM)

และนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลง
ทางน้ำหนัก



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ด้วยวิธีตกตะกอน และวิธีโซลเจล โดยใช้เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์เป็นสารช่วยลดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้
3. เพื่อศึกษาเสถียรภาพของแคลเซียมออกไซด์จากแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

ขอบเขตของงานวิจัย

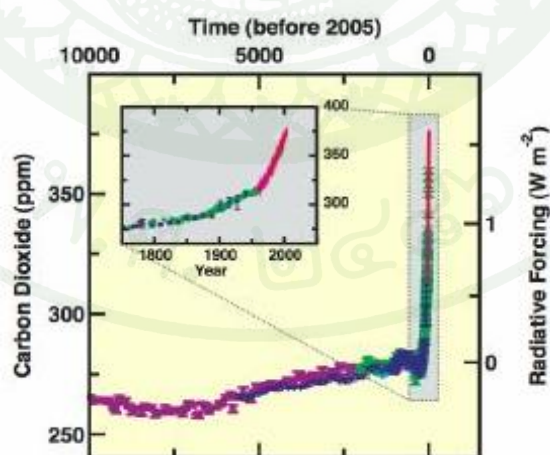
ศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล และวิธีตกตะกอน รวมถึงศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยตัวแปรที่พิจารณาดังนี้

1. อัตราส่วนของแคลเซียม: เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ อยู่ในช่วง [1:0.06] ถึง [1:0.6]
2. ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย thermal gravimetric analysis

การตรวจเอกสาร

1. เทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture and Storage; CCS)

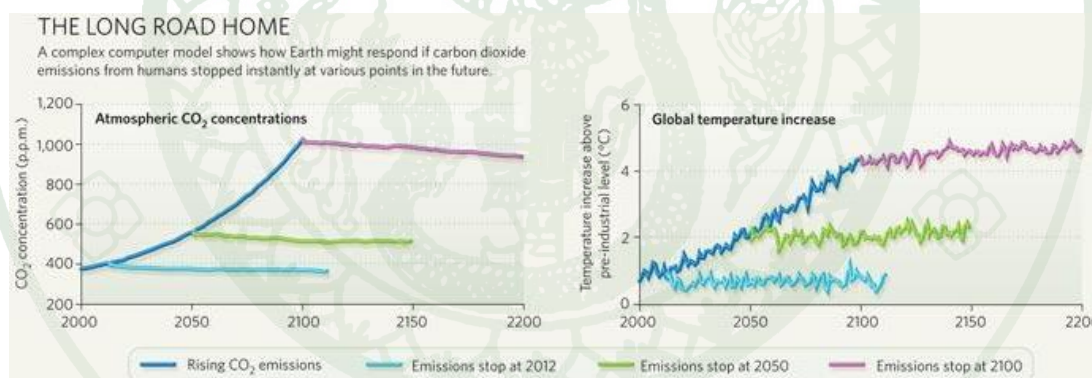
ตามที่คณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2007) ระบุว่ามีความเสี่ยงใหม่ที่ได้จากการสังเกตการณ์ในช่วง 50 ปีที่ผ่านมาพบว่าสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโดยเฉพาะกิจกรรมที่มีการเผาไหม้ น้ำมันและถ่านหิน นอกจากนี้กิจกรรมการใช้ชีวิตประจำวันทั่วไปของมนุษย์ เช่น การขับขี่ยานพาหนะ การใช้เชื้อเพลิงหุงต้ม การใช้พลังงานไฟฟ้า และการตัดไม้ทำลายป่า กิจกรรมต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทั้งสิ้น ซึ่งผลกระทบที่ตามมาสามารถสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ การละลายของธารน้ำแข็งและแผ่นน้ำแข็งในบริเวณขั้วโลก การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล การฟอกขาวของปะการัง ความแห้งแล้งที่ยาวนาน และการลดลงของปริมาณน้ำฝนในทะเลทราย จากข้อมูลดังกล่าวเป็นการยืนยันถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศได้เป็นอย่างดี ผลการวิจัยพบว่าระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จากข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปี ค.ศ. 2005 ระบุว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจากระดับ 280 ส่วนในล้านส่วน เป็นระดับ 375 ส่วนในล้านส่วน (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 การเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบทวีคูณในระหว่างการปฏิวัติอุตสาหกรรม

ที่มา: Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007: Synthesis report (2007)

ข้อมูลจากคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (IPCC, 2007) ระบุว่ามีความจำเป็นที่จะต้องรักษาระดับอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกให้อยู่ในระดับที่ไม่เกิน 2 องศาเซลเซียสเทียบกับยุคก่อนอุตสาหกรรม (United Nation Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 2009) เพื่อป้องกันผลกระทบที่จะเกิดตามมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากกิจกรรมของมนุษย์ (Roger and Pielke, 2009) การรักษาอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ลดการผลิตกระแสไฟฟ้าและการใช้พลังงานเชื้อเพลิงให้น้อยลง รวมถึงลดการตัดไม้ทำลายป่า (Pacala and Socolow, 2004) อย่างไรก็ตาม หากยังคงมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมอย่างต่อเนื่อง ในปี ค.ศ. 2050 จะทำให้ระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่าระดับ 450 ส่วนในล้านส่วน (ภาพที่ 2) ดังนั้นในระยะยาว จึงจำเป็นต้องมีเทคโนโลยีในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และรักษาระดับความเข้มข้นให้ต่ำกว่าระดับ 450 ส่วนในล้านส่วน ในปี ค.ศ. 2100 (Jones, 2009)



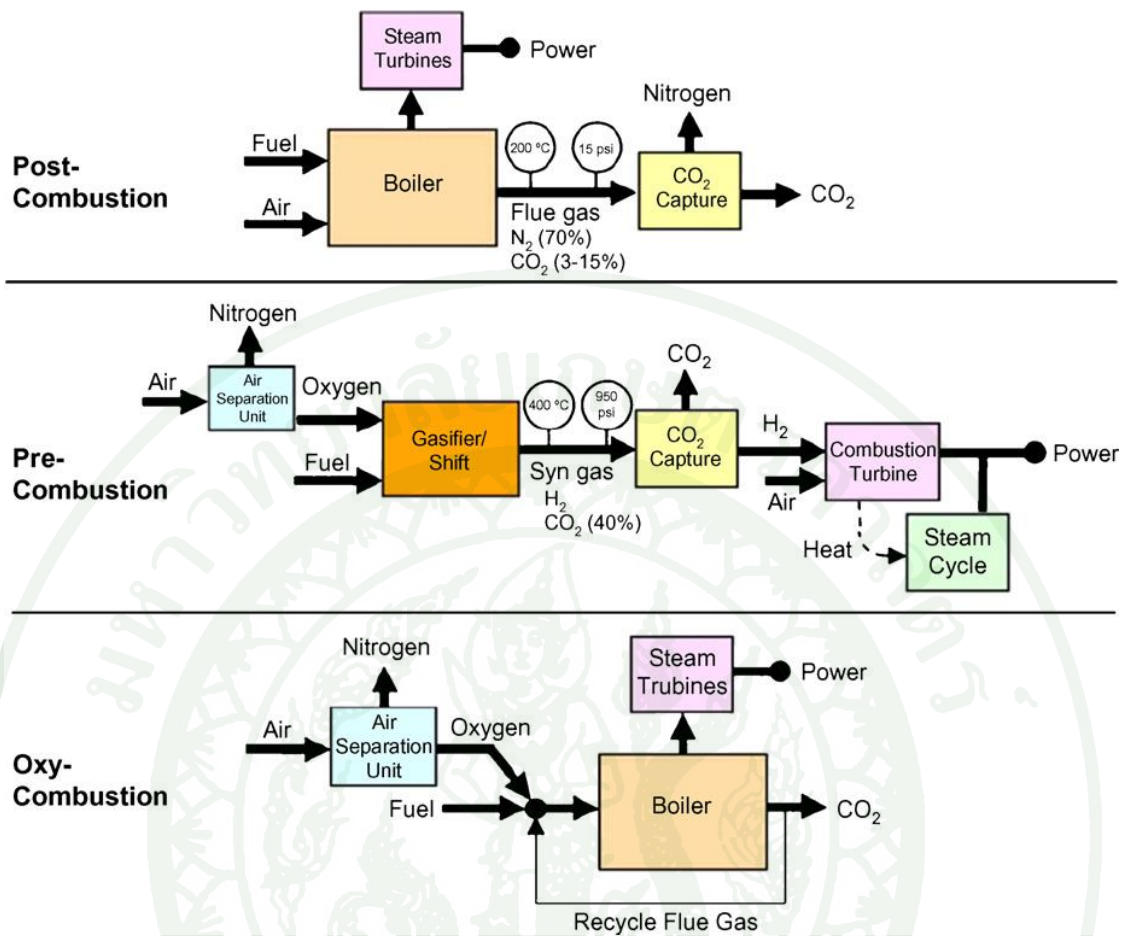
ภาพที่ 2 ผลกระทบจากความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออุณหภูมิทั่วโลก

ที่มา: Monastersky (2009)

2. การกักเก็บคาร์บอนด้วยแคลเซียมออกไซด์และข้อจำกัด (Carbon capture using CaO and its limitations)

ในรายงานพิเศษของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเกี่ยวกับเทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถจำแนกประเภทการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกเป็น 3 วิธี คือ การกักเก็บหลังการเผาไหม้ การกักเก็บก่อนการเผาไหม้ และ

การกักเก็บหลังจากการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ ทุกประเภทมีขั้นตอนในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากอากาศหรือปล่องไอเสีย (ภาพที่ 3) ขั้นตอนการแยกสามารถแบ่งออกเป็นหลายเทคนิคอาทิเช่น เทคนิคการดูดซึม (absorption) เทคนิคการดูดซับ (adsorption) เทคนิคไครโอเจนิค (cryogenics) และเทคนิคการเลือกผ่านโดยใช้เมมเบรน (membrane) เป็นต้น (Yang *et al.*, 2008) ในงานวิจัยนี้ เทคนิคที่ใช้คือ เทคนิคการดูดซับ วัสดุที่ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ ซิลิกา ซีโอไลท์ ถ่านกัมมันต์ และอะลูมินา เป็นต้น โดยคุณสมบัติของตัวดูดซับที่ดีมีอยู่ 5 อย่าง คือ 1) ต้องมีความจำเพาะเจาะจงในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง 2) มีปริมาณการดูดซับสูง 3) มีสมบัติเชิงกลดี 4) มีความเสถียรเมื่อจำนวนรอบในการดูดซับและคายซับเพิ่มมากขึ้น 5) ใช้พลังงานในการทำรีเจนเนอเรชั่นที่ต่ำ (Yong *et al.* 2008) ในปัจจุบันแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide; CaO) ถูกนำมาใช้ในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น เนื่องจากความสามารถในการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น เช่น ซีโอไลท์ หรือตัวดูดซับที่ได้จากคาร์บอนชนิดอื่นๆ (Anthony, 2011)



ภาพที่ 3 แผนผังของเทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบต่างๆ เช่น การกักเก็บหลังการเผาไหม้ การกักเก็บก่อนการเผาไหม้ และการกักเก็บหลังจากการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ โดยที่ทุกเทคโนโลยีจำเป็นต้องมีขั้นตอนแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ที่มา: Figueroa (2008)

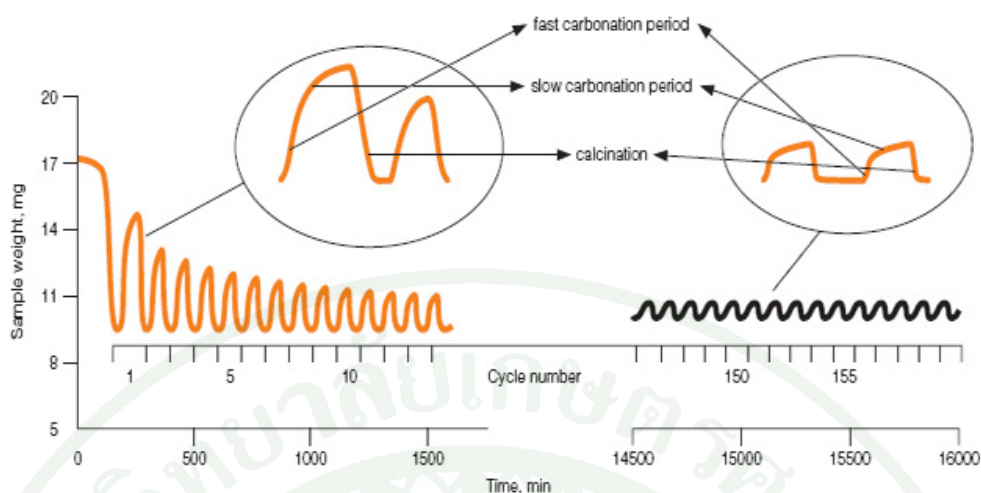
แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate; CaCO₃) เป็นหนึ่งในวัตถุดิบที่มีมากบนโลก สามารถพบได้ในหินเช่น หินปูน ชอล์ก และ โครงกระดูกหรือเปลือกหอยของสิ่งมีชีวิตในทะเลต่างๆ รวมทั้งกล้วยไม้ และแพลงก์ตอน ระบบโครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตมี 4 ประเภท โดยเรียงตามลำดับความเสถียรคือ 1) แคลไซต์ (calcite) เป็นโครงสร้างผลึกที่พบมากที่สุดและมีการจัดเรียงระบบโครงสร้างเป็นแบบไตรโกนอล-รอมโบฮีดรอล (trigonal-rhombohedral) รูปผลึกที่พบส่วนใหญ่เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน 2) อะราโกไนท์ (aragonite) มีการจัดเรียงระบบโครงสร้างเป็นแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) รูปผลึกเป็นแบบแท่งยาว ปลายเรียวแหลมเหมือนแท่งดินสอแบบผลึกเบนมีหน้าตัดตรงปลายบนและล่างเหมือนรูปจั่ว หรือพบแบบผลึกแผ่น มีรูปหน้าตัดคล้าย

หกเหลี่ยม มีความยาวคล้ายแก้ว 3) วาเทอร์ไรต์ (vaterite) มีการจัดเรียงระบบโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) และ 4) แคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่มีการจัดเรียงตัวที่แน่นอน แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการสังเคราะห์จะมีระบบโครงสร้างของผลึกที่แตกต่างกันไป โดยจะขึ้นอยู่กับภาวะอ้อมตัวยิ่งยวด อุณหภูมิ สารเติมแต่ง และสิ่งเจือปน (Mullin, 2001) เมื่อได้รับความร้อนแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดสลายตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์และมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เรียกว่า ปฏิกิริยาแคลซิเนชัน (calcination) แสดงดังสมการที่ (2)



ปฏิกิริยาผันกลับของสมการที่ (2) เรียกว่าปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน (carbonation) ตามทฤษฎีแคลเซียมออกไซด์หนึ่งโมเลกุล สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้หนึ่งโมเลกุล และเกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตหนึ่งโมเลกุล ในทางปฏิบัติแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถสลายตัวจนเกิดเป็นแคลเซียมออกไซด์อย่างสมบูรณ์ได้ แต่ในครั้งต่อไปแคลเซียมคาร์บอเนตจะไม่เกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์เมื่อจำนวนรอบในการดูดซับและคายซับเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้อุณหภูมิเกิดการรวมตัวได้ง่าย

กลไกในการเกิดปฏิกิริยาของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน (ภาพที่ 4) คือ ขั้นตอนแรกปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วมาก เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าทำปฏิกิริยาที่ผิวของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ หลังจากนั้นปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นช้าลง เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการแพร่ผ่านชั้นของแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนแล้วเข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ที่อยู่ภายในอนุภาค

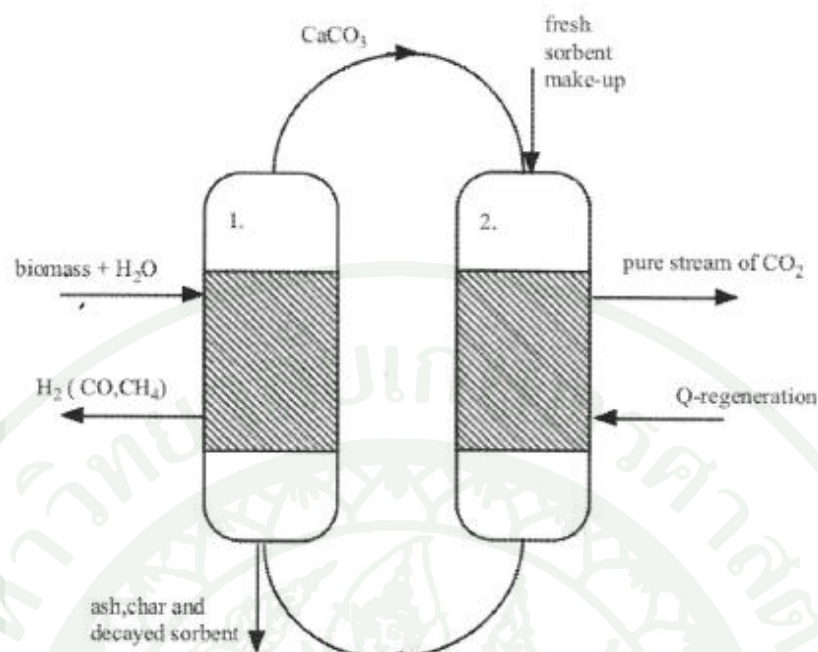


ภาพที่ 4 แผนผังการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและแคลซิเนชันของหินปูนที่ได้จากธรรมชาติ

ที่มา: Grasa and Abandes (2006)

ปัจจัยสำคัญในการควบคุมความเร็วของปฏิกิริยา คือ ความหนาของชั้นแคลเซียมคาร์บอเนต (Abanades and Alvarez, 2003, 2005) และความเร็วเวลาในการเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วจะมีค่าน้อยลง เมื่อจำนวนรอบในการดูดซับและคายซับเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลงจากการหลอมรวมตัวกันของแคลเซียมคาร์บอเนต (Borgwardt, 1989)

การกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์สามารถนำมาใช้ในกระบวนการต่างๆ ได้เช่น การกักเก็บหลังการเผาไหม้ การกักเก็บก่อนการเผาไหม้หรือระบบกักเก็บพลังงานความร้อน (Lin *et al.*, 2012; Moghtaderi, 2012) รวมถึงกระบวนการที่ใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งคาดว่าจะเติบโตอย่างมีนัยสำคัญในอนาคต (Mansilla, 2012) ดังนั้นจึงสามารถนำการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาประยุกต์ใช้งานได้ นอกจากนี้แคลเซียมออกไซด์ถูกนำมาใช้ในเครื่องดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ เพื่อใช้สำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ (Harrison *et al.*, 2008) และชีวมวล (Florin and Harris, 2008a) รวมถึงการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการไพโรไลซิสของเซลลูโลส (Florin and Harris, 2008b; Widyawati *et al.*, 2011) นอกจากการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้วยังสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวของน้ำมันจากกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวล และเป็นตัวดูดซับที่มีความสามารถสูงในกระบวนการผลิตก๊าซจากชีวมวลได้อีกด้วย (Han *et al.*, 2010) จากแผนผังแสดงให้เห็นถึงเครื่องปฏิกรณ์ที่มีส่วนร่วมในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างการผลิตชีวมวล แสดงดังภาพที่ 5 (Florin and Harris, 2007)



ภาพที่ 5 แสดงการผลิตก๊าซชีววมวลและแยกก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ออกมาพร้อมๆกัน โดยที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ด้านซ้าย และคายซับออกในเครื่องปฏิกรณ์ด้านขวาโดยเกิดผ่านปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น และแคลซิเนชั่นระหว่างเครื่องปฏิกรณ์

ที่มา: Florin and Harris (2007)

การเลือกตัวดูดซับเพื่อใช้ในการกักเก็บก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญและมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องเช่น ตัวดูดซับต้องมีความเสถียรต่อความร้อน มีความเสถียรต่อสารเคมี ปริมาณรูพรุนสูง ตัวดูดซับที่เริ่มใช้งานคือหินปูนเนื่องจากมีอยู่มากในธรรมชาติจึงนิยมนำมาใช้และเป็นแหล่งที่มาหลักของแคลเซียมออกไซด์ แต่อย่างไรก็ตาม ตัวดูดซับจากธรรมชาติให้ค่าการแปลงผันที่ต่ำ เมื่อจำนวนรอบในการดูดซับและคายซับเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงตัวดูดซับด้วยการสังเคราะห์ให้มีลักษณะ โครงสร้างเฉพาะเจาะจงและเหมาะสมสำหรับใช้ในการกักเก็บก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ การสังเคราะห์จึงเริ่มได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพื่อให้ประสิทธิภาพของตัวดูดซับดีขึ้น (Grasa *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2009; Luo *et al.*, 2012) แต่ในปัจจุบันยังไม่มีตัวดูดซับทั้งที่ได้จากธรรมชาติและที่การสังเคราะห์ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็ว มีความเสถียรและคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

3. การปรับปรุงความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์ (Enhancing the reactivity of CaO)

การใช้แคลเซียมออกไซด์ในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กำลังได้รับความสนใจ และในปัจจุบันได้มีการนำร่องในระดับโรงงานอุตสาหกรรมแล้ว ได้แก่ งานวิจัยแคลเซียมออกไซด์ในสเปน และการลดการปลดปล่อยมลพิษจากโรงงานไฟฟ้าใน Darmstadt University of Technology ที่เยอรมนี เป็นต้น เรื่องที่สำคัญและท้าทายคือการหาโครงสร้างหรือองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์เพื่อใช้สำหรับการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เกิดประสิทธิภาพ และความเสถียรมากที่สุดเมื่อจำนวนการดูดซับและคายซับมากขึ้น และต้องคุ้มค่ากับการลงทุนในโรงงานอุตสาหกรรมอีกด้วย

ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์ลดลง มีสาเหตุมาจากการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบริเวณรูพรุน พื้นผิว รวมถึงขนาดอนุภาค โดยเฉพาะอนุภาคที่มีขนาดเล็กและรูพรุนที่มีขนาดอยู่ \square ในช่วง 2 ถึง 50 นาโนเมตร (Sun *et al.*, 2007) โดยทั่วไปหินปูนที่ได้จากธรรมชาติสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียง 8 เปอร์เซ็นต์ (Grasa *et al.*, 2006) หลังจากเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและปฏิกิริยาแคลซิเนชันจำนวน 50 รอบ เนื่องจากการกระจายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกัน ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ และสารเจือปน เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Anthony *et al.*, 2011) ทำให้เกิดการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคได้ง่าย ข้อจำกัดของแคลเซียมออกไซด์ที่เกิดจากการหลอมรวมตัวกันของอนุภาค สิ่งเจือปน และการสึกกร่อนของฟลูอิดไชน์เบด (Stanmore and Gilot, 2005; Blamey *et al.*, 2010; Anthony *et al.*, 2011)

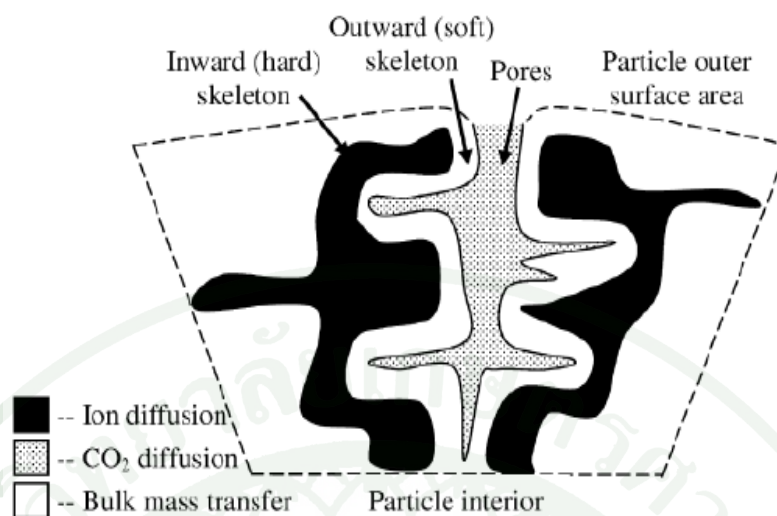
เทคนิคการปรับปรุงความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและความเสถียรของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น การปรับสภาพด้วยไอน้ำเพื่อเปลี่ยนแปลงรูพรุนและขนาดอนุภาค การปรับสภาพด้วยความร้อนเพื่อปรับปรุงความเสถียรภาพทางความร้อน การเติมโลหะอื่นๆ เข้าไปในโครงสร้างของแคลเซียมออกไซด์เพื่อปรับปรุงความเสถียรทางความร้อนและการปรับปรุงเทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวดูดซับเพื่อควบคุมให้เกิดลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของอนุภาคที่ต้องการ เพื่อให้เกิดการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด นอกจากนี้ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์สามารถประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตก๊าซชีววมวลได้อีกด้วย (Hughes *et al.*, 2004; Florin and Harris, 2008a) ในปัจจุบันนักวิจัยได้มุ่งเน้นถึงการปรับปรุงความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา และความเสถียรเมื่อจำนวนการดูดซับและคายซับมากขึ้นรวมถึงสังเคราะห์ได้ง่ายและมีค่าใช้จ่ายน้อยลง

3.1 การปรับสภาพด้วยไอน้ำ (Steam hydration)

การปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยที่ไอน้ำจะเข้าไปเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุน ทำให้เกิดการแตกของพื้นผิว ส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้น รวมถึงปรับปรุงความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและความเสถียรของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ Blamey *et al.* (2010) แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณไอน้ำจาก 16 เปอร์เซ็นต์เป็น 36 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเกิดการขยายและการแตกของของอนุภาคในฟลูอิดซ์เบด

3.2 การปรับสภาพด้วยความร้อน (Thermal pretreatment)

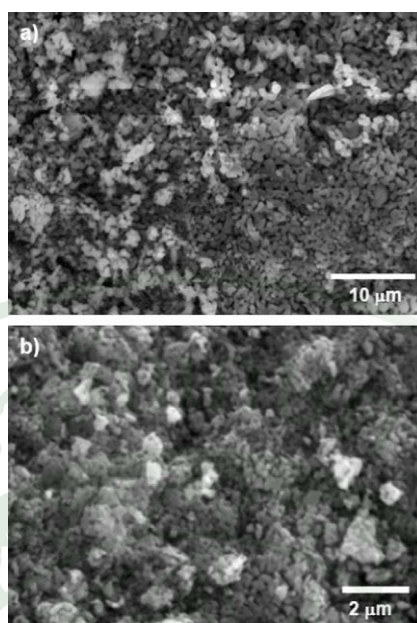
การปรับสภาพด้วยความร้อนของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์เป็นงานวิจัยที่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย มีการศึกษาถึงอุณหภูมิของการปรับสภาพด้วยความร้อน (800 ถึง 1,300 องศาเซลเซียส) และช่วงเวลาของการปรับสภาพด้วยความร้อน (6 ถึง 48 ชั่วโมง) ภายใต้สภาวะของก๊าซไนโตรเจน ตัวดูดซับที่เตรียมได้ถูกนำมาทดสอบการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิคาร์บอนชั้น 800 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 50 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 30 นาที ส่วนปฏิกิริยาแคลซิเนชัน ใช้ปริมาณก๊าซไนโตรเจน 100 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 10 นาที จากงานวิจัยของ Manovic and Anthony (2008) พบว่าการปรับสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 24 ชั่วโมง ทำให้เกิดปรากฏการณ์ self-reactivation กล่าวคือให้ค่าการแปลงผันมากขึ้น เมื่อจำนวนรอบในการดูดซับและคายซับเพิ่มมากขึ้น และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพด้วยความร้อน พบว่าตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วยความร้อนมีค่าการแปลงผันสูงกว่า 1.325 เท่า โดยรอบที่ 30 มีค่าการแปลงผันมากถึงร้อยละ 53 ดังนั้นจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพด้วยความร้อนเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ได้ ซึ่งสามารถอธิบายการปรับสภาพด้วยความร้อนโดยนำเสนอในรูปแบบรูพรุน โครงกระดูก (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 6 การนำเสนอในรูปแบบรูพรุนโครงกระดูก

ที่มา: Manovic and Anthony (2008)

Manovic *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสภาวะแคลซิเนชันที่มีต่อโครงสร้างของตัวดูดซับ โดยใช้ตัวดูดซับ 2 ชนิดคือ หินปูน Havelock และหินปูน Katowice เพื่อใช้ในการศึกษาสภาวะแคลซิเนชัน 2 สภาวะคือ 1) ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่ำ 2) ภายใต้สภาวะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง จากภาพที่ 7 เป็นการนำตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์มาทดสอบภายใต้สภาวะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าขนาดเกรนของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์มีการขยายตัวมากขึ้น และรวมตัวกันอย่างหนาแน่นของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์เกิดการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคได้ง่าย โดยเฉพาะในบริเวณที่มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์อยู่ในปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของตัวดูดซับ ดังนั้นในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง ภายใต้สภาวะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ขนาดเกรนของแคลเซียมออกไซด์ขนาดใหญ่ขึ้น และเกิดการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ได้ง่าย เนื่องจากสิ่งเจือปนและความหนาแน่นของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ จากผลการทดสอบการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง TGA ที่อุณหภูมิแคลซิเนชัน 800 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน 100 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีของหินปูน Havelock พบว่ามีค่าแปลงผันสูงกว่าสภาวะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และในกรณีหินปูน Katowice พบว่าภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจนมีค่าแปลงผันสูงกว่าภายใต้สภาวะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หลังจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนชันและแคลซิเนชันจำนวน 9 รอบ



ภาพที่ 7 ผล SEM ของหินปูน Katowice (a) ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ (b) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน

ที่มา: Manovic (2009)

Manovic *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษาการปรับสภาพด้วยความร้อนของหินปูนจากธรรมชาติ โดยใช้หินปูน 3 ชนิดคือ Kelly Rock (300 ถึง 425 ไมโครเมตร) La Blanca (400 ถึง 600 ไมโครเมตร) และ Katowice (400 ถึง 800 ไมโครเมตร) เพื่อนำมาศึกษาเป็นตัวดูดซับในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สภาวะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 100 เปอร์เซ็นต์ และทำการปรับสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าการปรับสภาพด้วยความร้อนของหินปูน La Blanca ให้ค่าการแปลงผันต่ำกว่าหินปูน Kelly Rock และหินปูน Katowice หลังจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นและแคลซิเนชั่นจำนวน 5 รอบ (Manovic *et al.*, 2008) และจากการศึกษาองค์ประกอบธาตุของหินปูน La Blanca พบว่าในองค์ประกอบมีธาตุโซเดียมเป็นปริมาณมาก ส่วนธาตุซิลิกอนและธาตุลูมิเนียมมีอยู่ในปริมาณน้อย นอกจากนี้จากการทดลองพบว่าปริมาณธาตุโซเดียมเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการหลอมรวมตัวกันของอนุภาค และสูญเสียความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เมื่อจำนวนรอบในการดูดซับและคายซับเพิ่มมากขึ้น ส่วนธาตุลูมิเนียมในหินปูน La Blanca ทำให้ค่าการแปลงผันมากขึ้น และส่งผลให้เกิดปฏิกิริยา self-reactivation ดังนั้นองค์ประกอบทางเคมีของหินปูนเป็นเรื่องที่สำคัญที่ต้องพิจารณา เนื่องจากสามารถกำหนดลักษณะการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะต่างๆ ที่ใช้งานได้

ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการสลายตัวของอนุภาคหินปูน (0.25 ถึง 0.5 มิลลิเมตร) ในสภาวะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถูกนำมาทดสอบการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรซ์ Wang *et al.* (2007) ทำการศึกษาอุณหภูมิแคลซิเนชันจาก 920 องศาเซลเซียส ถึง 1,020 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 นาที ภายใต้สภาวะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่าอัตราการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ 920 และ 1,020 องศาเซลเซียส ให้ค่าการแปลงผันร้อยละ 73 และ 95 ตามลำดับ

3.3 วิธีในการสังเคราะห์ (Synthesis methods)

ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากธรรมชาติเช่น หินปูน ไลโดไม เมื่อพิจารณาถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในปัจจุบันพบว่าตัวดูดซับมีปริมาณไม่เพียงพอกับความต้องการ ดังนั้นการสังเคราะห์จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ การสังเคราะห์มีข้อดีคือสามารถที่จะกำหนดลักษณะทางกายภาพ ความพรุน และพื้นที่ผิว (Grasa *et al.*, 2007; Khan and Smirniotis, 2008) รวมถึงการปรับปรุงความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและความเสถียรเมื่อจำนวนการดูดซับและคายซับมากขึ้น ซึ่งการสังเคราะห์ตัวดูดซับด้วยวิธีดั้งเดิมเช่น การตกตะกอน การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แต่ในปัจจุบันเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรไลซิส การเติมโลหะเนื้อเยื่อ รวมถึงการเติมสารพอลิเมอร์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เพื่อให้เกิดการสังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

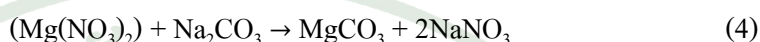
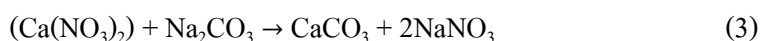
3.3.1 การผสมทางเคมี (Chemical mixing)

การผสมทางเคมีเพื่อให้ได้ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ สามารถสังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนและการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

3.3.1.1 การตกตะกอน (Precipitation)

การตกตะกอนเป็นเทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ โดยตัวดูดซับจะอยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) แมกนีเซียมคาร์บอเนต (magnesium carbonate; MgCO_3) และอะลูมิเนียมคาร์บอเนต (ammonium carbonate; $\text{Al}_2(\text{CO}_3)_3$) ในการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมคาร์บอเนต สามารถทำได้โดยการละลายเกลือของโลหะแคลเซียม และเกลือของโลหะแมกนีเซียม ในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (sodium

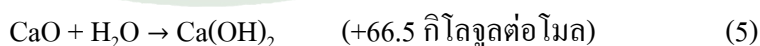
carbonate; Na_2CO_3) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต และตะกอนแมกนีเซียมคาร์บอเนตและเกิดผ่านปฏิกิริยา (3) และ (4) ตามลำดับ (Pacciani *et al.*, 2008)



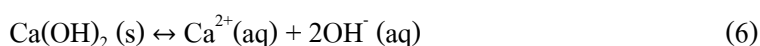
ในขณะที่เกี่ยวกับการเกิดตะกอนอลูมิเนียมคาร์บอเนตสามารถทำได้เหมือนกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ส่วนประกอบของตะกอนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของสาร (Schwarz *et al.*, 1995) หลังจากมีตะกอนเกิดขึ้นควรทำการกวาดอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ เพื่อให้เกิดตะกอนอย่างทั่วถึงทุกบริเวณ การตกตะกอนต้องตั้งสารละลายทิ้งไว้ให้เกิดตะกอนในเวลาที่เหมาะสม โดยระยะเวลานั้นจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของการเกิดตะกอนด้วย หลังจากนั้นนำตะกอนล้างด้วยน้ำหลายๆ ครั้ง เพื่อเป็นการชะไอออนอื่นๆ เช่น โซเดียมไอออน (Pacciani *et al.*, 2008) ไนเตรตไอออน และคลอไรด์ไอออน หลังจากนั้นนำไปอบแห้ง และนำไปเผาเพื่อให้แคลเซียมคาร์บอเนตเกิดการสลายตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์

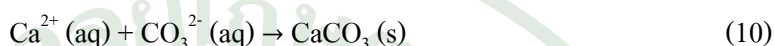
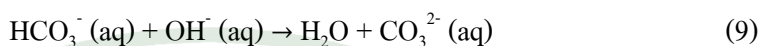
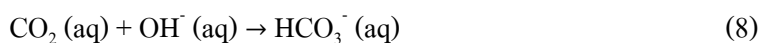
3.3.1.2 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของแคลเซียมออกไซด์ (Hydrolysis of CaO)

ในการสังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์สามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งหนึ่งในนั้นคือการให้ความร้อนกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide; $\text{Ca}(\text{OH})_2$) เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกไป (Pacciani *et al.*, 2008) และนอกจากนี้แคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับกระบวนการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตได้อีกด้วย (Li *et al.*, 2005)



ซึ่งกระบวนการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตแสดงในสมการ (6), (7), (8), (9) และ (10)

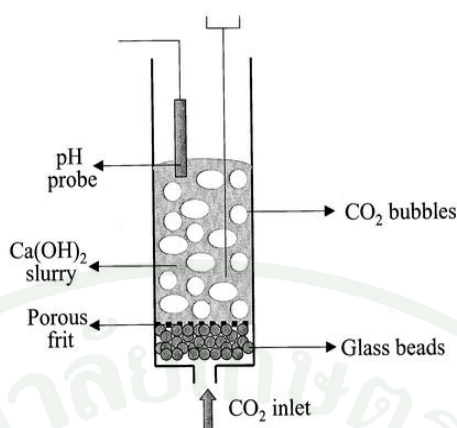




ขั้นตอนการละลายของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือขั้นตอนการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนใหญ่เป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยา ในขณะที่ขั้นตอนการดูดซึมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากปฏิกิริยา (9) และ (10) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Juvekar and Sharma, 2008)

3.3.1.3 การตกตะกอนด้วยวิธีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Precipitation of CaCO_3 by bubbling CO_2)

เพื่อให้แน่ใจว่าเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตอย่างสมบูรณ์ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ การเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงถูกนำเข้ามาใช้งาน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกป้อนเข้ามาทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ (ภาพที่ 8) โดยที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ในรูปของคาร์บอเนตไอออนตามสมการ (8) และ (9) โดยแคลเซียมไอออนเกิดจากการละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ การสังเคราะห์ตัวดูดซับด้วยวิธีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถูกอธิบายโดย (Agnihotri *et al.*, 1999; Gupta and Fan, 2002; Dasgupta *et al.*, 2008; Florin and Harris, 2008c)

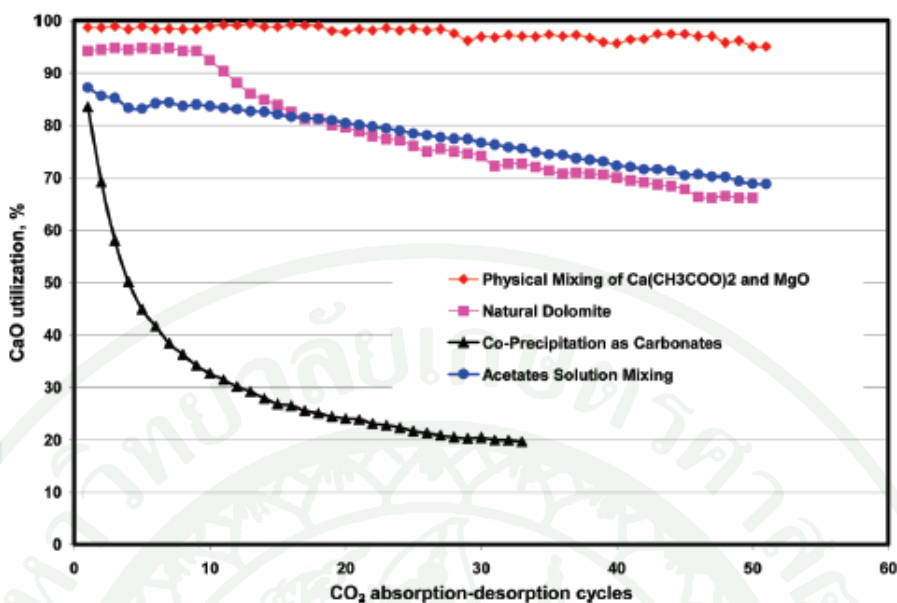


ภาพที่ 8 การตกตะกอนแบบเปียกของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ที่มา: Gupta and Fan (2002)

3.3.2 การผสมทางกายภาพ (Physical mixing)

วิธีการผสมทางกายภาพที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์คือ บอลมิลล์ (Ball mill) เป็นการบดสารตัวอย่างให้เป็นผงละเอียดและให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว Li *et al.*, (2009) ได้ทำการสังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยบอลมิลล์ และศึกษาในสภาวะเปียกและแห้ง แคลเซียมอะซิเตท (Calcium acetate; CaAc) ถูกนำมาบดผสมกับแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยบอลมิลล์ และนำไปเผา (ภาพที่ 9)



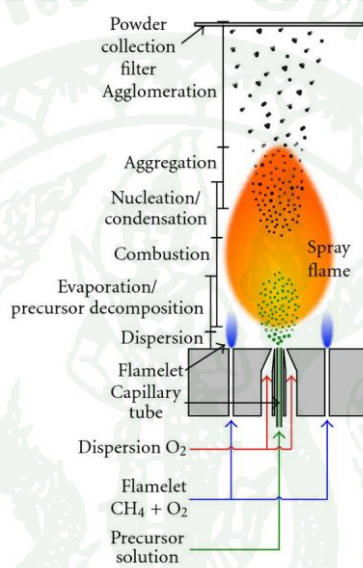
ภาพที่ 9 ค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการบดผสมทางกายภาพของแมกนีเซียมออกไซด์กับแคลเซียมออกไซด์ และการสังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างๆ

ที่มา: Li (2009)

3.3.3 เฟลมสเปรย์ไพโรไลซิส (Flame spray pyrolysis)

เทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรไลซิส เป็นเทคนิคใหม่ที่เริ่มใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เป็นเทคนิคที่สามารถผลิตอนุภาคระดับนาโนที่มีความบริสุทธิ์สูง (Mueller *et al.*, 2006) เสถียรทางความร้อน และสามารถที่จะควบคุมขนาดอนุภาคได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ และสภาวะที่เหมาะสมในระบบการสังเคราะห์ด้วย ปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ เช่น การเลือกใช้ชนิดของสารเคมีตั้งต้น การใช้แก๊สที่มีความเหมาะสมในการเผาไหม้ ตัวทำละลายที่มีค่าเอนโทรปีของการเผาไหม้ที่ดี การควบคุมสนามไฟฟ้าระหว่างการสังเคราะห์ รวมไปถึงการเลือกเงื่อนไขของความเร็วในการไหลของสารละลาย ซึ่งจะมีผลต่อขนาดความสูงของเปลวไฟ เป็นต้น ขั้นตอนของการก่อตัวเป็นอนุภาคเริ่มจากสารละลายตั้งต้นจะถูกทำให้เป็นละอองภายในผนังที่มีความร้อนของเรื่องปฏิกรณ์ (ภาพที่ 10) ซึ่งละอองหยดเหล่านี้ จะผ่านระบบการระเหยให้กลายเป็นไอ ระดับพลังงานของเปลวไฟจะถูกใช้ในการขับเคลื่อนการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสารละลายตั้งต้น เป็นผลให้เกิดลักษณะกลุ่มก้อนและสามารถที่จะเติบโตเป็นอนุภาคระดับนาโนได้ที่บริเวณพื้นผิว และเกิดกระบวนการแข็งลักษณะที่เป็นก้อน (coagulation) และเกิดในลักษณะเกาะรวมตัวกันเป็นก้อนหยาบ (coalescence) ที่อุณหภูมิสูง ทำ

ให้อนุภาครวมตัวเข้าด้วยกัน ซึ่งมีผลทำให้เกิดการหดและรวมตัวอย่างหนาแน่นมากขึ้น จึงเป็นกระบวนการที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนได้เป็นอย่างดี การใช้เทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสในการสังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ พบว่าปริมาณในการดูดซับมีค่ามากกว่าตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์มาจากกระบวนการตกตะกอน มีค่าแปลงผันสูงมากในรอบแรก (95 เปอร์เซ็นต์) หลังจากเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนขึ้นและปฏิกิริยาแคลซิเนชันจำนวน 60 รอบ ค่าแปลงผันลดลงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ (Lu *et al.*, 2009)



ภาพที่ 10 การสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส

ที่มา: Karhunen (2011)

3.4 การเติมวัสดุเฉื่อย (Inert material)

การปรับสภาพตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ด้วยการเติมวัสดุเฉื่อยเป็นการเพิ่มปริมาณการดูดซับ และประสิทธิภาพของตัวดูดซับ ซึ่งงานวิจัยของ Li *et al.*, (2005) ได้ศึกษาตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ โดยนำแคลเซียมออกไซด์ผสมอะลูมิเนียมไนเตรดในสารละลายผสมของ 2-โทรพานอล นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกนำไปเผาให้ได้อยู่ในรูปของ $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{44}$ ซึ่งอัตราส่วนของ $\text{CaO}:\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{44}$ มีค่าเท่ากับ 75: 25 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นจึงนำมาทดสอบประสิทธิภาพการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้อุณหภูมิในการดูดซับที่ 690 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 30 นาที และอุณหภูมิแคลซิเนชัน 850

องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซไนโตรเจน 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 10 นาที พบว่าตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมได้ มีความความเสถียรมากขึ้น และนอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผลจากอัตราส่วนของ $\text{CaO} : \text{Ca}_{12}\text{Al}_4\text{O}_{44}$ โดยใช้อุณหภูมิในการดูดซับ 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแคลซิเนชัน 850 องศาเซลเซียส (Li *et al.*, 2006) พบว่าอัตราส่วน 75: 25 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

Chen *et al.*, (2009) ได้ทำการศึกษาต่อจาก Li *et al.*, (2006) โดยการผสมแคลเซียมออกไซด์กับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ หลังจากการทำปฏิกิริยาพบว่าเกิดผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น $\text{Ca}_{12}\text{Al}_4\text{O}_{44}$ เหมือนกัน และนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับแคลเซียมออกไซด์บริสุทธิ์ พบว่าหลังจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและแคลซิเนชันจำนวน 66 รอบ ใช้อุณหภูมิการ์บอนเนชัน 650 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแคลซิเนชัน 850 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของ $\text{CaO} : \text{Ca}_{12}\text{Al}_4\text{O}_{44}$ ที่ 95: 5 โดยน้ำหนัก มีค่าการแปลงผันมากถึงร้อยละ 27

Aihara *et al.*, (2001) ได้ทำการพัฒนาการสังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมแคลเซียมไททานาต และนำตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบประสิทธิภาพในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง TGA โดยใช้อุณหภูมิการ์บอนเนชัน 750 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และในสภาวะแคลซิเนชันใช้ปริมาณก๊าซไนโตรเจน 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หลังจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและแคลซิเนชันจำนวน 10 รอบ พบว่าตัวดูดซับที่เติมไททานาตออกไซด์มีความเสถียรมากกว่าตัวดูดซับที่ไม่เติมไททานาตออกไซด์ เนื่องจากเป็นการเพิ่มของช่องว่างที่เกิดจากออกซิเจน

Reddy and Smirniotis, (2004) ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ โดยการเติมโลหะอัลคาไล (โซเดียม โพแทสเซียม รูบิเดียม และซีเซียม) ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ พบว่าประสิทธิภาพของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีของอะตอมโลหะอัลคาไลเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเติมซีเซียมทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการเติมโลหะอัลคาไลชนิดอื่นๆ จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ Roesch *et al.*, (2005) ทำการศึกษาการกระจายตัวของซีเซียมบนตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ด้วยวิธีเย็บหม้อแบบเปียก โดยการนำแคลเซียมออกไซด์เติมลงไปในการละลายซีเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อทำการไหลดโลหะซีเซียมในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำไปอบและเผาภายใต้สภาวะออกซิเจนที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปซีเซียมออกไซด์ (Cs_2O) บนพื้นผิวของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ หลังจากนั้นนำมาทดสอบการกักเก็บก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิในการดูดซับ 600 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28.6 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าหลังจาก 5 ชั่วโมง ตัวดูดซับที่เติมซีซีเอ็มสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากถึงร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าตัวดูดซับที่ไม่เติมซีซีเอ็มอยู่ 4 เท่า ภายใต้สภาวะเดียวกัน

Albrecht *et al.*, (2008) ทำการศึกษาการเติมแมกนีเซียมออกไซด์เพื่อใช้เป็นวัสดุเนื้อของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ และนำตัวดูดซับที่เตรียมได้มาทดสอบการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง TGA โดยใช้อุณหภูมิคาร์บอนเนชั่น 750 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 20 นาที และอุณหภูมิแคลซิเนชั่น 900 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซไนโตรเจน 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 30 นาที หลังจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นและแคลซิเนชั่นจำนวน 1,250 รอบ พบว่าตัวดูดซับที่เติมแมกนีเซียมออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความเสถียรและมีค่าการแปลงผันมากกว่าตัวดูดซับที่ไม่เติมแมกนีเซียมออกไซด์ 2 เท่า นอกจากนี้ยังศึกษาการเติมแลนทานัมออกไซด์ หลังจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นและแคลซิเนชั่นจำนวน 100 รอบ พบว่าตัวดูดซับที่เติมแลนทานัมออกไซด์ทำให้การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าตัวดูดซับที่ไม่เติมแลนทานัมออกไซด์

3.5 การเติมสารพอลิเมอร์ (Polymer)

Coenen *et al.*, (2012) ได้ทำการปรับปรุงตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่สามารถทำให้ค่าการแปลงผันสูงและต้านทานการหลอมรวมตัวกันของอนุภาค ซึ่งการศึกษานี้มีแม่แบบที่เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ และนำพอลิเมอร์ชีวภาพ 2 กลุ่มมาทำการเปรียบเทียบลักษณะ โครงสร้างของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยทำการสังเคราะห์ผ่านแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดบริเวณชั้นฟิล์มบางของพอลิเมอร์ชีวภาพ และเกิดการแยกเฟสกัน เนื่องจากพอลิเมอร์ไม่สามารถละลายตัวได้สมบูรณ์ในระหว่างการเริ่มเผาไหม้ จึงส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับของแคลเซียมออกไซด์ แต่ในกรณีของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยมีพอลิเอทิลีน ไกคอล เป็นสารแม่แบบ พบว่าถ้าใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดได้ดีขึ้น ส่วนกรณีของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้พอลิโรนิก พี123 เป็นสารแม่แบบ พบว่ามีประสิทธิภาพในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเชิงพาณิชย์ 75 เปอร์เซ็นต์ หลังจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นและแคลซิเนชั่นจำนวน 20 รอบ ดังนั้นการนำสารพอลิเมอร์มาใช้ในการสังเคราะห์ จำเป็นต้องหาสภาวะที่เหมาะสมกับกระบวนการที่ใช้ในการ

สังเคราะห์ด้วย เพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่าพลูโรนิก พี123 เป็นสารแม่แบบ และสังเคราะห์ผ่านแคลเซียมคาร์บอเนต ใช้เป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่สุด

Yang *et al.*, (2009) ได้ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์จากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อใช้ในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตถูกเตรียมได้จากการผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้พลูโรนิก พี123 เป็นสารลดแรงตึงผิว ตัวดูดซับที่เตรียมได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่เติมพลูโรนิก พี123 โดยการสังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอน และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการค้า ซึ่งจากการศึกษาพบว่าโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายเม็ดถั่วกลวง เส้นผ่านศูนย์กลาง 200 นาโนเมตร และยาว 600 นาโนเมตร หลังจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและแคลซิเนชันจำนวน 50 รอบ พบว่าตัวดูดซับที่เติมพลูโรนิก พี123 มีค่ามากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอน และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการค้า โดยมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่มากกว่าร้อยละ 50

Luo *et al.*, (2013) ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงด้วยวิธีโซลเจล โดยใช้กรดซิตริก ช่วยในการจับไอออนของโลหะ ตัวดูดซับที่เตรียมได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตเชิงพาณิชย์ที่มีขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร โดยการนำมาทดสอบการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง TGA โดยใช้อุณหภูมิคาร์บอนเนชัน 650 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 15 นาที และอุณหภูมิแคลซิเนชัน 850 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซไนโตรเจน 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 10 นาที หลังจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและแคลซิเนชันจำนวน 20 รอบ พบว่าตัวดูดซับที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจลและมีการเติมกรดซิตริกมีค่าแปลงผันสูงกว่าตัวดูดซับแคลเซียมคาร์บอเนตเชิงพาณิชย์ที่มีขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตรและนาโนเมตรอยู่ 2 เท่า นอกจากนี้ยังศึกษาอุณหภูมิและปริมาณก๊าซในปฏิกิริยาแคลซิเนชัน โดยใช้อุณหภูมิคาร์บอนเนชัน 650 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 15 นาที และในปฏิกิริยาแคลซิเนชัน ใช้เวลา 10 นาที พบว่าอุณหภูมิแคลซิเนชัน 800 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซไนโตรเจน 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แสดงค่าแปลงผันสูงสุดอยู่ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ หลังจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและแคลซิเนชันจำนวน 20 รอบ

Santos *et al.*, (2012) ได้ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล โดยใช้กรดซัลฟิวริกเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวดูดซับที่เตรียมได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตเชิงพาณิชย์ โดยการนำมาทดสอบการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง TGA โดยใช้อุณหภูมิคาร์บอนขึ้น 700 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 50 นาที และอุณหภูมิแคลเซียมขึ้น 800 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซไนโตรเจน 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 13 นาที หลังจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนขึ้นและแคลเซียมขึ้นจำนวน 15 รอบ พบว่าตัวดูดซับที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจลมีพื้นที่ผิว 45 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.08 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และแสดงค่าแปลงผันสูงกว่าตัวดูดซับแคลเซียมคาร์บอเนตเชิงพาณิชย์อยู่ 1.5 เท่า

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. สารเคมี

1.1 สารเคมีสำหรับการเตรียมแคลเซียมออกไซด์

1.1.1. เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (cetyltrimethylammonium bromide; $C_{19}H_{42}BrN$, 99.0 % purity, บริษัท LobaChemie)

1.1.2. แคลเซียมไนเตรต (calcium nitrate; $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 99.0 % purity, บริษัท Ajax Finechem)

1.1.3. โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate; Na_2CO_3 , 99.0 % purity, บริษัท Merck KGaA)

1.1.4. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide; NH_4OH , pure, บริษัท Macron™ Chemicals)

1.1.5. น้ำกลั่น (distilled water)

1.2 สารเคมีที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.2.1. ก๊าซผสมประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 14% และไนโตรเจน (N_2) 86%

1.2.2. ก๊าซไนโตรเจน (N_2 : 99.99 % purity, บริษัท Linde Gas (Thailand))

2. อุปกรณ์

2.1 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมแคลเซียมออกไซด์

2.1.1 เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง (รุ่น ML204 ยี่ห้อ METTLER TOLEDO)

2.1.2 เตาเผา (รุ่น CWF 13/13/301 ยี่ห้อ Carbolite)

2.1.3 ตู้ดูดควัน (รุ่น 951 ยี่ห้อ SORWARA)

2.1.4 เครื่องกวนสารระบบแม่เหล็กให้ความร้อน (รุ่น SLR ผลิตโดยบริษัท SCHOTT)

2.1.5 เตาอบ (รุ่น UFB400 ผลิตโดยบริษัท Memmert)

2.1.6 บีกเกอร์ (Beaker)

2.1.7 ถ้วยกระเบื้อง (Evaporating basins, porcelain)

2.1.8 ปิเปตต์ (Pipette)

2.1.9 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

2.2 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางน้ำหนัก (Simultaneous DSC-TGA Analyzer) ยี่ห้อ TA-Instruments รุ่น SDT 2960

วิธีการ

1. การเตรียมแคลเซียมออกไซด์ (CaO)

1.1 วิธีโซลเจล

1.1.1 ชั่งเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ในปริมาณที่ต้องการ (0, 1.5, 3, 4.5 และ 6 มิลลิโมล) เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกวนสารละลายด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

1.1.2 ชั่งแคลเซียมไนเตรดในปริมาณที่ต้องการ (10 และ 25 มิลลิโมล) เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกวนสารละลายด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 นาที

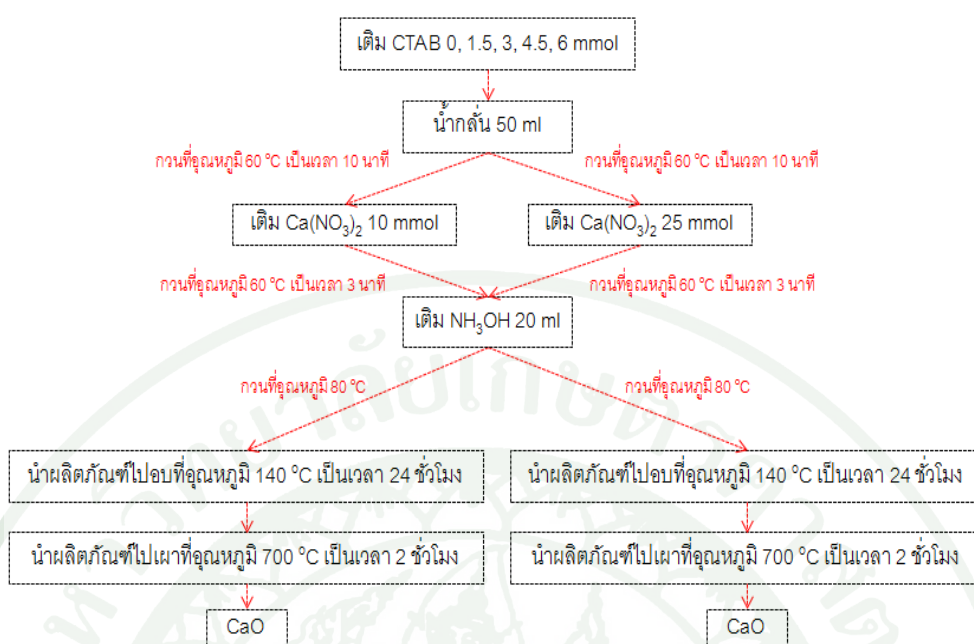
1.1.3 นำสารที่ได้จากข้อ 1.1.2 เติกลงไปในสารละลายข้อ 1.1.1 จากนั้นทำการกวนสารละลายด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

1.1.4 เติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 20 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกวนสารละลายด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

1.1.5 ทำการกวนสารละลายด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

1.1.6 นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากข้อ 1.1.5 ไปอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.1.7 นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากข้อ 1.1.6 ไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้อยู่ในรูปแคลเซียมออกไซด์



ภาพที่ 11 แผนผังวิธีการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล

1.2 วิธีตกตะกอน

1.2.1 ชั่งเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ในปริมาณที่ต้องการ (0, 1.5 และ 6 มิลลิโมล) เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิตร จากนั้นทำการกวนสารละลายด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

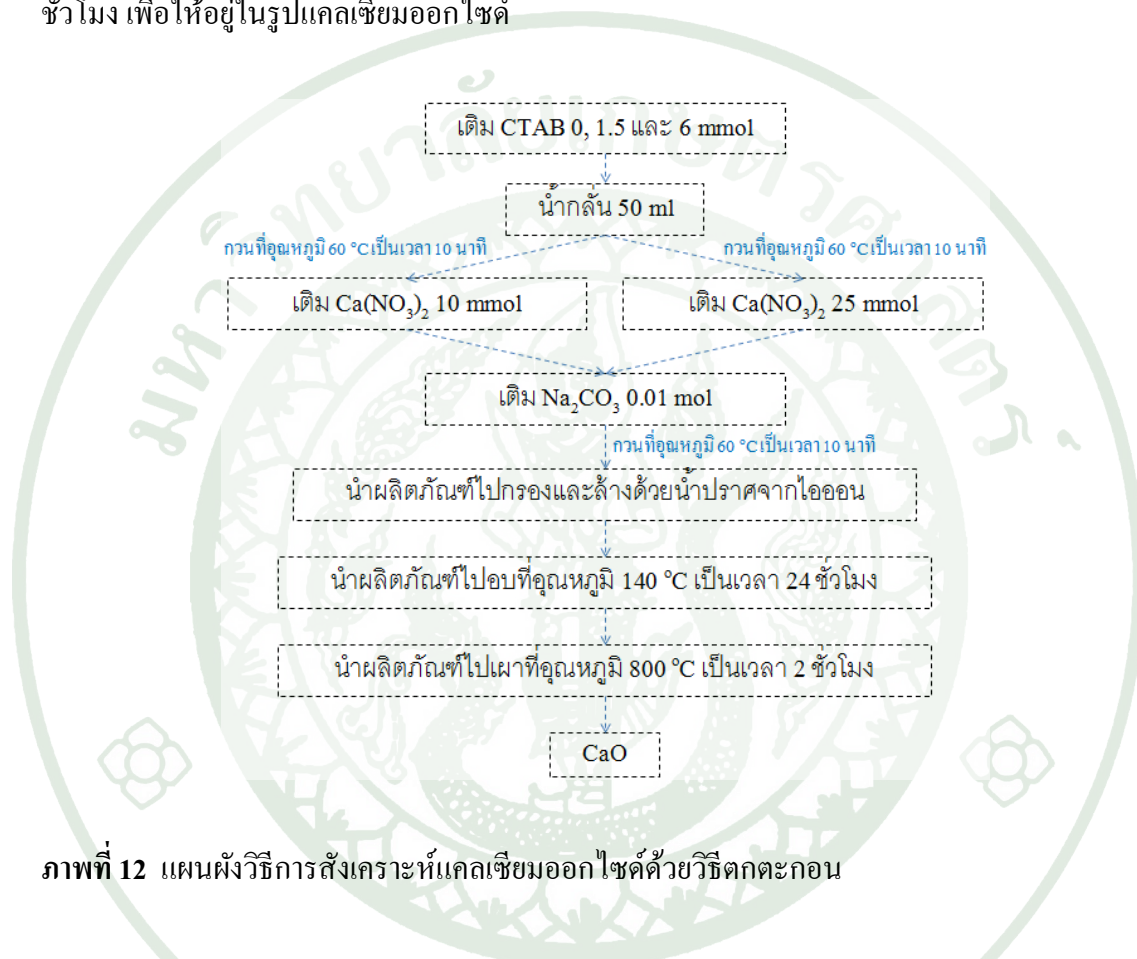
1.2.2 ชั่งแคลเซียมไนเตรตในปริมาณที่ต้องการ (10 และ 25 มิลลิโมล) เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิตร จากนั้นทำการกวนสารละลายด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 นาที

1.2.3 นำสารที่ได้จากข้อ 1.2.2 เติกลงไปในสารละลายข้อ 1.2.1 จากนั้นทำการกวนสารละลายด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

1.2.4 เติมนิโคติลามคาร์บอนเนต 0.01 โมล แล้วทำการกวนสารละลายด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

1.2.5 นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากข้อ 1.2.4 ไปกรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจำนวน 2 ลิตร จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.2.6 นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากข้อ 1.2.5 ไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้อยู่ในรูปแคลเซียมออกไซด์



ภาพที่ 12 แผนผังวิธีการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ด้วยวิธีตกตะกอน

2. วิเคราะห์ลักษณะของแคลเซียมออกไซด์

2.1 นำสารที่เตรียมได้ข้อ 1.1.6 และข้อ 1.2.5 มาทดสอบด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (thermal gravimetric analysis; TGA) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน

2.2 นำสารที่เตรียมได้ข้อ 1.1.7 และข้อ 1.2.6 มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2 -sorption) เพื่อศึกษาขนาด ปริมาตรของรูพรุน วิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction; XRD) เพื่อยืนยันสารประกอบที่ได้และวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) เพื่อศึกษาลักษณะของพื้นผิวของแคลเซียมออกไซด์

3. ทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

นำสารจากข้อ 1.1.7 และข้อ 1.2.6 ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (thermal gravimetric analysis; TGA) เพื่อศึกษาการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้อุณหภูมิคาร์บอนเนชัน 700 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 40 นาที และใช้อุณหภูมิแคลซิเนชัน 850 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซไนโตรเจน 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 30 นาที

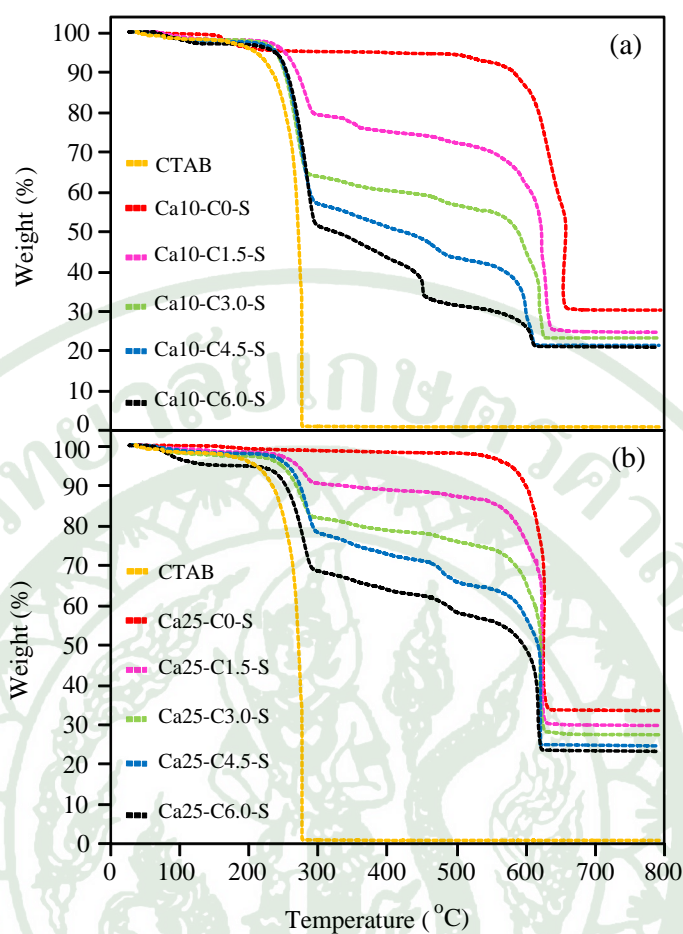


ผลและวิจารณ์

ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ถูกนำมาตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2 -sorption) การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) และการสลายตัวทางความร้อน (thermogravimetric analysis) โดยผลที่ได้จะใช้ในการอธิบายอิทธิพลของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (cetyl trimethyl ammonium bromide: CTAB) ต่อคุณลักษณะของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ หลังจากนั้นนำตัวดูดซับที่เตรียมได้ไปทดสอบประสิทธิภาพในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

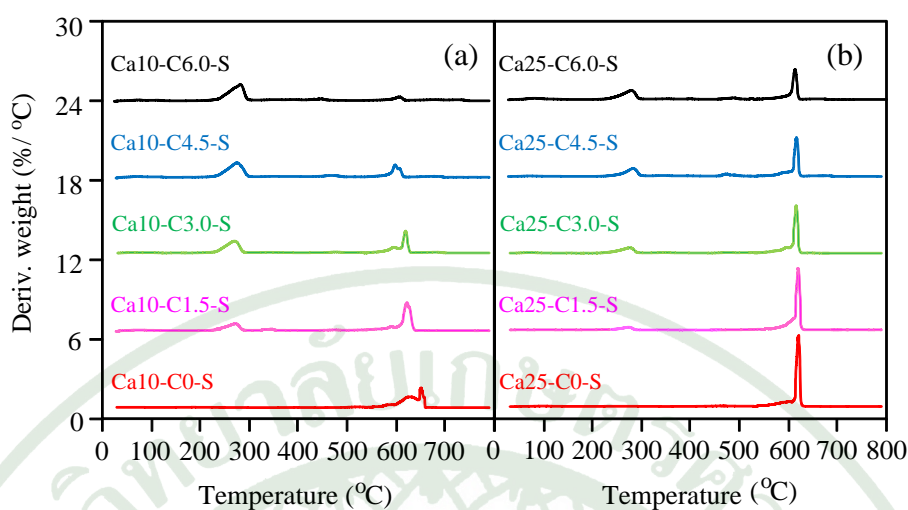
ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจลและวิธีการตกตะกอน

จากผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจล (ภาพที่ 13) เมื่อไม่มีการเติม CTAB (Ca10-C0-S) พบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 2 ช่วงคือช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 652 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการสูญเสียไอน้ำในโครงสร้าง และการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมออกไซด์ ตามลำดับ เมื่อมีการเติม CTAB พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความร้อนเพิ่มอีก 1 ช่วง โดยเป็นการเปลี่ยนแปลงความร้อนของ CTAB ในช่วงอุณหภูมิ 220 – 270 องศาเซลเซียส ซึ่งปริมาณ CTAB ที่เติมลงไปส่งผลต่ออุณหภูมิในการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อเพิ่มปริมาณ CTAB (ภาพที่ 14a) พบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตลดลง เนื่องจากการเพิ่ม CTAB จะทำให้เกิดรูพรุนหรือช่องว่างที่เกิดจากการสลายตัวของ CTAB ทำให้ความร้อนสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในอนุภาคได้ง่ายขึ้น และนอกจากนี้ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถแพร่ออกมาจากโครงสร้างได้ง่ายขึ้นอีกด้วย ดังนั้นแคลเซียมคาร์บอเนตจึงสลายตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำลง



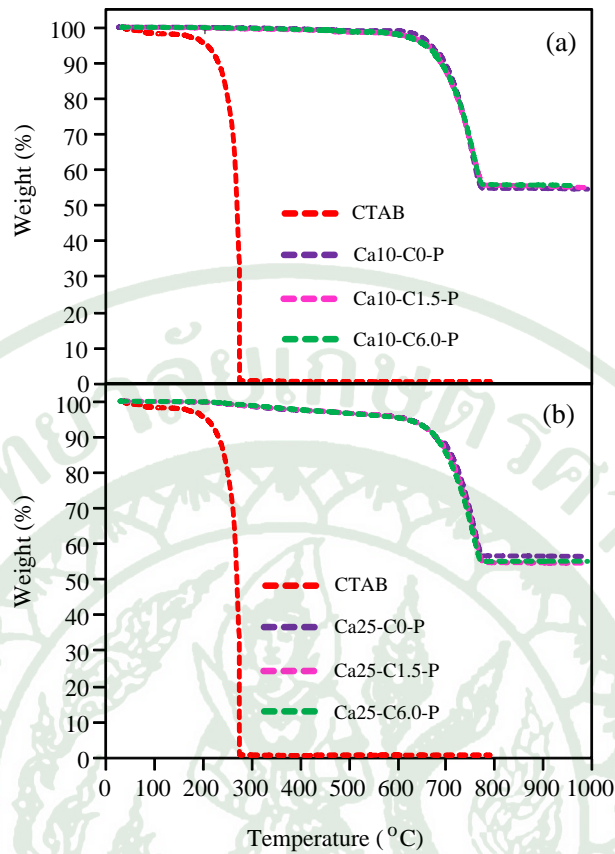
ภาพที่ 13 การสลายตัวทางความร้อนของตัวดูดซับแคลเซียมที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจล โดยที่ ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล

เมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมเป็น 25 มิลลิโมล (ภาพที่ 14b) พบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวของ แคลเซียมคาร์บอเนตลดลงมาอยู่ในช่วง 610 – 620 องศาเซลเซียส ซึ่งจากงานวิจัยของ Wu *et al.* (2008) พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดผลึกเล็กจะสลายตัวได้ง่ายกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่มี ขนาดผลึกใหญ่ ซึ่งบอกเป็นนัยว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ที่มีปริมาณแคลเซียม 25 มิลลิ โมล มีขนาดผลึกเล็กกว่าในกรณีที่สังเคราะห์โดยใช้ปริมาณแคลเซียม 10 มิลลิโมล นอกจากนี้ยัง พบว่าหลังจากอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ไม่พบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ดังนั้นจึงเลือกอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการแคลไซน์ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล ต่อไป

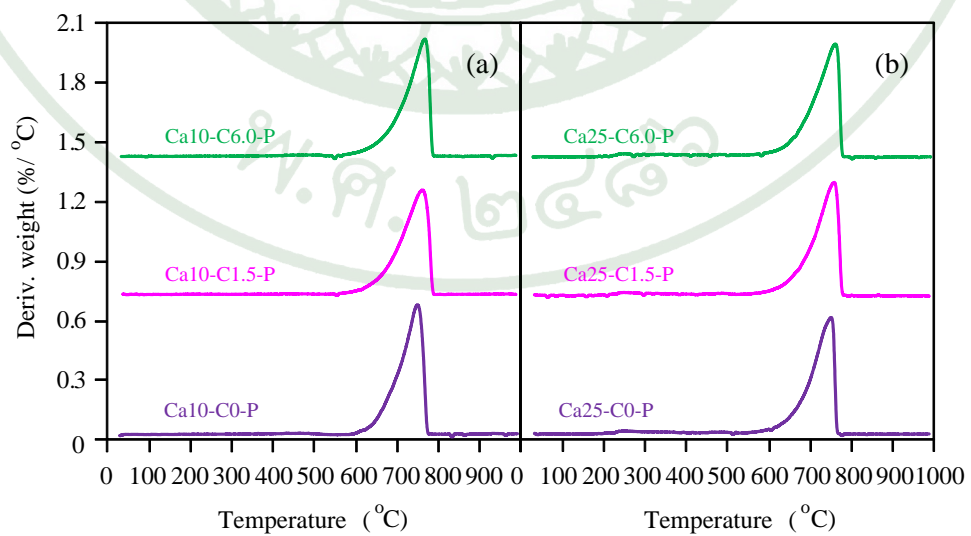


ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับอุณหภูมิของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจล โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 10 มิลลิโมล (a) 25 มิลลิโมล

ในขณะที่เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เตรียมด้วยวิธีตกตะกอนมาวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (ภาพที่ 15) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่เติม CTAB ($\text{Ca}_{10}\text{-C0-P}$) เกิดการสลายตัวทางความร้อนเพียงช่วงอุณหภูมิเดียว โดยมีการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 754 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่เติม CTAB 1.5 มิลลิโมล ($\text{Ca}_{10}\text{-C1.5-P}$) และ 6.0 มิลลิโมล ($\text{Ca}_{10}\text{-C6.0-P}$) พบว่ามีการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิเดียวเช่นกันคือ 767 และ 772 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเป็นการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมออกไซด์ โดยไม่พบการสลายตัวของน้ำและ CTAB ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 200 และ 220 – 270 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Virtudazo et al. (2012) พบว่าการดูดซับของ CTAB และพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแรงทางกายภาพเท่านั้น ดังนั้นในขั้นตอนการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 2.0 ลิตร อาจจะทำให้ CTAB ถูกชะล้างออกไปหมด นอกจากนี้ยังพบว่าหลังจากอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ไม่พบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก ดังนั้นจึงเลือกอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 15 และภาพที่ 16) เพื่อใช้ในการแคลไซน์ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมด้วยวิธีตกตะกอนต่อไป



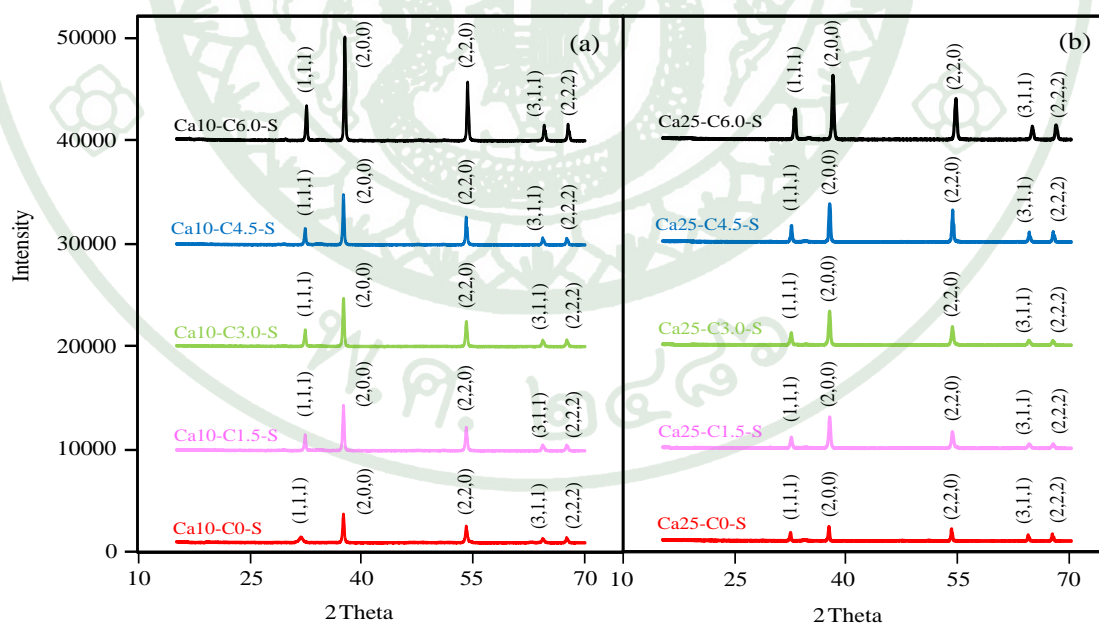
ภาพที่ 15 การสลายตัวทางความร้อนของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีตกตะกอน ในปริมาณ CTAB ต่างๆ กัน โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล



ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับอุณหภูมิของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีตกตะกอน โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล

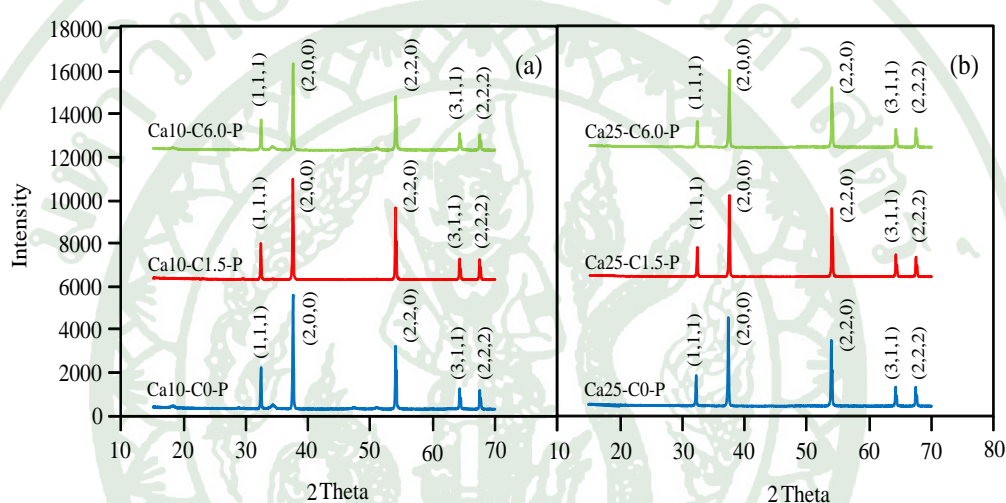
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและขนาดผลึกของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกรีดด้วยวิธีโซลเจลและวิธีการตกตะกอน

จากผลการวิเคราะห์เฟสของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ภายหลังจากการแคลไซน์ทั้งที่ถูกรีดด้วยวิธีโซลเจล (ภาพที่ 17) และวิธีตกตะกอน (ภาพที่ 18) พบพิกัดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2theta เท่ากับ 32.3, 37.4, 53.9, 64.2 และ 67.4 ซึ่งตรงกับระนาบของผลึก (1,1,1), (2,0,0), (2,2,0), (3,1,1) และ (2,2,2) ซึ่งเป็นการบ่งบอกผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ภายหลังจากการแคลไซน์เป็นเฟสแคลเซียมออกไซด์ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ความสูงของพิกัดแต่ละตัวอย่างไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถนำความสูงของพิกัดหลักไปคำนวณขนาดผลึกจากสมการ Scherrer จากภาพที่ 19 แสดงผลจากการคำนวณขนาดผลึกของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีโซลเจลในอัตราส่วนของ Ca^{2+} : CTAB ต่างๆ พบว่าแคลเซียมออกไซด์ที่ไม่เติม CTAB (Ca10-C0-S) มีขนาดผลึก 34.57 นาโนเมตร และเมื่อเติม CTAB ลงไป (ภาพที่ 19a) พบว่าผลึกของแคลเซียมออกไซด์มีขนาดผลึกใหญ่ขึ้น โดยเพิ่มจาก 34.57 นาโนเมตร เป็น 34.75, 34.94, 36.53 และ 37.71 นาโนเมตร เมื่อเติม CTAB ปริมาณ 1.5 (Ca10-C1.5-S), 3.0 (Ca10-C3.0-S), 4.5 (Ca10-C4.5-S) และ 6.0 (Ca10-C6.0-S) มิลลิโมล ตามลำดับ



ภาพที่ 17 XRD pattern หลังกระบวนการแคลไซน์ของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกรีดด้วยวิธีโซลเจลในปริมาณ CTAB ต่างๆ กัน โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล

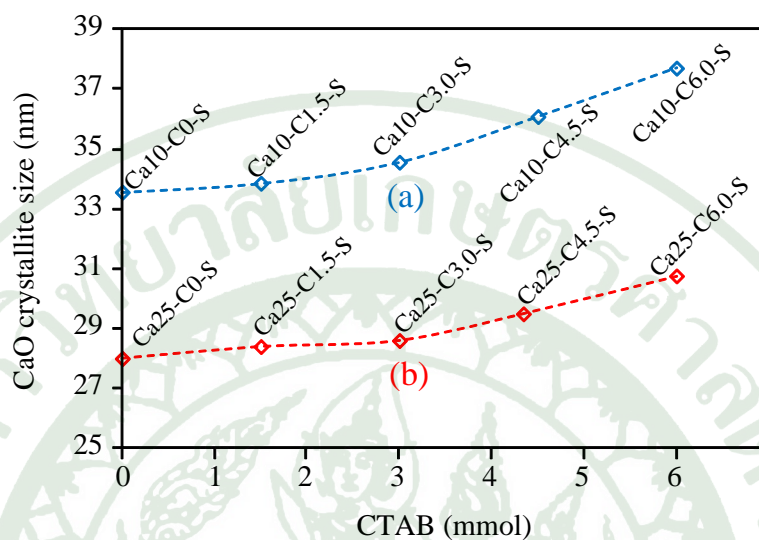
เมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมเป็น 25 มิลลิโมล (ภาพที่ 19b: (Ca25-C0-S)) พบว่าขนาดผลึกของแคลเซียมออกไซด์มีขนาดประมาณ 28.1 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มปริมาณ CTAB เข้าไปในระบบพบว่าผลึกของแคลเซียมออกไซด์มีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นเดียวกับกรณีปริมาณแคลเซียม 10 มิลลิโมล โดยที่ ปริมาณ CTAB เท่ากับ 6.0 มิลลิโมล (Ca25-C6.0-S) ให้ขนาดผลึกใหญ่ที่สุดเท่ากับ 31.24 นาโนเมตร อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเตรียมโดยใช้แคลเซียม 10 และ 25 มิลลิโมล พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมด้วยปริมาณแคลเซียมมากกว่าขนาดผลึกจะเล็กกว่า



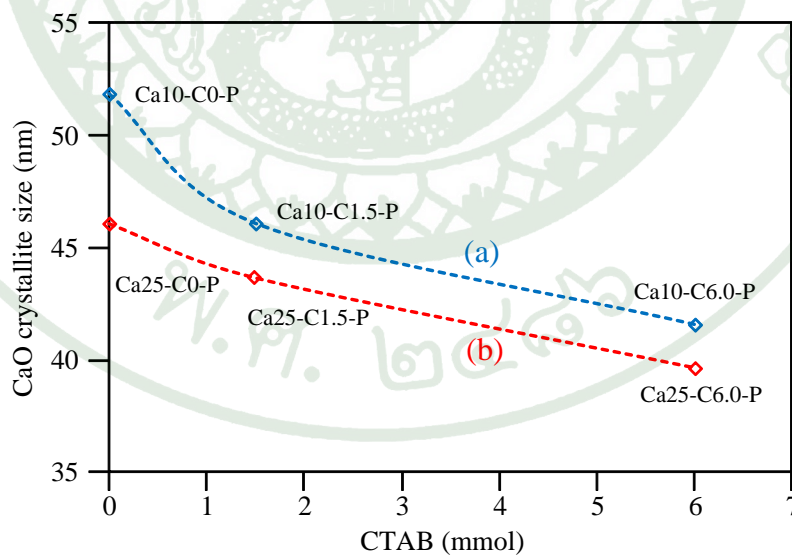
ภาพที่ 18 XRD pattern หลังกระบวนการแคลไซน์ของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีตกตะกอนในปริมาณ CTAB ต่างๆ กัน โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล

เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่เตรียมด้วยวิธีตกตะกอน (ภาพที่ 20a) พบว่าที่ปริมาณแคลเซียม 10 มิลลิโมล และไม่มีการเติม CTAB (Ca10-C0-P) ให้ขนาดผลึกใหญ่ถึง 51.86 นาโนเมตร และเมื่อเติม CTAB ลงไป พบว่าผลึกของแคลเซียมออกไซด์มีขนาดผลึกเล็กลง โดยลดจาก 51.86 นาโนเมตร เป็น 46.09 และ 41.59 นาโนเมตร เมื่อเติม CTAB ปริมาณ 1.5 (Ca10-C1.5-P) และ 6.0 (Ca10-C6.0-P) มิลลิโมล ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมเป็น 25 มิลลิโมล (ภาพที่ 20b) พบว่าขนาดผลึกของแคลเซียมออกไซด์มีขนาดเล็กลงเหลือ 46.09 นาโนเมตร และเมื่อเติม CTAB ปริมาณ 1.5 (Ca25-C1.5-P) และ 6.0 (Ca25-C6.0-P) มิลลิโมล พบว่าขนาดผลึกของแคลเซียมออกไซด์มีขนาดเล็กลง โดยมีขนาดผลึกเหลือเพียง 43.67 และ 39.65 นาโนเมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบขนาดผลึกที่ได้จากวิธีตกตะกอนกับวิธีโซลเจล พบว่าวิธีการเตรียมด้วยโซลเจล มีขนาดผลึกของ

แคลเซียมออกไซด์ที่เล็กกว่าซึ่งขนาดผลึกที่เล็กกว่านี้อาจจะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างทั่วถึงและเร็วกว่าในขั้นตอนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



ภาพที่ 19 ขนาดผลึกแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจลในปริมาณ CTAB ต่างๆ กัน โดยที่ ปริมาณ Ca(NO₃)₂ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล

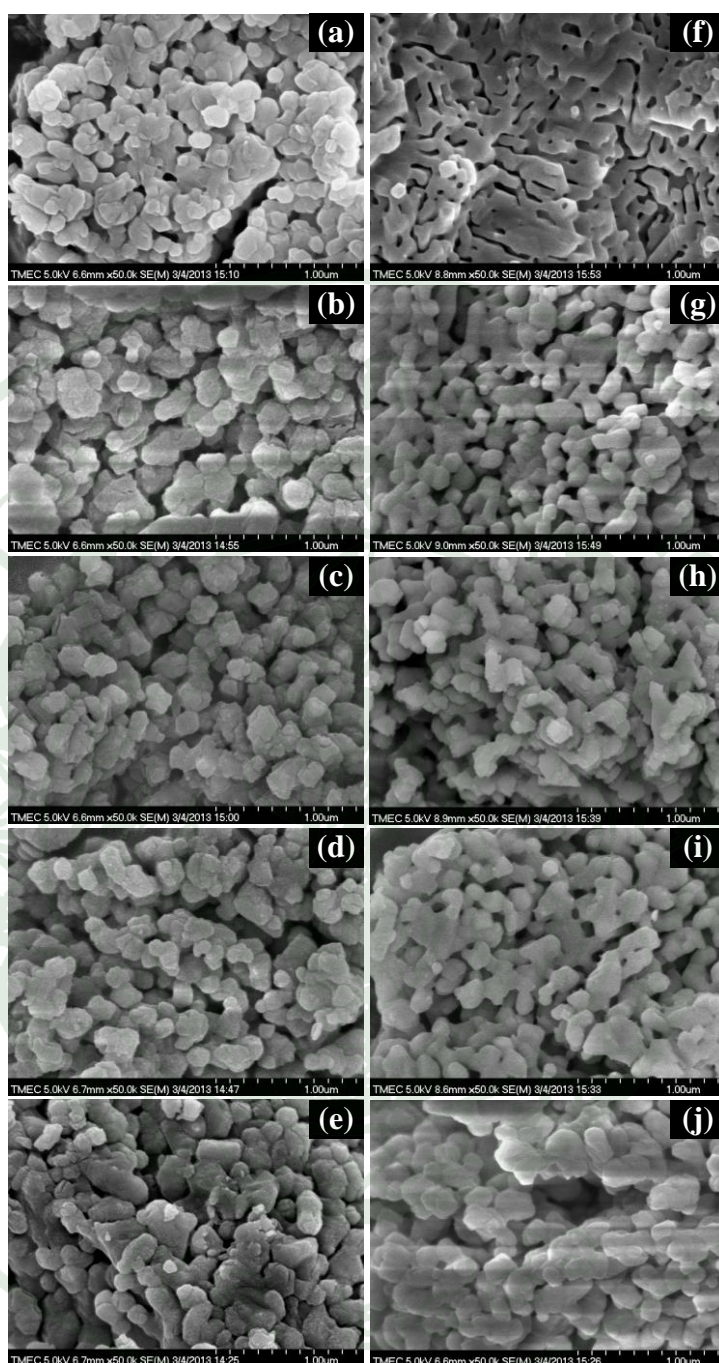


ภาพที่ 20 ขนาดผลึกแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจลในปริมาณ CTAB ต่างๆ กัน โดยที่ ปริมาณ Ca(NO₃)₂ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกรีดด้วยวิธีโซลเจล และวิธีตกตะกอน

จากการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของแคลเซียมออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกรีดด้วยวิธีโซลเจล พบว่าตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ไม่เติม CTAB (ภาพที่ 21a) มีลักษณะรูปร่างไม่เป็นระเบียบ และรวมตัวกันอย่างหนาแน่น โดยอนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดประมาณ 400 นาโนเมตร เมื่อเติม CTAB 1.5 มิลลิโมล (Ca10-C1.5-S) จะเห็นว่าลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลม ขนาดอนุภาคประมาณ 300 นาโนเมตร และมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมากขึ้น เมื่อเติม CTAB 3.0 มิลลิโมล (Ca10-C3.0-S) พบว่าลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมมากขึ้น กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และขนาดอนุภาคประมาณ 200 นาโนเมตร เมื่อเติม CTAB ปริมาณ 4.5 (Ca10-C4.5-S) และ 6.0 (Ca10-C6.0-S) มิลลิโมล (ภาพที่ 21d ถึง ภาพที่ 21e) จะสังเกตเห็นว่าลักษณะรูปร่างเป็นทรงรีรวมตัวกันมากขึ้น ขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ ซึ่งขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 200 ถึง 500 นาโนเมตร

เมื่อเติมปริมาณแคลเซียมเป็น 25 มิลลิโมล (ภาพที่ 21f) พบว่าลักษณะรูปร่างเป็นแผ่นที่เชื่อมติดกันอย่างหนาแน่น เมื่อเติม CTAB 1.5 มิลลิโมล (Ca25-C1.5-S) พบว่าได้แคลเซียมออกไซด์ที่มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลม ขนาดเล็กเชื่อมติดกันเป็นก้อนที่มีลักษณะคล้ายโครงกระดูก และพบช่องว่างระหว่างอนุภาค และเมื่อเพิ่มปริมาณ CTAB เป็น 3.0 มิลลิโมล (Ca25-C3.0-S) พบว่าขนาดอนุภาคของแคลเซียมออกไซด์ลดลง โดยมีขนาดประมาณ 150 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มปริมาณ CTAB ต่อไปที่ 4.5 (Ca25-C4.5-S) และ 6.0 (Ca25-C6.0-S) มิลลิโมล พบว่าอนุภาคของแคลเซียมออกไซด์มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงรีรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่

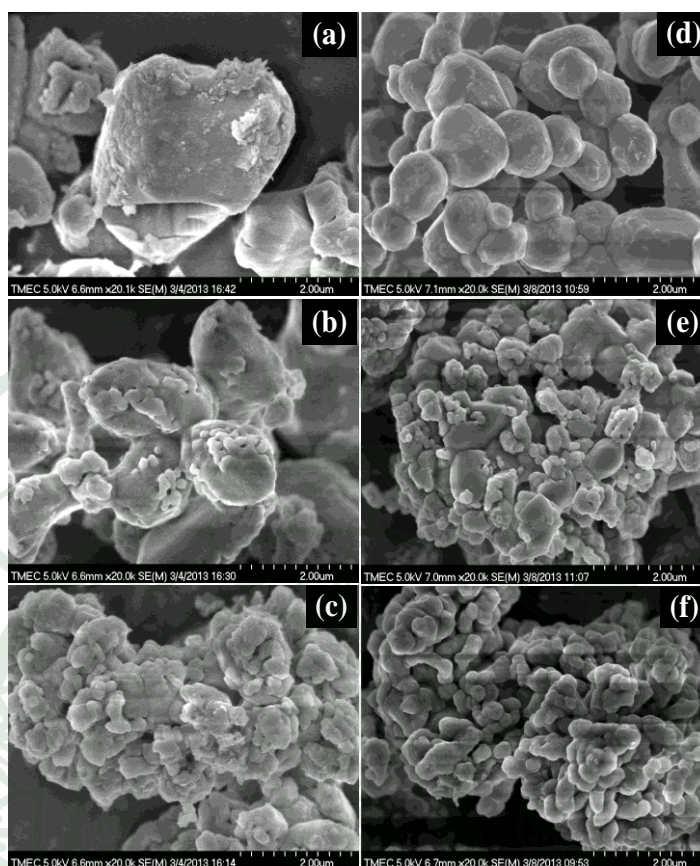


ภาพที่ 21 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจล ภาพด้านซ้ายใช้ปริมาณแคลเซียม 10 มิลลิโมลและภาพด้านขวา ใช้แคลเซียม 25 มิลลิโมล ที่ปริมาณ CTAB ต่างๆ (a) และ (f) 0 มิลลิโมล, (b) และ (g) 1.5 มิลลิโมล, (c) และ (h) 3.0 มิลลิโมล, (d) และ (i) 4.5 มิลลิโมล, (e) และ (j) 6.0 มิลลิโมล

ในขณะที่เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เตรียมด้วยวิธีตกตะกอนมาวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของ แคลเซียมออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์

ที่ไม่เติม CTAB (ภาพที่ 22a: (Ca10-C0-P)) มีลักษณะเป็นเม็ดอนุภาคขนาดใหญ่ประมาณ 5 ไมโครเมตร ภายในเม็ดมีการรวมตัวกันของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ขนาดเล็กประมาณ 200 – 400 นาโนเมตร เมื่อเติม CTAB 1.5 มิลลิโมล (ภาพที่ 22b: (Ca10-C1.5-P)) พบว่าเม็ดของอนุภาคมีขนาดเล็กลงอยู่ที่ประมาณ 2 – 4 ไมโครเมตร ภายในเม็ดยังคงเห็นการรวมตัวกันของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์อยู่ เมื่อเติม CTAB 6.0 มิลลิโมล (ภาพที่ 22c: (Ca10-C6.0-P)) สังเกตเห็นว่าเม็ดอนุภาคขนาดใหญ่หายไป เกิดเป็นการรวมตัวกันของอนุภาคที่มีขนาดประมาณ 300 – 500 นาโนเมตร

เมื่อเติมปริมาณแคลเซียมเป็น 25 มิลลิโมล (ภาพที่ 22d: (Ca25-C0-P)) สังเกตเห็นว่า มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดประมาณ 600 นาโนเมตร ถึง 1.5 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมที่ 10 มิลลิโมล แต่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับที่สังเคราะห์โดยใช้ปริมาณแคลเซียมที่ 25 มิลลิโมล ไม่มีการรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็ก เมื่อเติม CTAB 1.5 มิลลิโมล (ภาพที่ 22e: (Ca25-C1.5-P)) ลักษณะรูปร่างเป็นก้อนขนาดเล็กใหญ่สลับกัน การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 400 ถึง 900 นาโนเมตร และเมื่อเติม CTAB 6.0 มิลลิโมล (ภาพที่ 22f: (Ca25-C6.0-P)) พบว่าลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมและทรงรีขนาดเล็กเชื่อมติดกันอย่างหนาแน่น ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 300 ถึง 500 นาโนเมตร



ภาพที่ 22 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีตกตะกอน ภาพด้านซ้ายคือปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 10 มิลลิโมล และภาพด้านขวาคือปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 25 มิลลิโมล ที่ปริมาณ CTAB ต่างๆ กัน (a) และ (d) 0 มิลลิโมล, (b) และ (e) 1.5 มิลลิโมล, (c) และ (f) 6.0 มิลลิโมล

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจลและวิธีตกตะกอน

ตารางที่ 1 แสดงพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจลในอัตราส่วนของ Ca^{2+} : CTAB ต่างๆ พบว่าเมื่อไม่เติม CTAB (Ca10-C0-S) มีพื้นที่ผิว 3.34 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุน 0.07 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เมื่อเพิ่ม CTAB ปริมาณ 1.5 (Ca10-C1.5-S) และ 3.0 (Ca10-C3.0-S) มิลลิโมล จะเห็นว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยที่เมื่อเติม CTAB 3.0 มิลลิโมล ทำให้เกิดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด 11.85 ตารางเมตรต่อกรัมและ 0.31 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และ

เมื่อเติม CTAB มากกว่า 3.0 มิลลิโมล พบว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ลดลง

เมื่อเติมปริมาณแคลเซียมเป็น 25 มิลลิโมล (Ca25-C0-S) พบว่ามีพื้นที่ผิว 0.35 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุน 0.06 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าปริมาณความเข้มข้นของแคลเซียมสูง ทำให้เกิดอนุภาคที่มีขนาดเล็กและเกิดการรวมตัวกันอย่างหนาแน่น เมื่อเพิ่มปริมาณ CTAB ในแคลเซียม 25 มิลลิโมล พบว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสามารถอธิบายได้เหมือนกับการเติม CTAB ในแคลเซียม 10 มิลลิโมล แต่ค่าของพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการเติม CTAB ในแคลเซียม 10 มิลลิโมล โดยที่ปริมาณแคลเซียม 25 มิลลิโมล CTAB 3.0 มิลลิโมล (Ca25-C3.0-S) มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด 9.04 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.17 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจล

ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)
Ca10-C0-S	3.34	0.07
Ca10-C1.5-S	9.21	0.22
Ca10-C3.0-S	11.85	0.31
Ca10-C4.5-S	9.09	0.18
Ca10-C6.0-S	2.74	0.11
Ca25-C0-S	0.35	0.06
Ca25-C1.5-S	6.47	0.13
Ca25-C3.0-S	9.04	0.17
Ca25-C4.5-S	6.16	0.11
Ca25-C6.0-S	0.33	0.02

จากตารางที่ 2 แสดงพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีตกตะกอนในอัตราส่วนของ Ca^{2+} : CTAB ต่างๆ พบว่าเมื่อไม่เติม CTAB (Ca10-C0-P) มีพื้นที่ผิว 0.69 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุน 0.03 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เมื่อเติม CTAB ลงไป พบว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้อง

กับขนาดอนุภาคที่เล็กลงจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ภาพที่ 22b และ ภาพที่ 22c) เมื่อเติม CTAB ปริมาณ 1.5 (Ca10-C1.5-P) และ 6.0 (Ca10-C6.0-P) มิลลิโมล ทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มเป็น 0.99 และ 6.66 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.04 และ 0.06 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

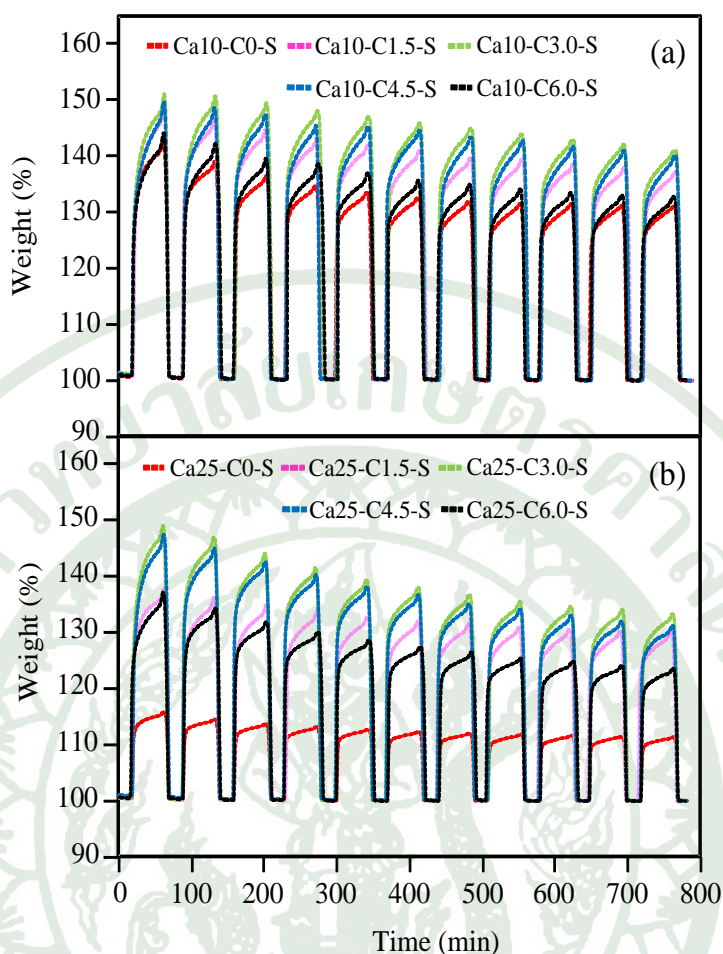
เมื่อเติมปริมาณแคลเซียมเป็น 25 มิลลิโมล (ภาพที่ 22d: (Ca25-C0-P)) พบว่ามีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลงเหลือเพียง 0.86 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.02 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อเติม CTAB ปริมาณ 1.5 (Ca25-C1.5-P) และ 6.0 (Ca25-C6.0-P) มิลลิโมล พบว่ามีพื้นที่ผิวและมีปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น สังเกตเห็นว่าขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กลง (ภาพที่ 22e และ ภาพที่ 22f) โดยเพิ่มเป็น 1.07 และ 2.21 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.04 และ 0.06 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีตกตะกอน

ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)
Ca10-C0-P	0.69	0.02
Ca10-C1.5-P	0.99	0.04
Ca10-C6.0-P	2.21	0.06
Ca25-C0-P	0.86	0.03
Ca25-C1.5-P	1.07	0.04
Ca25-C6.0-P	6.66	0.06

ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจลและวิธีตกตะกอน

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ในจำนวนรอบการดูดซับและคายซับทั้งหมด 11 รอบ จากภาพที่ 23 และภาพที่ 25 แสดงข้อมูลในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับเวลา (นาท) และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาและการเปรียบเทียบจึงได้ทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าแปลงผัน (conversion) กับจำนวนรอบในการดูดซับและคายซับ ดังแสดงในภาพที่ 24 และภาพที่ 26



ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเทียบกับเวลาของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจล และถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงทางน้ำหนัก TGA/DTA เพื่อแสดงถึงเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นและปฏิกิริยาแคลซิเนชันที่มีจำนวน 11 รอบ โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล

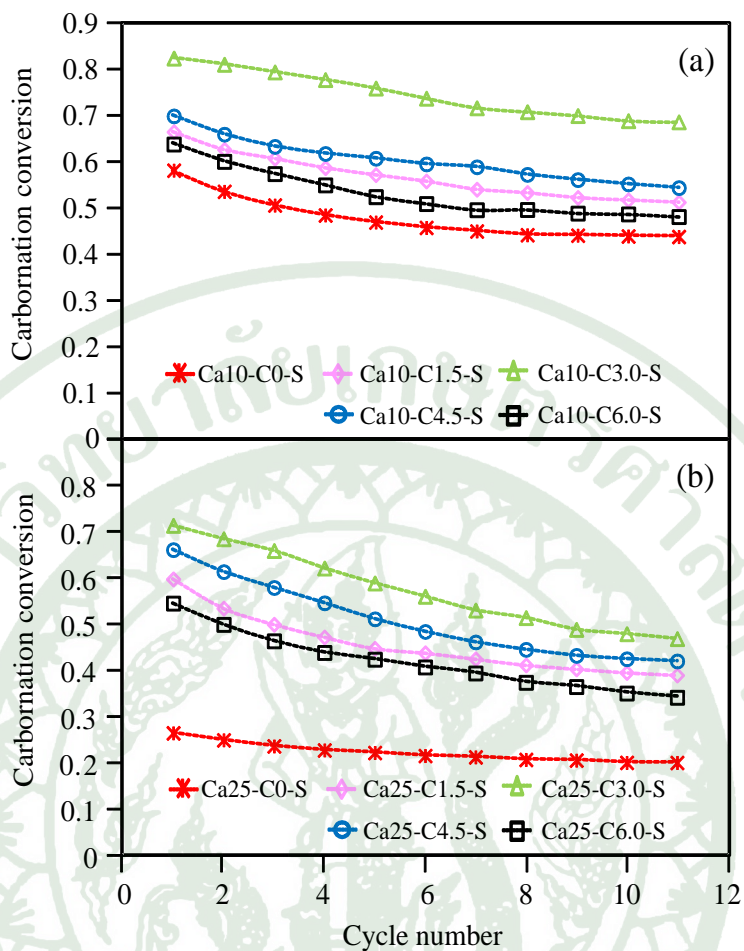
ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจลในอัตราส่วนของ Ca^{2+} : CTAB ต่างๆ จากภาพที่ 24a แสดงผลของค่าแปลงผันกับจำนวนรอบในการดูดซับและคายซับของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ พบว่าลักษณะการลดลงของค่าการแปลงผันหลังจากเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นและปฏิกิริยาแคลซิเนชันจำนวน 11 รอบ พิจารณาตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ไม่เติม CTAB (Ca10-C0-S) พบลักษณะโค้งของค่าการแปลงผันเป็น 2 ช่วงคือ ช่วง 1 – 5 รอบแรก และ ช่วง 5 – 11 รอบ โดยในรอบแรกมีค่าการแปลงผันเท่ากับ 58.20 เปอร์เซ็นต์ และลดลงเหลือ 46.98 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผ่านไป 5 รอบ คิดเป็นอัตราการลดลงของค่าการแปลงผันเท่ากับ 2.80 เปอร์เซ็นต์ต่อรอบ ในขณะที่เมื่อผ่านการเกิดปฏิกิริยาไป

จำนวน 11 รอบ พบว่าค่าการแปลงผันลดลงเหลือ 43.85 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคิดเป็นอัตราการลดลงของค่าการแปลงผันจากรอบที่ 5 ถึง รอบที่ 11 เป็นเท่ากับ 0.52 เปอร์เซ็นต์ต่อรอบ โดยจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงโค้งการแปลงผันในช่วง 1 – 5 รอบแรก มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงกว่ารอบหลัง (5 – 11 รอบ) สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมได้โดยไม่มี CTAB (ภาพที่ 21a) มีการรวมตัวกันอย่างหนาแน่น ส่งผลให้บริเวณของที่สัมผัสกันของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์เกิดการหลอมรวมตัวกันได้ง่าย กลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและลดพื้นที่ในการเข้าทำปฏิกิริยาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ค่าการแปลงผันลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อผ่านไปจำนวน 5 รอบ บริเวณที่สัมผัสกันของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์เกิดการหลอมตัวกันจนเกือบสมบูรณ์แล้วส่งผลให้ค่าการแปลงผันที่ลดลงเนื่องจากการหลอมตัวกันของอนุภาคลดลง

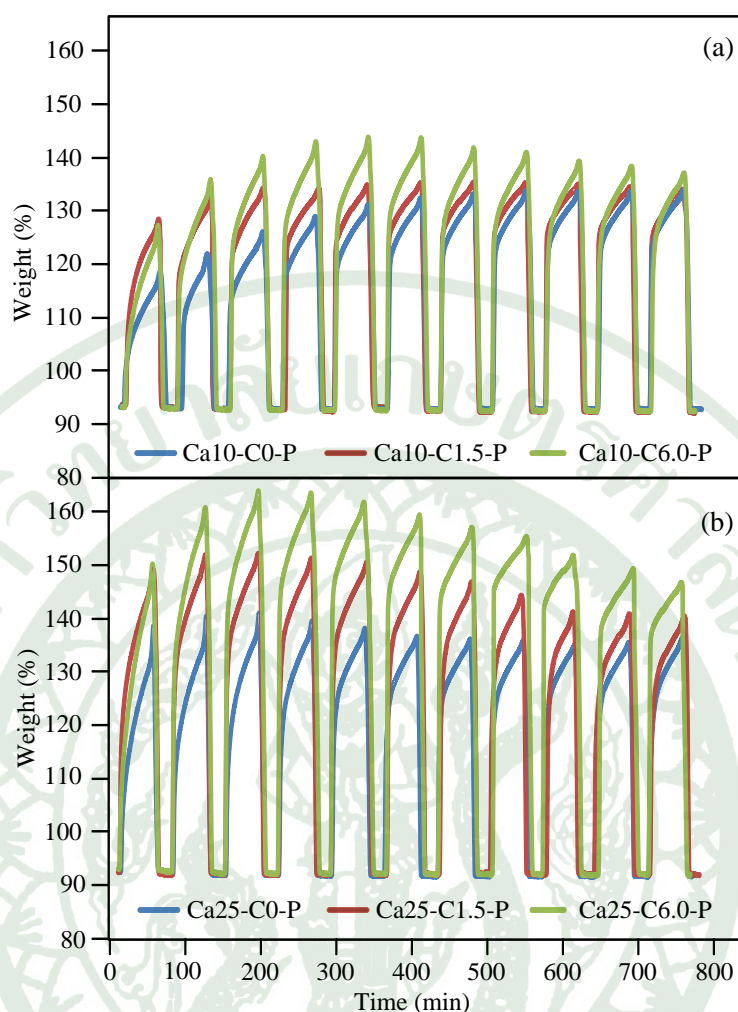
เมื่อพิจารณาในกรณีที่มีการเติม CTAB ปริมาณ 1.5 (Ca10-C1.5-S), 3.0 (Ca10-C3.0-S), 4.5 (Ca10-C4.5-S) และ 6.0 (Ca10-C6.0-S) มิลลิโมล พบว่าในช่วง 5 รอบแรก อัตราการลดลงของค่าแปลงผันเท่ากับ 2.32, 1.62, 2.29 และ 2.75 ต่อรอบ และหลังจากรอบที่ 5 ถึง รอบที่ 11 เท่ากับ 0.99, 1.22, 1.06 และ 0.72 ต่อรอบ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าการลดลงของค่าการแปลงผันของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่เติม CTAB มีการลดลงของอัตราการแปลงผันในช่วง 5 รอบแรกน้อยกว่าตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยไม่มีการเติม CTAB ในขณะที่หลังจาก 5 รอบ พบว่าการลดลงของอัตราการแปลงผันของตัวดูดซับที่เติม CTAB ลดลงมากกว่าตัวดูดซับที่ไม่เติม CTAB สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่มีการเติม CTAB ในการสังเคราะห์มีช่องว่างระหว่างอนุภาคแคลเซียมออกไซด์มากกว่าในกรณีที่ไม่เติม CTAB ซึ่งช่องว่างที่เกิดขึ้นจะลดการสัมผัสกันของอนุภาค ทำให้ลดการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคได้ ในขณะที่ไม่เติม CTAB อนุภาคจะอยู่ใกล้กันมากกว่าตามที่เห็นได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แต่หลังจากเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนขึ้นและปฏิกิริยาแคลซิเนชันจำนวน 5 รอบแล้ว จำนวนชั้นของแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดปกคลุมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคต่ออนุภาคได้และทำให้เกิดการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคได้ง่ายขึ้น จึงเป็นผลทำให้การลดลงของอัตราการแปลงผันภายหลังจาก 5 รอบ มีการลดลงมากกว่าตัวดูดซับที่ไม่เติม CTAB

เมื่อพิจารณาในกรณีที่เพิ่มแคลเซียมเป็น 25 มิลลิโมล (ภาพที่ 24b) พบว่าในช่วง 5 รอบแรก อัตราการลดลงของค่าแปลงผันเท่ากับ 1.06 เปอร์เซ็นต์ต่อรอบ และหลังจากรอบที่ 5 ถึง รอบที่ 11 อัตราการลดลงของค่าแปลงผันเท่ากับ 0.36 เปอร์เซ็นต์ต่อรอบ ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการลดลงของค่าการแปลงผันของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ในกรณีที่เพิ่มแคลเซียมเป็น 25 มิลลิโมล มีการลดลงของอัตราการแปลงผันในช่วง 5 รอบแรกน้อยกว่าตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ในกรณีแคลเซียม 10 มิลลิ

โมล และหลังจาก 5 รอบ พบว่าการลดลงของอัตราการแปลงผันของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ในกรณี que เพิ่มแคลเซียมเป็น 25 มิลลิโมล ลดลงน้อยกว่าตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ในกรณีแคลเซียม 10 มิลลิโมล เนื่องจากในกรณี que เพิ่มแคลเซียมเป็น 25 มิลลิโมล อนุภาคเกิดการรวมตัวเป็นแผ่น (ภาพที่ 21f) ซึ่งจะลดการสัมผัสกันของอนุภาค ส่งผลให้การหลอมรวมตัวกันของอนุภาคจึงเกิดขึ้นได้น้อยลง ส่งผลให้พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาลดลง แต่ในกรณีแคลเซียม 10 มิลลิโมล อนุภาคจะมีลักษณะรวมตัวกันเป็นก้อนมากกว่าเป็นแผ่นตาม que เห็นได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แต่หลังจากเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นและปฏิกิริยาแคลซิเนชันจำนวน 5 รอบ บริเวณที่เกิดการสัมผัสกันส่วนใหญ่เป็นชั้นแคลเซียมคาร์บอเนตเกือบสมบูรณ์แล้ว ส่งผลให้การหลอมรวมตัวกันของอนุภาคแทบจะไม่เกิดขึ้น จึงเป็นผลทำให้การลดลงของอัตราการแปลงผันภายหลังจาก 5 รอบ มีการลดลงน้อยกว่าตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ในกรณีแคลเซียม 10 มิลลิโมล เมื่อเพิ่มปริมาณ CTAB ค่าแปลงผันที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้เหมือนกับการเติม CTAB ในแคลเซียม 10 มิลลิโมล แต่ค่าการแปลงผันมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการเติม CTAB ในแคลเซียม 10 มิลลิโมล เนื่องจากอนุภาครวมตัวกันอย่างหนาแน่นมากขึ้นและเกิดการเชื่อมติดกันระหว่างอนุภาคอีกด้วย



ภาพที่ 24 ค่าการแปลงผันเทียบกับจำนวนรอบที่ใช้ในเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นและปฏิกิริยาแคลซิเนชั่นของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจล โดยที่ปริมาณ Ca(NO₃)₂ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล



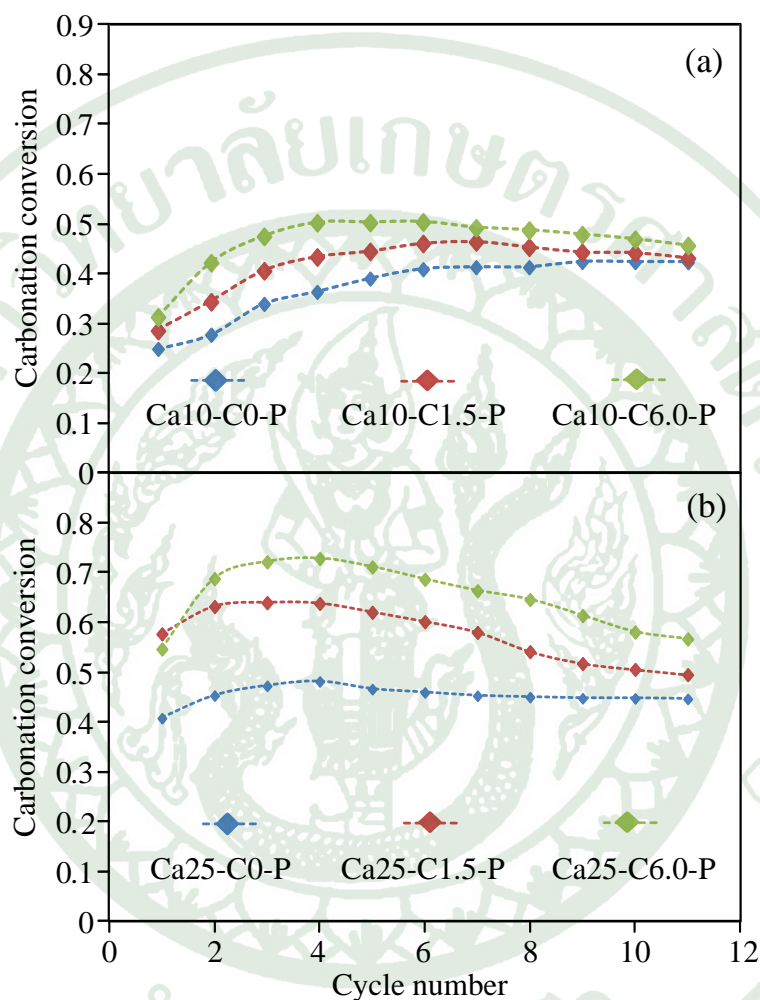
ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเทียบกับเวลาของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีตกตะกอน และถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงทางน้ำหนัก TGA/DTA เพื่อแสดงถึงเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนขึ้นและปฏิกิริยาแคลซิเนชันที่มีจำนวน 11 รอบ โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล

ในขณะที่เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เตรียมด้วยวิธีตกตะกอนมาทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ในอัตราส่วนของ Ca^{2+} : CTAB ต่างๆ ซึ่งภาพที่ 26 แสดงผลของค่าแปลงผันกับจำนวนรอบในการดูดซับและคายซับของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ พบว่าลักษณะของค่าการแปลงผันหลังจากเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนขึ้นและปฏิกิริยาแคลซิเนชันจำนวน 11 รอบ ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรกค่าการแปลงผันเพิ่มมากขึ้น เมื่อจำนวนรอบในการดูดซับและคายซับเพิ่มขึ้น และหลังจากนั้นค่าการแปลงผันค่อนข้างคงที่หรือมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย จากงานวิจัยของ Manovic and Anthony (2008) การเรียกปรากฏการณ์การเพิ่มขึ้นของค่าการแปลงผันที่เห็นช่วงแรกนี้ว่า “Self-reactivation” โดยได้

อธิบายถึงการแพร่ของไอออนภายในอนุภาค ทำให้อนุภาคมีความเสถียรมากขึ้น และการแพร่ออกของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาแคลซิเนชัน ซึ่งอาจจะทำให้เกิดรอยแตกบริเวณผิวของอนุภาคได้ ดังนั้นในการทำปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นของรอบถัดๆ ไป จะพบว่ามี การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น และหลังจากนั้นอิทธิพลที่เกิดจากการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคเริ่มส่งผลกระทบต่อมากขึ้น พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาน้อยลง ดังนั้นค่าแปลงผันจึงมีค่าลดลงด้วย ซึ่งจากภาพที่ 26a พบว่าเมื่อไม่เติม CTAB (Ca10-C0-P) มีค่าการแปลงผัน 23.95 เปอร์เซ็นต์ในรอบแรก โดยในช่วง 9 รอบแรกมีค่าการแปลงผันเพิ่มขึ้นเป็น 42.09 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแปลงผันเท่ากับ 5.23 เปอร์เซ็นต์ต่อรอบ หลังจากเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นและปฏิกิริยาแคลซิเนชันจำนวน 11 รอบ มีค่าการแปลงผันเหลือ 42.04 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคิดเป็นอัตราการลดลงของค่าแปลงผันหลังจากรอบที่ 9 ถึง รอบที่ 11 เท่ากับ 0.03 เปอร์เซ็นต์ต่อรอบ เมื่อพิจารณาในกรณีที่มีการเติม CTAB 1.5 มิลลิโมล (Ca10-C1.5-P) พบว่าในช่วง 7 รอบแรก อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแปลงผันเท่ากับ 3.09 เปอร์เซ็นต์ต่อรอบ และหลังจากการรอบที่ 7 ถึงรอบที่ 11 อัตราค่าแปลงผันลดลง 0.86 เปอร์เซ็นต์ต่อรอบ เมื่อเติม CTAB 6.0 มิลลิโมล (Ca10-C6.0-P) พบว่าในช่วง 6 รอบแรก อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแปลงผันเท่ากับ 3.96 เปอร์เซ็นต์ต่อรอบ และหลังจากรอบที่ 6 ถึง รอบที่ 11 อัตราค่าแปลงผันลดลงเท่ากับ 0.98 เปอร์เซ็นต์ต่อรอบ ซึ่งเห็นได้ว่าการลดลงของจำนวนรอบที่ให้ค่าแปลงผันสูงสุด เมื่อเพิ่มปริมาณ CTAB เนื่องจากเมื่อเพิ่ม CTAB ขนาดอนุภาคแคลเซียมออกไซด์มีขนาดเล็กลง ซึ่งสามารถเห็นได้จากภาพที่ 22b และภาพที่ 22c จึงทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยาได้ง่าย ส่งผลให้เกิดชั้นแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความหนาแน่นกว่าอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้อนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่มีขนาดเล็กจะเกิดการหลอมรวมตัวของอนุภาคให้เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ จึงทำให้การทำปฏิกิริยาในช่วงหลังเกิดมีการลดลงของค่าแปลงผันมากกว่าตัวดูดซับที่ไม่เติม CTAB (Ca10-C0-P)

เมื่อพิจารณาในกรณี que เพิ่มแคลเซียมเป็น 25 มิลลิโมล (ภาพที่ 26b) มีค่าการแปลงผัน 40.72 เปอร์เซ็นต์ในรอบแรก โดยในช่วง 4 รอบแรกมีค่าการแปลงผันเพิ่มขึ้นเป็น 48.08 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแปลงผันเท่ากับ 2.45 เปอร์เซ็นต์ต่อรอบ หลังจากเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นและปฏิกิริยาแคลซิเนชันจำนวน 11 รอบ มีค่าการแปลงผันเหลือ 44.58 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคิดเป็นอัตราการลดลงของค่าแปลงผันหลังจากรอบที่ 4 ถึง รอบที่ 11 เท่ากับ 0.88 เปอร์เซ็นต์ต่อรอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจำนวนรอบที่ให้ค่าแปลงผันสูงสุดมีจำนวนน้อยกว่าในกรณีแคลเซียม 10 มิลลิโมล เนื่องจากภาพ SEM สามารถบ่งบอกได้ถึงขนาดอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้พบว่าค่าการแปลงผันมีค่าสูงกว่ากรณีใช้แคลเซียม 10 มิลลิโมล เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็ก จึงทำให้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูง (ตารางที่ 2: (Ca25-C0-P)) อย่างไรก็ตามความเสถียรของอนุภาคกลับมีค่า

ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคได้ง่าย เมื่อเติม CTAB ลงไป พบว่าค่าแปลงผันที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้เหมือนกับการเติม CTAB ในแคลเซียม 10 มิลลิโมล แต่ค่าการแปลงผันมีจะค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับการเติม CTAB ในแคลเซียม 10 มิลลิโมล



ภาพที่ 26 ค่าการแปลงผันเทียบกับจำนวนรอบที่ใช้ในเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชันและปฏิกิริยาแคลซิเนชันของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจล โดยที่ปริมาณ Ca(NO₃)₂ (a) 10 มิลลิโมล (b) 25 มิลลิโมล

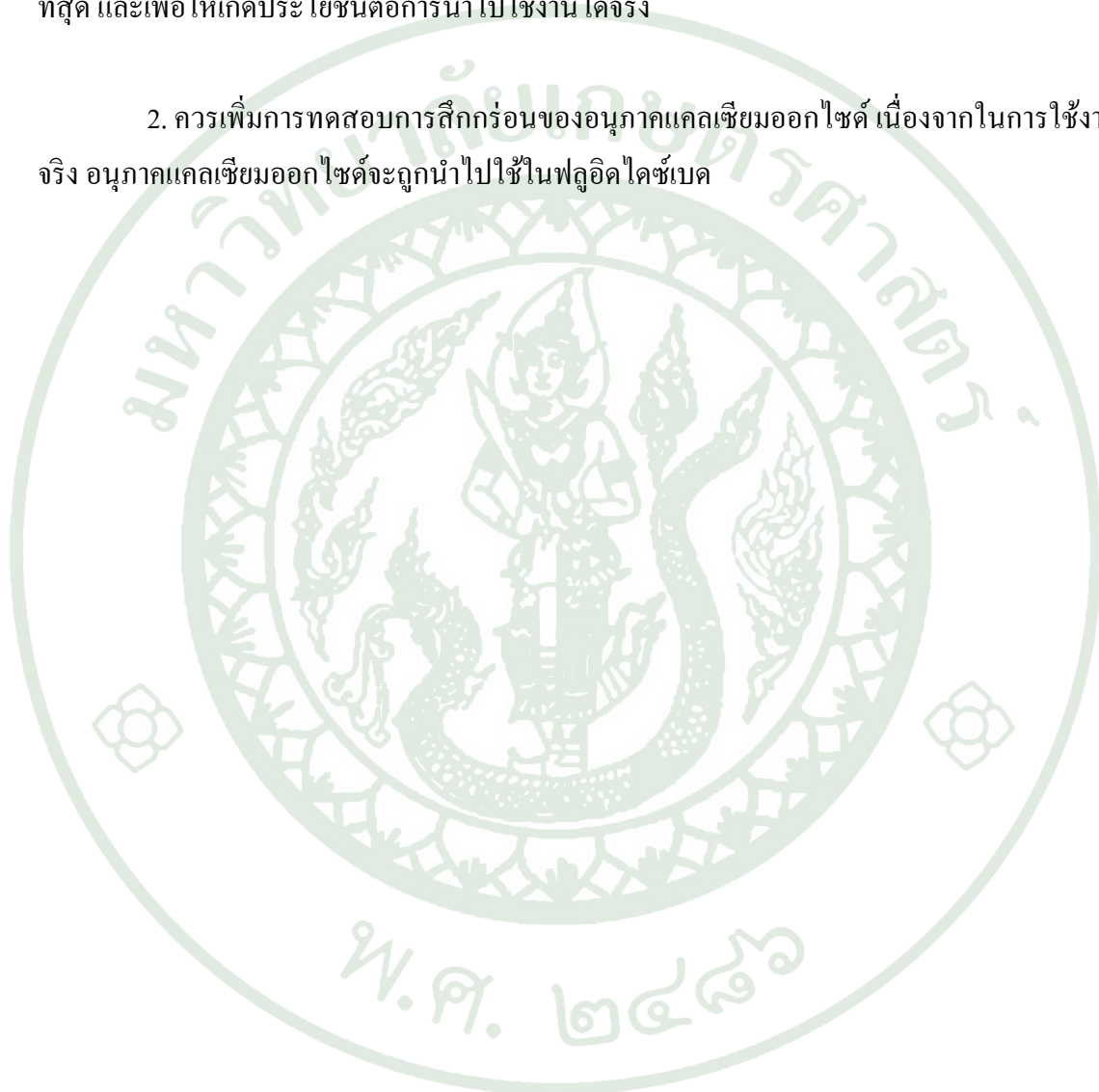
สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์จาก 2 วิธีคือ วิธีโซลเจลและวิธีตกตะกอน โดยใช้ CTAB เป็นสารช่วยลดการรวมตัวกันของอนุภาค และศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อ CTAB ซึ่งจากการศึกษาการสังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล พบว่าเมื่อปริมาณ CTAB เพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มสูงขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า CTAB ขัดขวางการรวมตัวกันของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ อนุภาคมีขนาดเล็กกว่ากรณีที่ไม่เติม CTAB ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียม กลับส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจะลดลง เนื่องจากอนุภาคเกิดการรวมตัวอย่างหนาแน่นโดยอัตราส่วน Ca^{2+} : CTAB ที่ 10: 3.0 มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.85 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.31 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพการในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าให้ค่าการผันแปรสูงสุดที่ 82.4 และ 68.6 เปอร์เซ็นต์เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาในรอบแรกและรอบที่ 11 ตามลำดับ ในกรณีของการสังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ด้วยวิธีตกตะกอน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมและปริมาณ CTAB ขนาดอนุภาคเล็กลง ส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วน Ca^{2+} : CTAB ที่ 25: 6.0 มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.66 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.06 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพการในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าให้ค่าการผันแปรสูงสุดที่ 54.60 และ 56.60 เปอร์เซ็นต์เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาในรอบแรกและรอบที่ 11 ตามลำดับ นอกจากนี้การสังเคราะห์ตัวดูดซับด้วยวิธีตกตะกอนยังพบอีกว่าค่าผันแปรเพิ่มมากขึ้น เมื่อจำนวนรอบในการดูดซับและคายซับมากขึ้น หรือที่เรียกว่า “Self-reactivation”

ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดสอบความเสถียรของอนุภาคเคลือบออกไซด์ ควรเพิ่มจำนวนรอบที่ใช้ในเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นและปฏิกิริยาเคลือบชั้นให้มากที่สุด เพื่อจะได้ค่าที่ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด และเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานได้จริง
2. ควรเพิ่มการทดสอบการสึกกร่อนของอนุภาคเคลือบออกไซด์ เนื่องจากในการใช้งานจริง อนุภาคเคลือบออกไซด์จะถูกนำไปใช้ในฟลูอิดไดซ์เบด



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Agnihotri, R., S. K. Mahuli, S. S. Chauk and L.-S. Fan 1999 Influence of surface modifiers on the structure of precipitated calcium carbonate, **Ind. Eng. Chem. Res** 38: 2283-2291.
- Aihara, M., T. Nagai, Matsushita, J. Negishi and Y. H. Ohya 2001. Development of porous solid reactant for thermal-energy storage and temperature upgrade using carbonation/decarbonation reaction, **Applied Energy** 69: 225-238.
- Albrecht, K. O., K. S. Wagenbach, J. A. Satrio, B. H. Shanks and T. D. Wheelock 2008. Development of a CaO-based CO₂ sorbent with improved cyclic stability, **Industrial & Engineering Chemistry Research** 47: 7841-7848.
- Alvarez, D. and J. C. Abanades 2005. Determination of the critical product layer thickness in the reaction of CaO with CO₂, **Ind. Eng. Chern. Res** 44:5608-5615.
- Anthony, E. J 2011. Ca looping technology: Current status, developments and future directions. **Greenhouse Gas Sci. Technol** 1:36-47.
- Blamey, J., E. J. Anthony, J. Wang and P. S. Fennell 2010. The calcium looping cycle for large-scale CO₂ capture. **Proq. Energy Combust. Sci** 36:260-279.
- Blarney, J., N. P. M. Paterson, D. R. Dugwell and P. S. Fennell 2010. Mechanism of particle breakage during reactivation of CaO-based sorbents for CO₂ capture. **Energy Fuels** 24: 4605-4616.
- Borgwardt R. H 1989. Calcium oxide sintering in atmospheres containing water and carbon dioxide. **Ind. Eng. Chern. Res** 28:493-500.
- Coenen, A., T.L. Church, and A.T. Harris 2012. Biological versus Synthetic Polymers as Templates for Calcium Oxide for CO₂ Capture. **Energ. Fuel** 26: 162-168.

- Chen, Y.T., M. Karthik, and H. Bai 2009. Modification of CaO by organic alumina precursor for enhancing cyclic capture of CO₂ greenhouse gas. **Journal. Environ. Eng** 135: 459-464.
- Dasgupta, D., K. Mondal, and T. Wiltowski 2008. Robust, high reactivity and enhanced capacity carbon dioxide removal agents for hydrogen production applications. **Int. J. Hydrogen Energy** 33:303-311.
- Florin, N. H. and A. T. Harris 2007. Hydrogen production from biomass coupled with carbon dioxide capture: The implications of thermodynamic equilibrium. **Int. J. Hydrogen Energy** 32:4119-4134.
- _____ 2008a. Enhanced hydrogen production from biomass with in situ carbon dioxide capture using calcium oxide sorbents. **Chem. Eng. Sci** 63:287-316.
- _____ 2008b. Mechanistic study of enhanced H₂ synthesis in biomass gasifiers with in-situ CO₂ capture using CaO. **AIChE J** 54:1096-1109.
- _____ 2008c. Preparation and characterization of a tailored carbon dioxide sorbent for enhanced hydrogen synthesis in biomass gasifiers. **Chem. Res** 47:2191-2202.
- Grasa, G.S. and J.C. Abanades 2006. CO₂ capture capacity of CaO in long series of carbonation/calcinations cycles. **Ind. Eng. Chem. Res.** 45: 8846-8851.
- _____ and M. Alonso 2007. Comparison of CaO-based synthetic CO₂ sorbents under realistic calcination conditions. **Energy and Fuels** 21:3560-3562.
- Gupta, H and L. S. Fan 2002. Carbonation-calcination cycle using high reactivity calcium oxide for carbon dioxide separation from flue gas. **Ind. Eng. Chem. Res** 41:4035-4042.

- Han, L., Q. Wang, Q. Ma, C. Yu, Z. Luo, and K. Cen 2010. Influence of CaO additives on wheat-straw pyrolysis as determined by TG-FTIR analysis. **J. Anal. Appl. Pyrolysis** 88:199-206.
- Harrison, D. P 2008. Sorption-enhanced hydrogen production: A review. **Ind. Eng. Chem. Res** 47:6486-6501.
- Hughes, R. W., D. Lu, E. J. Anthony, and Y. Wu 2004. Improved long-term conversion of limestone-derived sorbents for in situ capture of CO₂ in a fluidized bed combustor. **Ind. Eng. Chem. Res** 43:5529-5539.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007: Synthesis report, 2007. URL <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-syr.htm>.
- Juvekar ,V. A. and M. M. Sharma 1977. Absorption of CO₂ in a suspension of lime. **Chem. Eng. Sci.** 28:825-837.
- Jos, G.J., Olivier, J-M. Greet, A.H.W Jeroen and J.W Peters, 2011. Long-Term Trend in Global CO₂ Emissions 2011 Report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague, 2011; European Union, 2011.
- Jones, N 2009. Sucking it up. **Nature** 458:1094-1097.
- Karhunen, T, A. Lähde, J. Leskinen, R. Büchel, O. Waser, U. Tapper and J. Jokiniemi, 2011. Transition metal doped lithium titanium oxide nanoparticles made using flame spray pyrolysis. **ISRN Nanotechnology**. Volume 2011, Article ID 180821, 6 pages
- Li, L. D. L. King, Z. Nie, and C. Howard 2009. Magnesia-stabilized calcium oxide absorbents with improved durability for high temperature CO₂ capture. **Ind. Eng. Chem. Res** 48:10604-10613.

- Li, Z. S., N. S. Cai, Y. Y. Huang and H. J. Han 2006. Effect of preparation temperature on cyclic CO₂ capture and multiple carbonation-calcination cycles for a new Ca-based CO₂ sorbent. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 45:1911-1917.
- Liu, W. H. An, C. Qin, J. Yin, G. Wang, B. Feng, and M. Xu 2012. Performance enhancement of calcium oxide sorbents for cyclic CO₂ capture: A review. **Energy Fuels** 26:2751-2767.
- Lu, H. A. Khan, and P. G. Smirniotis 2008. Relationship between structural properties and CO₂ capture performance of CaO-based sorbents obtained from different organometallic precursors. **Ind. Eng. Chem. Res** 47:6216-6220
- _____ and S.E. Pratsinis 2009 Flame-made durable doped-CaO nanosorbents for CO₂ capture. **Energy Fuels** 23: 1093–1100
- Luo, C. Q. Shen, N. Ding, Z. Feng, Y. Zheng, and C. Zheng 2012. Morphological Changes of Pure Micro- and Nano-Sized CaCO₃ during a Calcium Looping Cycle for CO₂ Capture. **Chemical Engineering and Technology** 35:547-554
- Luo, C, Y. Zheng, C. Zheng, J. Yin, C Qin and B. Feng 2013. Manufacture of calcium-based sorbents for high temperature cyclic CO₂ capture via a sol-gel process. **International Journal of Greenhouse Gas Control** 12:193-199.
- Manovic, V. and E. J. Anthony 2008. Thermal activation of CaO-based sorbent and self-reactivation during CO₂ capture looping cycles. **Environmental Science & Technology** 42:4170–4174.
- _____ D. Lu, J.-P. Charland, J. Blamey and P. S Fennell 2009. Influence of calcination conditions on carrying capacity of CaO-based sorbent in CO₂ looping cycles. **Fuel** 88:1893–1900.

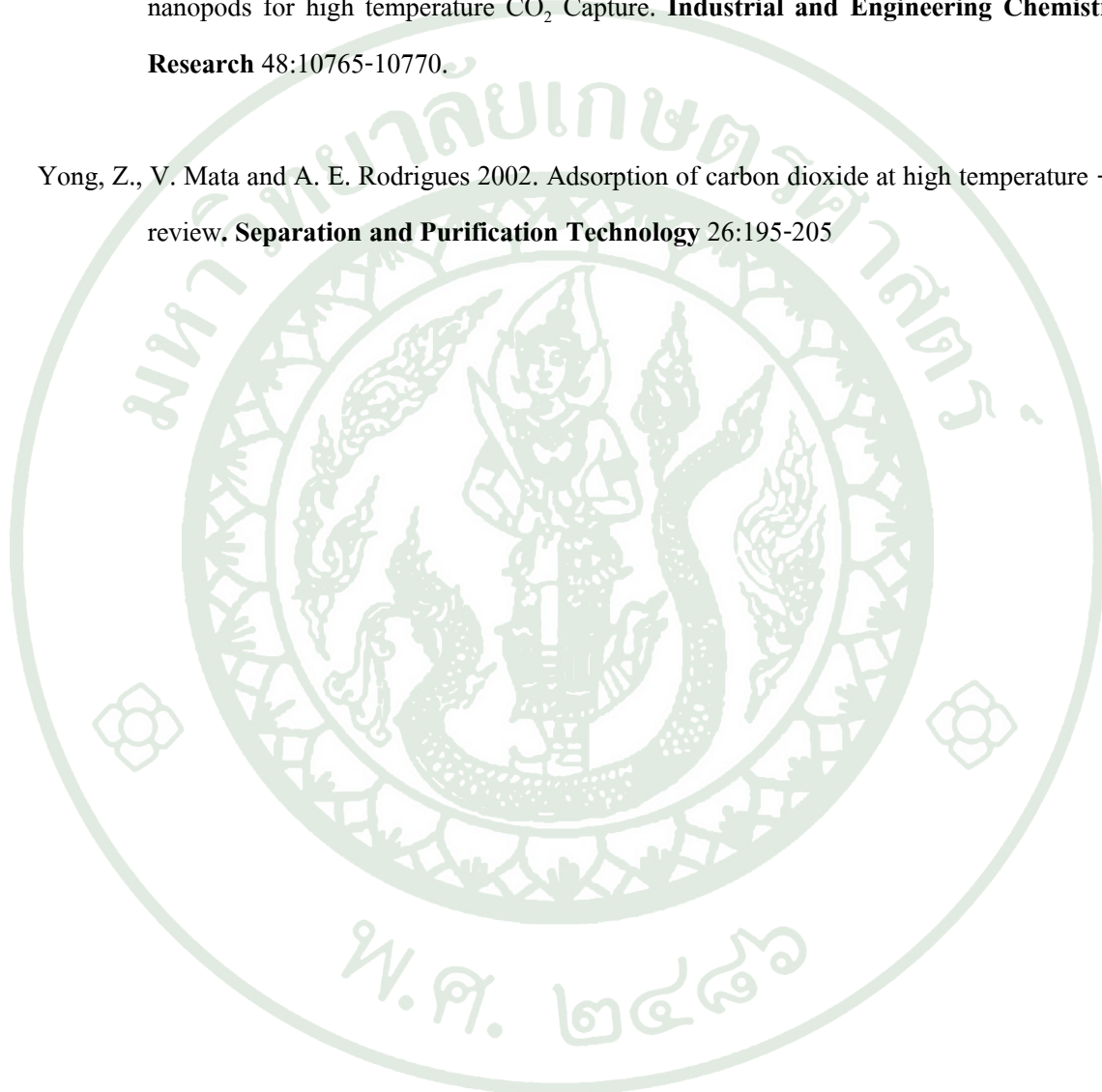
- Mansilla, C., S. Avril, J. Imbach, and A. Le Duigou 2012. CO₂-free hydrogen as a substitute to fossil fuels: What are the targets? prospective assessment of the hydrogen market attractiveness. **Int. J. Hydrogen Energy** 37:9451-9458.
- Moghtaderi, B 2012. Review of the recent chemical looping process developments for novel energy and fuel applications. **Energy Fuels** 26:15-40.
- Monastersky, R 2009. Climate crunch: A burden beyond bearing. **Nature** 458:1091-1094.
- Mullin, J.W. *Crystallization*. Butterworth-Heinemann, Reed Educational and Professional Publishing Ltd., 2001.
- Mueller, R. L. Madler, and S.E. Pratsinis 2003. Nanoparticle synthesis at high production rates by flame spray pyrolysis. **Chem. Eng. Sci** 58:1969-1976.
- Pacala, S. and R. Socolow 2004. Stabilization wedges: Solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. **Science** 305:968-972.
- Pacciani, R., C. R. Miiller, J. F. Davidson, J. S. Dennis, and A. N. Hayhurst 2008. Synthetic Ca-based solid sorbents suitable for capturing CO₂ in a fluidized beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering** 86:356-366.
- Reddy, E. P. and P. G. Smirniotis 2004. High-temperature sorbents for CO₂ Made of alkali metals doped on CaO supports. *The Journal of Physical Chemistry B* 108:7794-7800.
- Roesch, A., E. P. Reddy and P. G. Smirniotis 2005. Parametric study of Cs/CaO sorbents with respect to simulated flue gas at high temperatures. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 44:6485-6490.
- Roger A. Pielke Jr 2009. An idealized assessment of the economics of air capture of carbon dioxide in mitigation policy. **Environ. Sci. Policy** 12:216-225.

- Rivera Virtudazo, R.V., M. Fuji, C. Takai and T. Shirai 2012. Characterization on the precipitate sample of cetyltrimethylammonium bromide adsorbed onto nanocube CaCO_3 particles from aqueous-ammonia-rich solution. **J Nanopart Res** 14:1304.
- Santosa, E.T., C. Alfonsina, A.J.S. Chambela, A. Fernandes, A.P. Soares Dias, C.I.C. Pinheiro and M.F. Ribeiro 2012. Investigation of a stable synthetic sol-gel CaO sorbent for CO_2 capture **Fuel** 94:624-628.
- Schwarz, J. A., C. Contescu and A. Contescu 1995. Methods for preparation of catalytic materials. **Chem. Rev** 95:477-510.
- Stanmore, B. R. and P. Gilot 2005. Review-calcination and carbonation of limestone during thermal cycling for CO_2 sequestration. **Fuel Process. Technol.** 86:1707-1743.
- Sun, P., J. R. Grace, C. J. Lim, and E. J. Anthony 2007. The effect of CaO sintering on cyclic CO_2 capture in energy systems. **AIChE J** 53:2432-2442.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. Report of the Conference of the Parties on its fifteenth session, held in Copenhagen from 7 to 19 December 2009. Technical report, United Nations, 2009.
- Wang, Y., S. Lin and Y. Suzuki 2007. Study of limestone calcination with CO_2 capture: Decomposition behavior in a CO_2 atmosphere. **Energy Fuels** 21:3317-3321.
- Widyawati, M., T. L. Church, N. H. Florin, and A. T. Harris 2011. Hydrogen synthesis from biomass pyrolysis with in situ carbon dioxide capture using calcium oxide. **Int. J. Hydrogen Energy** 36:4800-4813.
- Wu, Su F., H. Li. Qing, N. Kim. Jong and B. Yi. Kwang 2008. Properties of a nano $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ CO_2 sorbent **Ind. Eng. Chem. Res.**47:180-184

Yang, H., Z. Xu, M. Fan, R. Gupta, R. B. Slimane, A. E. Bland, and I. Wright 2008. Progress in carbon dioxide separation and capture: A review. **J. Environ. Sci.** 20:14-27.

Yang, Z., M. Zhao, N. H. Florin and A. T. Harris 2009. Synthesis and characterization of CaO nanopods for high temperature CO₂ Capture. **Industrial and Engineering Chemistry Research** 48:10765-10770.

Yong, Z., V. Mata and A. E. Rodrigues 2002. Adsorption of carbon dioxide at high temperature - a review. **Separation and Purification Technology** 26:195-205





การคำนวณขนาดผลึกจาก XRD

การคำนวณ ขนาดผลึกหาได้จากสมการ Scherrer

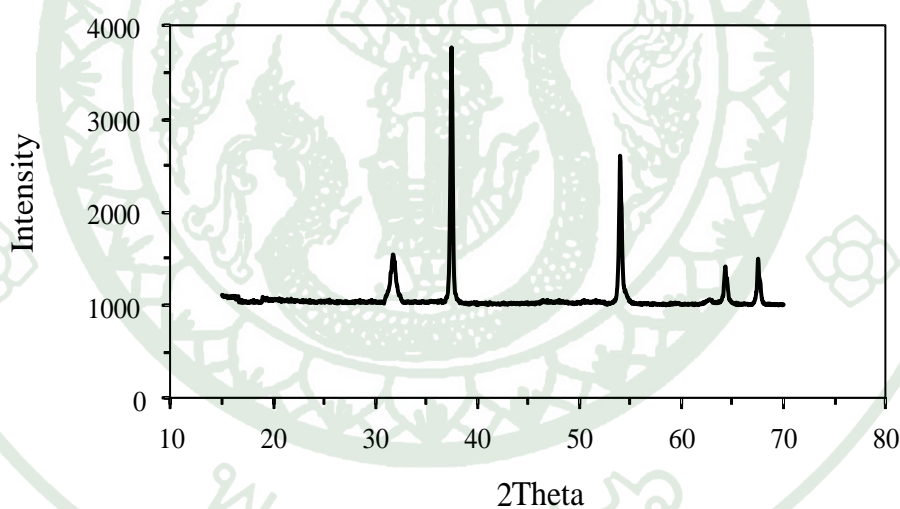
$$d = \frac{0.89\lambda}{B\cos\theta} \times \frac{180^\circ}{\pi}$$

โดยที่ d = ขนาดผลึกเฉลี่ยของแคลเซียมออกไซด์

λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (1.54 อังสตรอม)

B = ค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีคแคลเซียมออกไซด์

ตัวอย่าง การคำนวณขนาดผลึกของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจลในกรณี $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 10 มิลลิโมล ไม่เติม CTAB



ภาพผนวกที่ 1 XRD pattern หลังกระบวนการแคลไซน์ของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจล โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 10 มิลลิโมล ไม่มี CTAB (Ca10-C0-S)

จากการทดลองสามารถวัดค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$$\lambda = 1.54 \text{ อังสตรอม} \quad B = 0.24 \quad \theta = 18.75$$

$$d = [0.89 \times 1.54 \times 10^{-10} \times 180] / [3.14 \times 0.24 \times \cos(18.75)] = 34.57 \text{ นาโนเมตร}$$

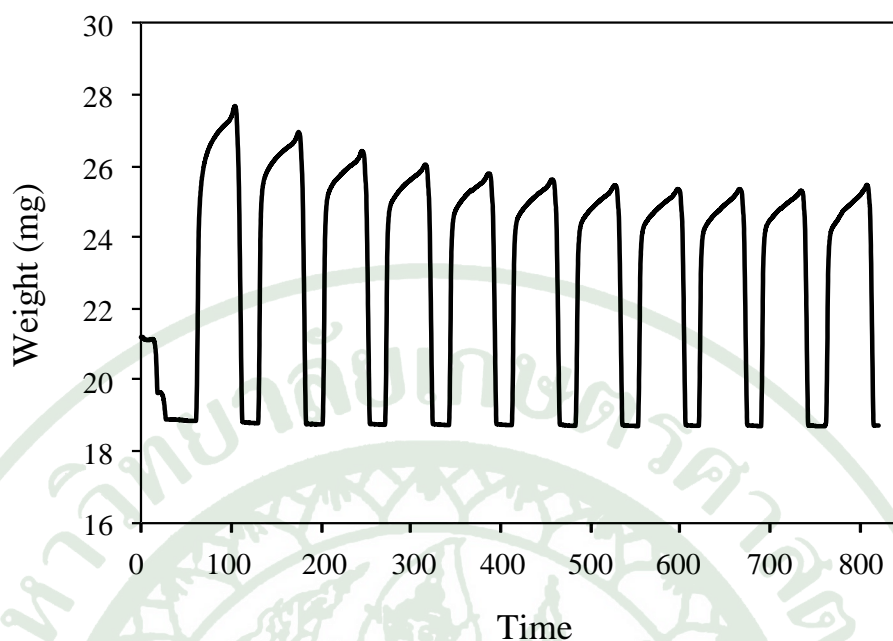
การคำนวณค่าการแปลงผัน (conversion)

การคำนวณ ค่าแปลงผันหาได้จากสมการ

$$X_n = \frac{m_{\text{carb}}^n - m_{\text{cal}}^n}{m_0 a} \times \frac{W_{\text{CaO}}}{W_{\text{CO}_2}}$$

- โดยที่ X_n = ค่าการแปลงผันของตัวดูดซับในรอบที่ n
 m_{carb}^n = น้ำหนักของตัวดูดซับหลังจากเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นในรอบที่ n
 m_{cal}^n = น้ำหนักของตัวดูดซับหลังจากเกิดปฏิกิริยาแคลซิเนชั่นในรอบที่ n
 m_0 = น้ำหนักเริ่มต้นของตัวดูดซับ
 a = สัดส่วนของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์เริ่มต้น
 W_{CaO} = มวลโมเลกุลของแคลเซียมออกไซด์ 56 กรัมต่อโมล
 W_{CO_2} = มวลโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 44 กรัมต่อโมล

ตัวอย่าง การคำนวณค่าการแปลงผันของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธี โซลเจลในกรณี $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 10 มิลลิโมล ไม่เติม CTAB



ภาพผนวกที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเทียบกับเวลาของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจล และถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงทางน้ำหนัก TGA/DTA เพื่อแสดงถึงเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนขึ้นและปฏิกิริยาแคลซิเนชันขึ้นที่มีจำนวน 11 รอบ โดยที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 10 มิลลิโมล ไม่มี CTAB (Ca10-C0-S)

จากการทดลองสามารถวัดค่าต่างๆ ในรอบที่ $n = 1$ ได้ดังนี้

$$m_{carb}^n = 27.52 \text{ มิลลิกรัม}$$

$$m_{cal}^n = 18.89 \text{ มิลลิกรัม}$$

$$m_0 = 18.87 \text{ มิลลิกรัม}$$

$$a = 1$$

$$W_{CaO} = 56 \text{ กรัมต่อโมล}$$

$$W_{CO_2} = 44 \text{ กรัมต่อโมล}$$

$$X_n = [(27.38 - 18.87) / 18.80(1)] \times 56/44$$

$$= 0.582$$

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นายเอกรัฐ อักษรเฟือก
เกิดวันที่	25 มกราคม 2532
สถานที่เกิด	อำเภอไชยา จังหวัดสุราษฎร์ธานี
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยศิลปากร
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุน วิจัยระดับบัณฑิตศึกษาเพื่อการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ (พ.ศ. 2556)

