

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาแคลเซียมออกไซด์เพื่อใช้ดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

DEVELOPMENT OF CALCIUM OXIDE FOR CARBON DIOXIDE SORPTION



T104150

ศิริวิมล บุตรี
อนวัช เจริญยิ่ง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 104150
วัน,เดือน,ปี 30 ต.ค. 2552



ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

DEVELOPMENT OF CALCIUM OXIDE FOR CARBON DIOXIDE SORPTION

SIRIVIMOL BOOTLEE

ANAWACH CHAROENYING

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEER

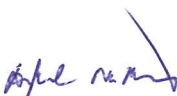
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG


2008

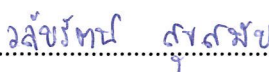
ปริญญานิพนธ์เรื่อง การพัฒนาเคลือบเซรามิกไฮดรอกซีเพื่อใช้ดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
โดย นางสาวศิริวิมล บุตรดี
นายอนวัช เจริญยิ่ง
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ดวงกมล ฌ ระนอง
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รศ.ดร.ดวงกมล ฌ ระนอง)


..... กรรมการ
(ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)


..... กรรมการ
(ดร. วลัยรัตน์ สุขสมัย)

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การพัฒนาแคลเซียมออกไซด์เพื่อใช้ดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์		
นักศึกษา	นางสาวศิริวิมล บุตรลี	รหัสประจำตัว	48010897
	นายอนวัช เจริญยิ่ง	รหัสประจำตัว	48011049
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
พ.ศ.	2552		
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ. ดร. ดวงกมล ณ ระนอง		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของแคลเซียมออกไซด์โดยแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ทำการศึกษามาจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอน (Precipitation of Calcium Carbonate) โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ทำการสังเคราะห์เป็น 30 °C และ 50 °C เพื่อหาแคลเซียมออกไซด์ที่สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 500 °C 600 °C และ 700 °C โดยพิจารณาประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้ทั้งหมด การศึกษาปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นทำได้โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุภายใต้ความดันบรรยากาศโดยป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยโมล อัตราการไหลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 50 ml/min ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ 0.5 กรัม จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการทดลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้เพิ่มสูงขึ้นแต่ประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงซึ่งแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอน ที่ 50°C มีประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด

Thesis	Development of Calcium Oxide for Carbon Dioxide Sorption		
Student	Miss Sirivimol	Bootlee	Student ID. 48010897
	Mr. Anawach	Charoenying	Student ID. 48011049
Degree	Bachelor of Engineering		
Program	Chemical Engineering		
Year	2008		
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Duangkamol Na-Ranong		

ABSTRACT

This research is a study of carbonation of calcium oxide. The calcium oxide was synthesized by precipitate of calcium carbonate method (PCC) with different temperature. In order to determine the high performing calcium oxide in different temperature (500 °C–700 °C), we considered the performance and capacity of calcium oxide for capture carbon dioxide. The reaction test was using a pack-bed reactor operated under atmospheric pressure with 0.5 g of calcium oxide. The 5% mol carbon dioxide was feed into the reactor with 50 ml/min. The result showed that capacity of calcium oxide increased with increasing of temperature but the performance of calcium oxide is decreased and the result showed that the calcium oxide was synthesized by PCC at 50 °C was the high performance calcium oxide.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของ รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ และ ดร.วัลย์รัตน์ สุขสมัย ที่กรุณาสละเวลา เป็นกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์

ขอขอบคุณคุณรัตนากร ยวงสวัสดิ์ นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้ความรู้และ คำแนะนำที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณคุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณคุณสุทธิพงษ์ วงศ์สายศรี จากบริษัท เมโทร โลยี เทคโนโลยี จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในการซ่อมเครื่องมือและให้คำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการใช้เครื่องมือ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว ผู้มีพระคุณ และคณาจารย์ทุกท่าน หากมี ข้อผิดพลาดประการใดผู้ทำการวิจัยขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวศิริวิมล บุตรดี

นายอนวัช เจริญยิ่ง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 กระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	4
2.1.1 กระบวนการดูดซึมทางเคมีและทางกายภาพ.....	4
2.1.2 กระบวนการกลั่นด้วยอุณหภูมิต่ำ.....	5
2.1.3 กระบวนการดูดซับทางกายภาพโดยใช้ของแข็ง.....	5
2.1.4 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน.....	5
2.2 ปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น-แคลซิเนชัน.....	6
2.3 การสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์.....	7
2.4 ปฏิกิริยาวิวิธพันธ์แบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	9
2.4.1 รูปแบบการเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธ์แบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	9
2.5 การใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์.....	11
2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การทดลอง.....	14
3.1 การสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์.....	14
3.2 ทดสอบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	16
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	18
4.1 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอน (PCC). ..	18
4.2 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับจากการทำปฏิกิริยา.....	20
4.2.1 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า.....	20
4.2.1.1 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า.....	23
4.2.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า.....	24
4.2.2 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับด้วย PCC-CaO (30°C) ...	25
4.2.2.1 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PCC-CaCO ₃ และ PCC-CaO.....	26
4.2.3 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับด้วย PCC-CaO (50°C).....	27
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	29
เอกสารอ้างอิง.....	30
ภาคผนวก ก. กราฟมาตรฐานระหว่างสัญญาณไฟฟ้ากับร้อยละโดยโมลของคาร์บอนไดออกไซด์.....	32
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณ.....	33
ภาคผนวก ค. โครมาโตแกรมของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	36

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซับด้วยสารละลายเอมีน.....	4
รูปที่ 2.2 รูปแบบการเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธ์แบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	10
รูปที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีตกตะกอน.....	15
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	17
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช และเวลาที่ทำปฏิกิริยา.....	18
รูปที่ 4.2 เปรอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ เปรียบเทียบกับเวลาในการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้าที่ 500 °C	20
รูปที่ 4.3 เปรอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ เปรียบเทียบกับเวลาในการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า.....	22
รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า.....	23
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนและ Desorption DV(log d)....	24
รูปที่ 4.6 เปรอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ เปรียบเทียบกับเวลาในการทำปฏิกิริยาของ PCC-CaO (30°C).....	25
รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PCC-CaCO ₃ (30°C) และ PCC-CaO(30°C)	26
รูปที่ 4.8 เปรอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ เปรียบเทียบกับเวลาในการทำปฏิกิริยา (PCC-CaO(50°C))	27
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับ.....	28
รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานระหว่างสัญญาณไฟฟ้ากับร้อยละ โดยโมลของคาร์บอนไดออกไซด์	32
รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ CO ₂ ต่อเวลา กับเวลาที่ใช้ดักจับ.....	35
รูปที่ ค.1 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า ค่าที่อุณหภูมิ 500°C.....	36
รูปที่ ค.2 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า ค่าที่อุณหภูมิ 550°C.....	36
รูปที่ ค.3 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า ค่าที่อุณหภูมิ 600°C.....	37

รูปที่ ค.4 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการ ค้าที่อุณหภูมิ650°C.....	37
รูปที่ ค.5 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการ ค้าที่อุณหภูมิ700°C.....	38
รูปที่ ค.6 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย PCC-CaO (30°C) ศึกษาที่ อุณหภูมิ 500°C.....	38
รูปที่ ค.7 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย PCC-CaO (30°C) ศึกษาที่ อุณหภูมิ 600°C.....	39
รูปที่ ค.8 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย PCC-CaO (30°C) ศึกษาที่ อุณหภูมิ700°C	39
รูปที่ ค.9 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย PCC-CaO (50°C) ศึกษาที่ อุณหภูมิ 500°C.....	40
รูปที่ ค.10 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย PCC-CaO (50 °C) ศึกษาที่ อุณหภูมิ 600°C.....	40
รูปที่ ค.11 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย PCC-CaO (50 °C) ศึกษาที่ อุณหภูมิ 700°C.....	41

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่า surface area และ pore volume ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน.....	7
ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃) ที่สังเคราะห์ได้.....	19
ตารางที่ ข.1 ยกตัวอย่างข้อมูลเวลาและสัญญาณไฟฟ้าจากการทดลองที่ทดสอบการดักจับ CO ₂ ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า ที่อุณหภูมิ 600°C	33
ตารางที่ ข.2 ยกตัวอย่างข้อมูลเวลา สัญญาณไฟฟ้า ร้อยละของ CO ₂ และ โมล CO ₂ ต่อเวลาจากการทดลองที่ทดสอบการดักจับ CO ₂ ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า ที่อุณหภูมิ 600°C.....	34

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันหลายประเทศมีความต้องการใช้พลังงานมากขึ้น เนื่องจากการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจอุตสาหกรรมและครัวเรือนสูงขึ้น ซึ่งแหล่งพลังงานส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ โดยกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเหล่านี้ได้นำไปสู่การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่อากาศ อีกทั้งยังมีกิจกรรมอีกหลายกิจกรรมที่ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น ภูมิปัญญาฟาร์มมิ่งเอทานอลด้วยไอน้ำ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้นานาชาติประเทศจึงให้ความสำคัญในการคิดค้นวิธีการแยกและดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลหรือระหว่างปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อไม่ให้ปล่อยสู่อากาศ เพราะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีส่วนทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้โลกร้อน

การแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงหรือระหว่างปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน (carbonation)-แคลซิเนชัน (calcinations) เป็นวิธีทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เพราะมีขั้นตอนการปฏิบัติไม่ซับซ้อนและสามารถใช้แยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการต่างๆ ได้หลายกระบวนการ โดยให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับโลหะออกไซด์ (metal oxide) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดักจับ (sorbent) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดผลิตภัณฑ์โลหะคาร์บอเนต (metal carbonate) โดยเรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและสามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิโลหะคาร์บอเนตเรียกว่าปฏิกิริยาแคลซิเนชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน โดยโลหะออกไซด์ที่นิยมใช้เป็นตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง [1] แคลเซียมออกไซด์สามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น จากการเผาโลหะคาร์บอเนตที่เป็นวัสดุธรรมชาติและจากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้จากวิธีตกตะกอน (precipitation calcium carbonate) เป็นต้น โดยแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาโลหะคาร์บอเนตที่เป็นวัสดุธรรมชาติจะมีประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำเพราะมีโครงสร้างแบบไมโครพอร์รัส (microporous) คือมีขนาดรูพรุน (pore size) น้อยกว่า 2 นาโนเมตร ซึ่งง่ายต่อการเกิด sintering แต่แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้จากวิธีตกตะกอนจะมีประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง [2] เพราะมีโครงสร้างแบบเมโซพอร์รัส (mesoporous) คือ มีขนาดรู

พรมอยู่ในช่วง 5-20 นาโนเมตร ดังนั้นการทดลองโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น-แคลซิเนชัน จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ต้องศึกษา

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของชนิดแคลเซียมออกไซด์และอุณหภูมิ ที่มีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น) ให้มีประสิทธิภาพสูงเพื่อลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยสู่บรรยากาศและสามารถนำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาแคลเซียมออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ศึกษาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตรด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า (commercial grade) และแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้จากวิธีตกตะกอนที่อุณหภูมิ 500 °C 600 °C และ 700 °C เพื่อหาแคลเซียมออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด ในการทดลองใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุที่ปฏิบัติงานภายใต้ความดันบรรยากาศและวิเคราะห์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟที่มีตัวตรวจวัดแบบ TCD

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ศึกษาวิธีการทดลอง ออกแบบการทดลองจัดเตรียมอุปกรณ์และทำการทดลองเบื้องต้น
- 1.4.3 สังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์
- 1.4.4 ทดลองเพื่อหาตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 500 °C 600 °C และ 700 °C
- 1.4.7 วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบอิทธิพลของชนิดแคลเซียมออกไซด์และอุณหภูมิ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

2. เป็นแนวทางในการเลือกชนิดของแคลเซียมออกไซด์เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎี

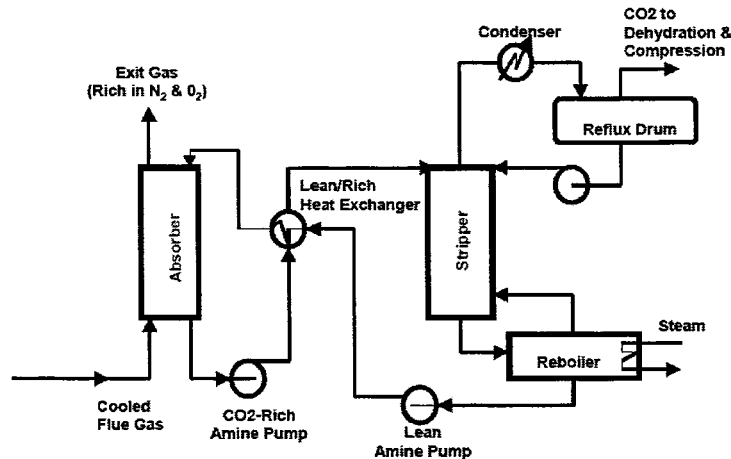
2.1 กระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีหลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและสภาวะที่ใช้ในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถแบ่งตามเทคโนโลยีการแยกออกเป็น 4 วิธี ดังนี้

2.1.1 กระบวนการดูดซึมทางเคมีและทางกายภาพ

(ก) กระบวนการดูดซึมทางเคมีโดยตัวทำละลาย

กระบวนการดูดซึมทางเคมีสำหรับการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารละลายประเภทเอมีนในการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สที่เป็นกรดจากแก๊สที่เกิดขึ้นในกระบวนการ โดยการเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการให้สารละลายเอมีนไหลสวนทางกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการภายในหอดูดซึม ส่วนสารละลายเอมีนที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยการนำไปผ่านกระบวนการกลั่นจะได้สารละลายเอมีนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [5]



รูปที่ 2.1 กระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึมด้วยสารละลายเอมีน [5]

(ข) กระบวนการดูดซึมทางกายภาพโดยตัวทำละลาย

สำหรับกระบวนการดูดซึมทางกายภาพ อาศัยหลักการดูดซึมตามกฎของเฮนรี คือ อุณหภูมิและความดันมีผลต่อการดูดซึม โดยเฉพาะที่ความดันสูงและอุณหภูมิต่ำจะมีการดูดซึมได้

ดี ส่วนการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่นั้นทำได้โดยเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน ข้อดีของกระบวนการนี้คือการใช้พลังงานต่ำแต่ต้องกระทำที่ความดันสูงโดยตัวทำละลายที่นิยมใช้คือ ไดเมทิลอีเทอร์ ของ โพลีเอทธิลีน ไกลคอล (Selexol) [5]

2.1.2 กระบวนการกลั่นด้วยอุณหภูมิต่ำ (cryogenic separation)

การกลั่นด้วยอุณหภูมิต่ำเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำโดยทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์เย็นตัวและกลายเป็นของเหลวที่บริสุทธิ์แยกออกมา ข้อดีของกระบวนการนี้คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการนี้เป็นของเหลวสามารถส่งผ่านทางท่อได้สะดวก ข้อเสียของกระบวนการนี้คือต้องใช้พลังงานสูงในการทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์เย็นตัว [5]

2.1.3 กระบวนการดูดซับทางกายภาพโดยใช้ของแข็ง

กระบวนการดูดซับประกอบด้วยสองขั้นตอนคือการดูดซับและการคายซับ โดยกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นจากการที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับที่เป็นวัสดุที่มีรูพรุน เช่น molecular sieves หรือ activated carbon เป็นต้น จากนั้นแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับโดยการลดอุณหภูมิ เพื่อให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ควบแน่นออกมา ซึ่งการควบคุมการดูดซับและการคายซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นสามารถทำได้โดยการควบคุมความดันและอุณหภูมิ [5]

2.1.4 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนนั้นเป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อเลือกผ่านที่ยอมให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถผ่านได้เท่านั้น ซึ่งเยื่อเลือกผ่านที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม คือ เมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุพอลิเมอร์ เช่น เมมเบรนที่สังเคราะห์จากเซลลูโลสอะซิเตต โพลีอีทิลีนและโพลีเอไมด์ เป็นต้น

ข้อดีของกระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเมมเบรนเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการดูดซับคือ

1. ไม่จำเป็นต้องมีสารที่ช่วยในการแยก
2. ระบบมีขนาดกะทัดรัด
3. อุปกรณ์ของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่ ซึ่งทำให้ความถี่ในการบำรุงรักษาต่ำ

แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้คือไม่สามารถใช้แยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากปล่องควันที่มีอุณหภูมิสูง ความดันต่ำ และอัตราการไหลสูงได้ [5]

2.2 ปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น-แคลซิเนชัน

กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น-แคลซิเนชัน เป็นกระบวนการที่ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยา ทำได้โดยให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับโลหะออกไซด์ (MO) ได้เป็นโลหะคาร์บอเนต (MCO_3) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนเรียกว่า ปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น โดยสามารถเขียนสมการได้ดังนี้



ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถทำให้เกิดการผันกลับได้โดยการให้ความร้อนกับโลหะคาร์บอเนต ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเรียกว่าปฏิกิริยาแคลซิเนชัน ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้



โดยช่วงอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น-แคลซิเนชัน อยู่ในช่วง 200-800 °C

การประยุกต์ใช้งานจากปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น-แคลซิเนชันของแคลเซียมออกไซด์

1. เป็นปฏิกิริยาที่ใช้แยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาสันดาป (combustion) เพื่อลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยสู่บรรยากาศและสามารถนำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้ไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นต่อไป
2. สามารถแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากปฏิกิริยาที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น เช่น stream gasification of biomass เป็นต้น [1]

2.3 การสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์

ในงานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น-แคลซิเนชั่น ซึ่งจัดเป็นกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ของแข็ง โดยปฏิกิริยานี้สามารถเลือกใช้ตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้หลากหลาย เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) คาร์บอนกัมมันต์ (activated carbon) และแคลเซียมออกไซด์ เป็นต้น ส่วนมากตัวดักจับที่นิยมใช้ดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์คือ แคลเซียมออกไซด์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง [1]

แคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นสามารถสังเคราะห์ได้จากหลายวิธี เช่น

1. จากการเผาโลหะคาร์บอเนตที่เป็นวัสดุธรรมชาติ เช่น Linwood calcium-carbonate (LC) dolomite (DL) Linwood calcium hydroxide (LH) เป็นต้น
2. จากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ด้วยวิธี ตกตะกอน (PCC)

แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาโลหะคาร์บอเนตที่เป็นวัสดุธรรมชาติจะมีความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำเพราะมีโครงสร้างแบบไมโครพอร์ส คือ มีขนาดรูพรุนน้อยกว่า 2 นาโนเมตร แต่แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้จากวิธีตกตะกอนจะมีประสิทธิภาพในการดักจับสูงเพราะมีโครงสร้างแบบมีโซพอร์ส คือ มีขนาดรูพรุน 5-20 นาโนเมตร

ตารางที่ 2.1 ค่าพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากวัสดุแบบต่างๆ

[1] (เผาที่อุณหภูมิ 800 °C -950 °C เวลา 1 ชม. โดยใช้ในโตรเจนเป็นแก๊สพา)

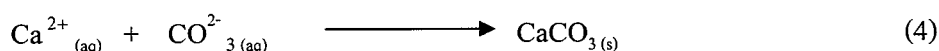
ชื่อตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน(cm ³ /g)
LC	1.1	0.003
LC-CaO	17.8	0.078
DL	1.8	0.004
DL-CaO	29.8	0.080
LH	13.2	0.0453
LH-CaO	33.3	0.1
PCC	38.2	0.11
PCC-CaO	12.8	0.027

การสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีตกตะกอน (precipitation calcium carbonate)

การสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีตกตะกอนเริ่มด้วยการผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์เมื่อละลายน้ำจะมีการแตกตัวดังสมการที่ (1)



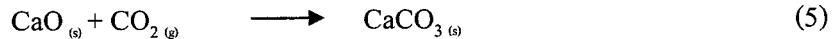
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อละลายน้ำจะได้คาร์บอเนตไอออนซึ่งจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออนในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตดังสมการที่ (2)



แคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนจะมีประจุบวก ทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตนั้นไม่จับตัวกันเป็นก้อน การเปลี่ยนประจุบวกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนให้เป็นกลางนั้นทำได้โดยการเติมสารลดแรงตึงผิว โดยปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้าง (ปริมาตรรูพรุน พื้นที่ผิว และขนาดรูพรุน) ของแคลเซียมคาร์บอเนต คือ ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สารลดแรงตึงผิว อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิ

2.4 ปฏิกิริยาวิวิธพันธ์แบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา [4]

ปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีวัฏภาคต่างกันแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น



ในปฏิกิริยาดังกล่าวผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของแข็ง ดังนั้นอนุภาคที่เป็นสารตั้งต้นนั้นจะถูกแทนที่ด้วยของแข็งที่เป็นผลิตภัณฑ์บนพื้นที่ผิวของสารตั้งต้น ปริมาณของพื้นที่ผิวนั้นเป็นตัวกำหนดขอบเขตของการเกิดปฏิกิริยาและอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดโดยเปลี่ยนแปลงตามเวลา การคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาวิวิธพันธ์แบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาครอบคลุมถึง transport process และ intrinsic kinetics ซึ่งสมบัติของสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งนั้นเปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาในการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาระหว่างของไหลและของแข็ง นั้นคล้ายกับปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีการประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เตาเผาปูน

กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของไหลและของแข็งสามารถอธิบายได้ด้วยพฤติกรรมของอนุภาคเดี่ยว โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

1. เกิดการถ่ายโอนมวลจากส่วนที่เป็นของไหลสู่พื้นผิวของอนุภาค
2. เกิดการแพร่ผ่านของของไหลภายในอนุภาค
3. เกิดการดูดซับของของไหลบริเวณผิวของของแข็งที่เป็นสารตั้งต้น
4. เกิดปฏิกิริยาที่แท้จริง

2.4.1 รูปแบบการเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธ์แบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

Shrinking core

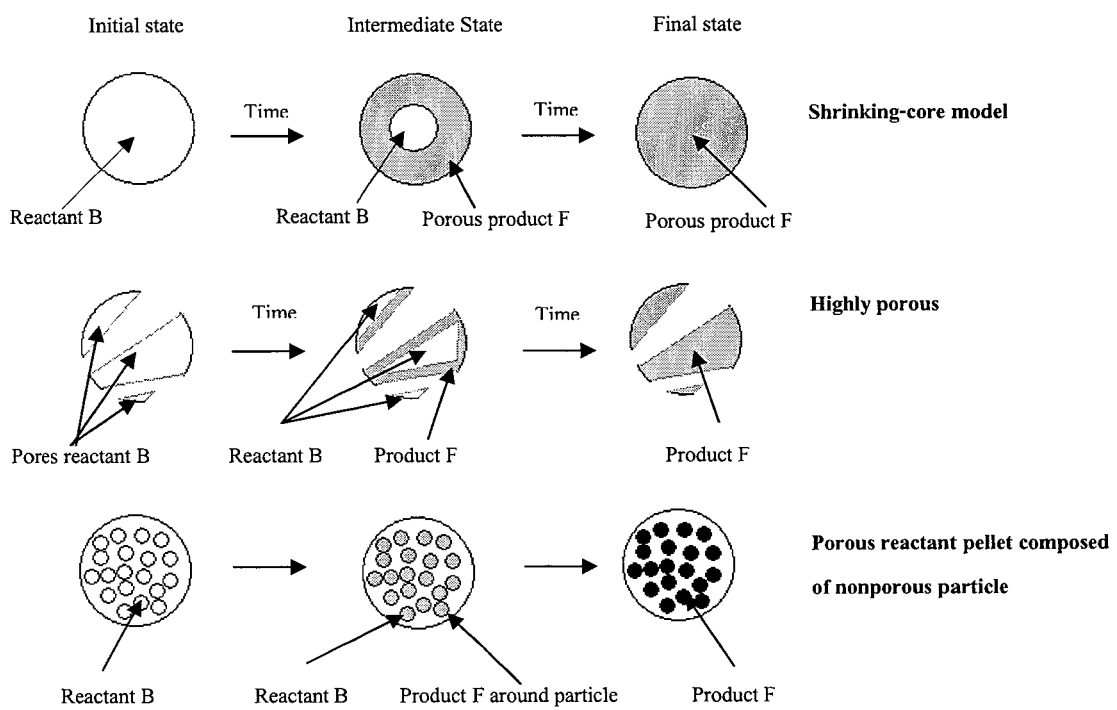
ถ้าสารตั้งต้น B ไม่มีรูพรุน ปฏิกิริยาจะเกิดที่ผิวด้านนอกซึ่งการลดลงของพื้นที่ผิวจะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของการเกิดปฏิกิริยารวมถึงเวลา ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้น ชั้นของผลิตภัณฑ์ F ก่อตัวอยู่รอบๆแกนของสารตั้งต้นที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ อนุภาคที่มีรูพรุนอาจประพฤติตัวเช่นเดียวกันกับรูปแบบข้างต้นเมื่อความต้านทานในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่าความต้านทานในการแพร่ผ่านผิวเข้าสู่รูของสารตั้งต้นที่ของอนุภาคเป็นของแข็ง กฎเกณฑ์สำคัญที่เกิดในรูปแบบนี้คือปฏิกิริยามักจะเกิดในขอบเขตของพื้นที่ผิว ซึ่งเป็นจุดเชื่อมระหว่างส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาและพื้นที่ผิวรอบๆผลิตภัณฑ์

Highly porous reactant (ไม่มีความต้านทานการแพร่)

สมมติว่าสารที่เป็นของแข็งมีรูพรุนมากซึ่งของไหลสามารถเข้าไปได้ทั่วถึงในของแข็งโดยปราศจากความต้านทานการแพร่แสดงในรูป 2.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ออนุภาคจะแปรผันกับพื้นที่ผิวของสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งที่เปลี่ยนแปลงด้วย เวลาและชั้นของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งซึ่งสะสมอยู่ คุณสมบัติสำคัญคือความเข้มข้นของแก๊สที่ไม่ต่างกัน ในอนุภาค

Porous reactant (มีความต้านทานการแพร่ผ่านรูปานกลาง)

ตัวอย่างของกรณีนี้ควรจะเป็นสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งในรูปแบบการอัดอนุภาคที่ไม่มีรูพรุนให้อยู่ในเม็ดแสดงในรูป 2.2 รูพรุนที่อยู่รอบอนุภาคถูกสมมติว่าเล็กพอที่ความเข้มข้นของไหลสามารถลดลงไปเมื่อถึงใจกลางของเม็ด



รูปที่ 2.2 รูปแบบการเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธ์แบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา[4]

2.5 การใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ [6]

2.5.1 ใช้เป็นตัวทำความเย็น (Cooling)

1) ใช้ในการแช่แข็งอาหาร

ในต่างประเทศนิยมใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวในการการถนอมอาหารสดเพราะคาร์บอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติในการหยุดยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและไม่ทำให้รูปทรงและรสชาติของอาหารสดเสียไป

2) ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก ใช้ในการทำให้แม่พิมพ์ที่ใช้กับเครื่องเป่าพลาสติกเย็นลงเพื่อเพิ่มปริมาณในการผลิตพลาสติก

3) ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ในการผลิตยางต้องใช้อย่างเหลวเหลวแม่พิมพ์และจะมียางล้นออกมาซึ่งใช้คาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ยางแข็งตัวทำให้สามารถตัดทิ้งได้ง่ายซึ่งประหยัดกว่าวิธีอื่น

4) ใช้ช่วยในการ fitting ในอุตสาหกรรมเหล็ก การผลิตอุปกรณ์และเครื่องมือประเภทโลหะนั้นบางชนิดต้องนำมาประกอบกัน โดยอุปกรณ์สองชิ้นมีขนาดใกล้เคียงกันมาสวมให้พอดียากที่จะทำที่อุณหภูมิปกติจึงต้องนำชิ้นส่วนทำให้เย็นโดยเร็วแล้วจึงนำไปสวมกันก่อนที่อุณหภูมิจะกลับสู่สภาวะปกติ

2.5.2 ใช้เป็นสารเคมี

1) ใช้ในการทำน้ำอัดลมและเครื่องดื่ม ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำอัดลมโดยเป็นอุตสาหกรรมที่มีความต้องการแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดส่วนในกระบวนการหมักเบียร์นั้นมีความจำเป็นต้องใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างการหมักแม้ว่าจะมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหลือแต่ยังต้องมีการสั่งซื้อเพื่อให้เพียงพอต่อการผลิต

2) ใช้ในเรือนเพาะชำ ในด้านการเกษตรกรรมนิยมใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเรือนเพาะชำเพราะช่วยให้ต้นไม้เจริญเติบโตเร็วและบางแห่งยังใช้ฉีดในดินเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดิน

2.5.3 ใช้เป็นตัวทำให้เกิดความดัน

1) ใช้ในกระป๋องสเปรย์ในกระป๋องสเปรย์จำเป็นต้องผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อขับสารที่มีอยู่ในกระป๋อง

2) ใช้เพิ่มปริมาณการผลิตน้ำมันและก๊าซ ในประเทศที่มีการผลิตน้ำมันดิบจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการเพิ่มปริมาณการผลิตน้ำมันดิบครั้งที่ 2 และ 3 จากแหล่งกักเก็บเพราะการนำน้ำมันดิบออกจากแหล่งกักเก็บครั้งแรกยังมีน้ำมันดิบอยู่ในหลุมอีกพอสมควรสามารถใช้คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มความดันทำให้สามารถผลิตน้ำมันดิบได้มากขึ้น

2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Himanshu Gupta และคณะ [1] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากวิธีที่แตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน พบว่าแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์จากวิธีตกตะกอนจะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่สูงถึง $38.3 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $0.11 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับและมีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าร้อยละ 90 โดยปริมาตร จากนั้นสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตจากวิธีตกตะกอน โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.28 2.56 และ 3.84 โดยน้ำหนักและใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 99.999 โดยปริมาตร ไหลผ่านสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์พบว่าที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2.56 โดยน้ำหนัก มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงที่สุด จากนั้นทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งสังเคราะห์จากวิธีตกตะกอน การทดลองใช้แคลเซียมออกไซด์ 6-12 มิลลิกรัม ใส่ในภาชนะควอตซ์เป็นชั้นบางๆ ให้ความร้อนและให้แก๊สไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.999 โดยปริมาตร ไหลผ่านจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ($550 \text{ }^\circ\text{C}$ $600 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $650 \text{ }^\circ\text{C}$) จากนั้นผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และบันทึกน้ำหนักที่เวลาต่างๆ ตลอดจนการทดลองโดยใช้ Thermogravimetric analyzer (TGA) ซึ่งสามารถคำนวณค่าการแปลงผันทางเคมี (conversion) ของแคลเซียมออกไซด์จากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น พบว่าที่อุณหภูมิ $650 \text{ }^\circ\text{C}$ มีค่าการแปลงผันทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์สูงสุดถึงร้อยละ 90 โดยน้ำหนักและสรุปได้ว่าแคลเซียมออกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น ได้ในช่วงอุณหภูมิ 550°C ถึง 700°C

Nicholas H. Florin และคณะ [2] ได้พัฒนาตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการสังเคราะห์ไฮโดรเจนในเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล โดยการใช้แคลเซียมออกไซด์ กระบวนการดังกล่าวถูกจำกัดด้วยค่าการแปรผันทางเคมีที่ต่ำของแคลเซียมออกไซด์และการเสื่อมสภาพของแคลเซียมออกไซด์เมื่อผ่านวัฏจักรการทำปฏิกิริยาแล้ว โดยทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้สังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนต อุณหภูมิ ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในสังเคราะห์ โดยปัจจัยข้างต้นมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของแคลเซียมคาร์บอเนตดังนั้นจึงส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพของแคลเซียมออกไซด์ โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับสารลดแรงตึงผิวมีผลต่อขนาดของอนุภาคและอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์มีผลต่อพื้นที่ผิวของอนุภาค โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์คือ $30 \text{ }^\circ\text{C}$ [2]

Ranjani V. Siriwardane และคณะ [3] ได้พัฒนาตัวดูดซับ โดยศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยปริมาตร ด้วยแคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ที่ผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ $315 \text{ }^\circ\text{C}$

ความดัน 1 บรรยากาศ พบว่าแคลเซียมออกไซด์ที่ผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการดูดซับ (breakthrough time) ประมาณ 80 นาทีและสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 99 ของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าแคลเซียมออกไซด์ จากนั้นทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 28 โดยปริมาตร ด้วยแคลเซียมออกไซด์ที่ผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 2:1 และ 4:1 โดยน้ำหนัก พบว่าแคลเซียมออกไซด์ที่ผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 4:1 โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่าแคลเซียมออกไซด์ที่ผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 2:1 โดยมีความสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 99 ของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น

Bartev B. Sakadjian และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาแคลซิเนชันของ Linwood-calcium carbonate (LC) ที่มีพื้นที่ผิวต่างกันคือ 8 16 34 และ 38 m^2/g และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากวิธีตกตะกอน (PCC- CaCO_3) ที่มีพื้นที่ผิว 20 m^2/g ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 700 $^{\circ}\text{C}$ โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ในการทดลองวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) จากการทดลองพบว่า residence time ของ LC มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวสูงขึ้นแต่ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาแคลซิเนชันทำให้ตัวดูดซับเกิดการ sintering และยิ่งเมื่อตัวดูดซับเกิดการ sintering ยิ่งทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีค่าต่ำลง ดังนั้นทำให้แคลเซียมออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวสำหรับการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชันลดลงและเมื่อเปรียบเทียบกับ PCC- CaCO_3 พบว่ามีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (Reactivity) มากกว่า LC ทั้ง 4 ตัวอย่าง เนื่องจาก PCC- CaCO_3 มีโครงสร้างแบบมีโซพอร์ส ซึ่งเกิดการ sintering ขณะที่เกิดปฏิกิริยาแคลซิเนชันได้น้อยกว่า นอกจากนี้ในการทดลองยังพบว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราการไหลของแก๊สพา ที่อัตราการไหลของแก๊สพาเดียวกัน พื้นที่ผิวจะมีมากที่อุณหภูมิต่ำกว่าแต่ถ้าที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่ออัตราการไหลของแก๊สพามากขึ้นก็จะทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยข้างต้น จึงได้ศึกษาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน) ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้าและแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนโดยทดสอบการดักจับแก๊สที่อุณหภูมิ 500 $^{\circ}\text{C}$ 600 $^{\circ}\text{C}$ และ 700 $^{\circ}\text{C}$ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราการไหลของแก๊ส (แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สพา) ที่ค่าคงที่เดียวกัน เพื่อให้การเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้จากการทดลองมีความถูกต้องมากขึ้น

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 การสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์

3.1.1 สารเคมี

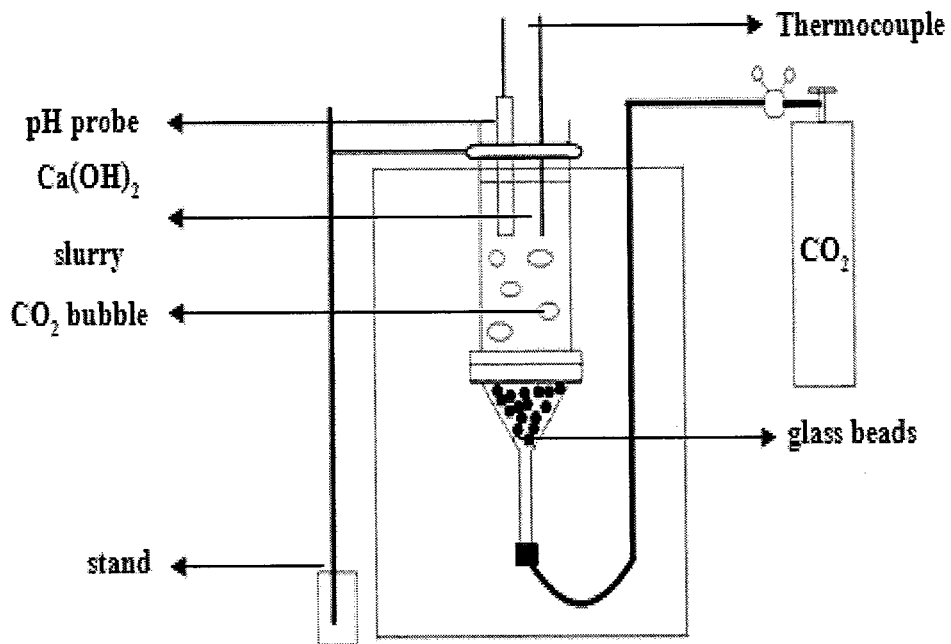
1. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ของบริษัท ศึกษาภัณฑ์พาณิชย์
2. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 99.5%vol ของบริษัท แพรกซ์ แอร์(ประเทศไทย) จำกัด
3. น้ำกลั่น

3.1.2 อุปกรณ์

1. กรวยกรอง (Filter funnel)
2. เทอร์โมคัพเปิล
3. เครื่องวัด pH
4. แผ่นกรอง (Porous frit)
5. เม็ดแก้ว (Glass beads)
6. อ่างควบคุมอุณหภูมิ
7. ตัวหนีบ (Clamp)
8. ขาตั้ง (Stand)

3.1.3 วิธีการทดลอง

1. จัดเตรียมอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.1
2. สังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีตกตะกอน
3. นำแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้กรองแบบลดความดัน จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง
4. นำแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้เผาเพื่อเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมออกไซด์



รูปที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีตกตะกอน

3.2 ทดสอบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารดักจับ 3 ชนิด

- แคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า ของบริษัทศึกษาภัณฑ์พาณิชย์
- แคลเซียมออกไซด์ที่เผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากวิธีตกตะกอน(PCC-30°C)
- แคลเซียมออกไซด์ที่เผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากวิธีตกตะกอน(PCC-50°C)

3.2.1 สารเคมี

1. สารดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แคลเซียมออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด)
2. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 99.5%vol ของบริษัท แพรกซ์ แอร์(ประเทศไทย) จำกัด
3. แก๊สฮีเลียม 99.5%vol ของบริษัท แพรกซ์ แอร์(ประเทศไทย) จำกัด

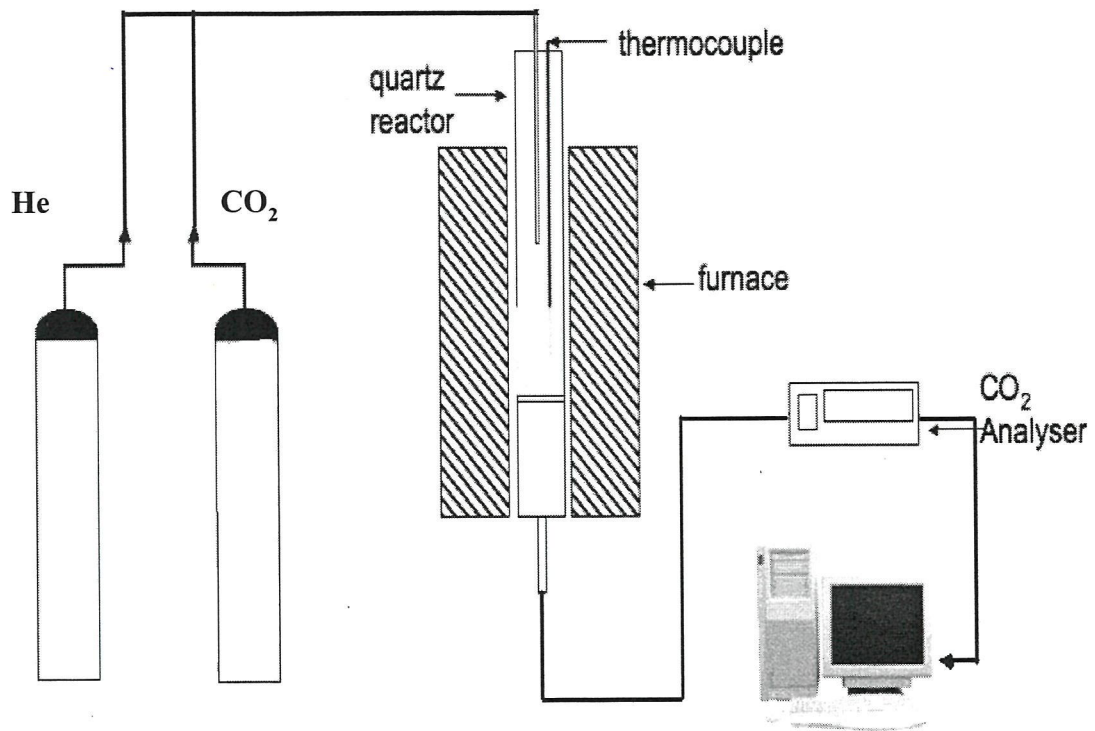
3.2.2 อุปกรณ์

1. ตู้อบสารเคมี
2. อุปกรณ์ทดสอบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 3.2

3.2.3 วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการอบไล่ไอน้ำเวลา 12 ชั่วโมง
2. บรรจุสารดักจับลงในเครื่องปฏิกรณ์ประมาณ 0.5 กรัมและเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่แคลเซียมคาร์บอเนตที่อาจเจือปนอยู่โดยมีการป้อนแก๊สฮีเลียมเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อพาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่นอกเหนือจากการดักจับออกจากเครื่องปฏิกรณ์และเข้าสู่เครื่อง GC-TCD
3. ปรับอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการทดสอบการดักจับ
4. ป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตรเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์
5. ตรวจวิเคราะห์ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่นอกเหนือจากการดักจับด้วยเครื่อง GC-TCD

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



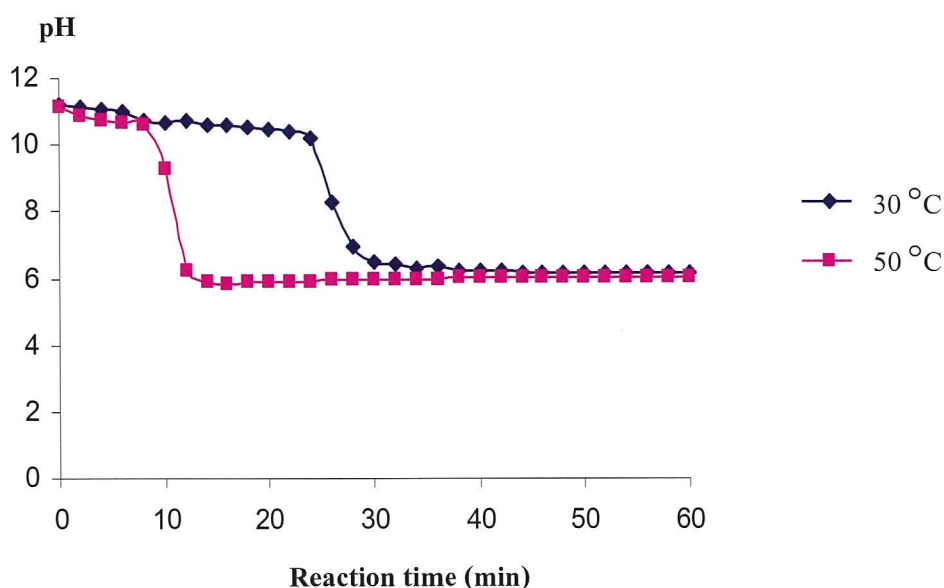
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

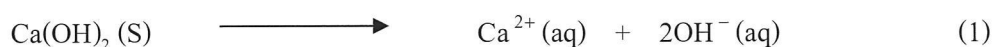
4.1 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอน (PCC)

การสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีตกตะกอน ทำการสังเคราะห์ที่สภาวะอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 300 ml/min ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2.56 โดยมวล ที่อุณหภูมิ 30 °C และ 50 °C ตามลำดับ โดยจากผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชของสารละลายมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังรูปที่ 4.1

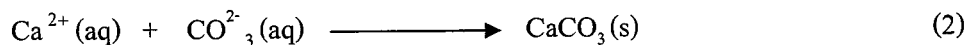


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช (pH) และเวลาที่ทำปฏิกิริยา (reaction time)

จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อเริ่มต้นสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีพีเอชเท่ากับ 11 เนื่องจากมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์แขวนลอยและแตกตัวเป็น ไอออนอยู่ในสารละลายดังสมการที่ (1)



เมื่อผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะละลายน้ำแตกตัวได้คาร์บอเนตไอออนซึ่งจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออนเกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตดังสมการที่ (2)



จะเห็นว่าช่วงแรกค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพีเอชตอนเริ่มต้น เนื่องจากยังมีแคลเซียมไอออนทำปฏิกิริยากับคาร์บอเนตไอออน จนกระทั่งปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายหมดลง พร้อมกับเกิดการสะสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายมากขึ้น จึงทำให้สารละลายมีสภาพเป็นกรดมากขึ้น โดยจะเห็นได้จากกราฟว่าค่าพีเอชเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วและค่อยๆคงที่ที่ค่าหนึ่ง แสดงว่าการดำเนินปฏิกิริยาได้สิ้นสุดแล้วและจากกราฟพบว่าการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีตกตะกอนที่อุณหภูมิ 50 °C ปฏิกิริยาเกิดการสิ้นสุดโดยใช้เวลาน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 30 °C เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีตกตะกอน

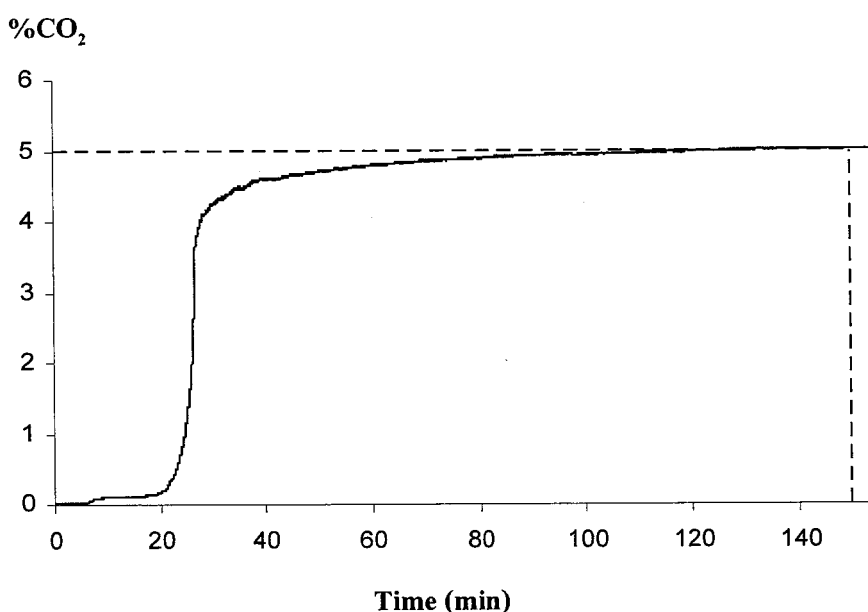
อุณหภูมิ(°C)	น้ำหนัก CaCO ₃ (g)	น้ำหนัก CaCO ₃ ทาง ทฤษฎี (g)	ร้อยละผลได้
30	9.6567	10.3767	93.06
50	9.7271	10.3817	93.69

แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการสังเคราะห์ให้ร้อยละผลได้ดังตารางที่ 4.1 เนื่องจากมีแคลเซียมคาร์บอเนตบางส่วนที่ติดอยู่บนกระดาษกรองขณะทำการกรองแบบลดความดัน จึงทำให้น้ำหนักของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการทดลองน้อยกว่าน้ำหนักของแคลเซียมคาร์บอเนตในทางทฤษฎี

4.2 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับจากการทำปฏิกิริยา

การทดลองนี้ศึกษาอิทธิพลของชนิดตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิ ที่มีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 500 °C 600 °C และ 700 °C ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ ภายใต้ความดันบรรยากาศ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 5 โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 50 ml/min และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง 0.5 กรัม

4.2.1 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า

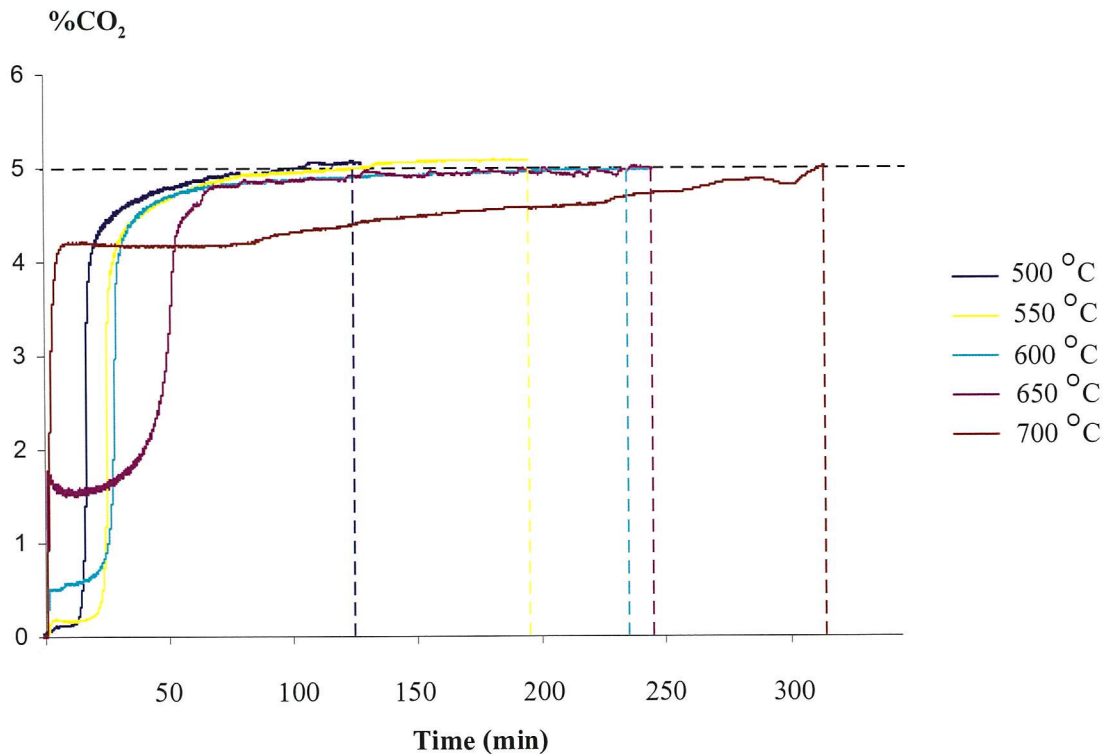


รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของเครื่องปฏิกรณ์เปรียบเทียบกับเวลาในการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้าที่อุณหภูมิ 500 °C

จากรูปที่ 4.2 การทดลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า ที่อุณหภูมิ 500 °C พบว่าในช่วง 20 นาทีแรกความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าประมาณร้อยละ 0.1 โดยโมล ซึ่งการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงนี้เกิดขึ้นได้มากเมื่อเทียบกับช่วงอื่นๆ เนื่องจากพื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์ยังมีอยู่มากในช่วงเริ่มต้น หลังจากนั้นความเข้มข้นของแก๊ส

คาร์บอนไดออกไซด์ที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าความเข้มข้นที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 4 โดยโมล ในช่วง 20-30 นาที เนื่องจากพื้นที่ผิวด้านนอกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์เหลือน้อยลง เมื่อหลัง 30 นาทีผ่านไป ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์จะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนมีค่าร้อยละ 5 โดยโมล โดยมีช่วงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาตั้งแต่ 30-150 นาที ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาในช่วงนี้อาจเกิดเนื่องจากการแพร่ผ่านชั้นแคลเซียมคาร์บอเนตของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ด้านใน จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาในช่วงนี้ใช้เวลานานกว่าช่วงอื่นๆ

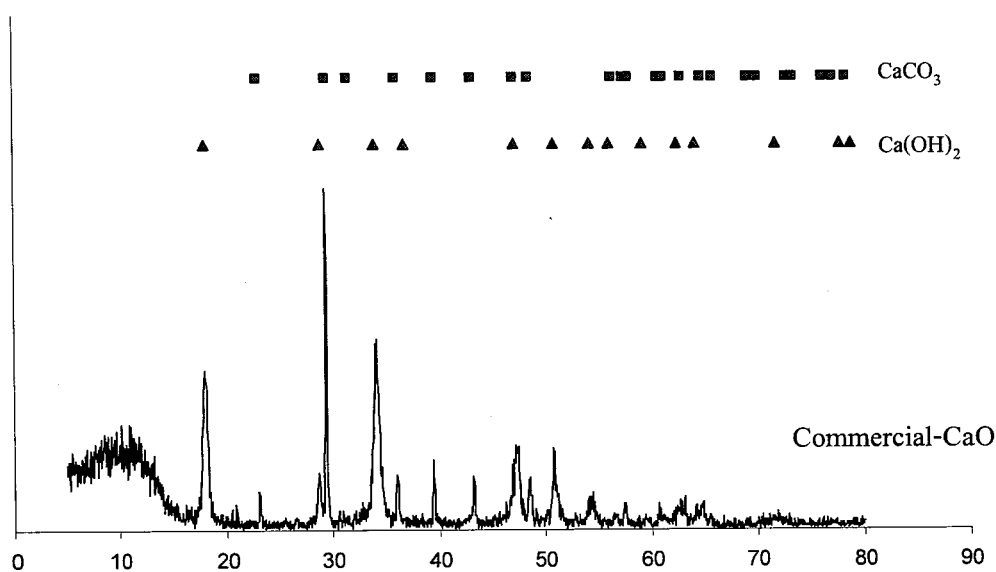
ข้อมูลที่ได้จากกราฟข้างต้นสามารถคำนวณหาปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้ทั้งหมดในช่วงเวลา 150 นาที โดยหาจากปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ซึ่งมีค่า 0.0162270 โมล ลบด้วยปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่สามารถดักจับได้ (พื้นที่ใต้กราฟ) ซึ่งมีค่า 0.0027449 โมล ดังนั้นปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับได้ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้ำมีค่าเท่ากับ 0.0134821 โมล ต่อปริมาณแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้ำ 0.5 กรัม หรือคิดเป็น 5.474 โมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปริมาณแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้ำ 1 กิโลกรัม ซึ่งจะนำไปเปรียบเทียบกับต่อดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.3 เปรอ์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของเครื่อง
ปฏิกรณ์เปรียบเทียบกับเวลาในการทำปฏิกิริยา (แคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า)

จากรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 20 นาทีแรก พบว่า ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีค่าประมาณร้อยละ 0.1 0.2 0.5 1.7 และ 4.1 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 500 °C 550 °C 600 °C 650 °C และ 700 °C ตามลำดับ แสดงถึงประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น จึงทำให้พื้นที่ผิวด้านนอกของแคลเซียมออกไซด์เหลือน้อยลงอย่างรวดเร็วอาจเนื่องจากการอุดตันของรูพรุนแต่ปฏิกิริยายังดำเนินต่อไปได้ด้วยการแพร่ผ่านชั้นแคลเซียมคาร์บอเนตของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ด้านใน เมื่อทำการคำนวณปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สามารถดักจับได้ทั้งหมดมีค่า 5.40 6.71 6.52 7.79 และ 7.74 โมลต่อปริมาณแคลเซียมออกไซด์ 1 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 500 °C 550 °C 600 °C 650 °C และ 700 °C ตามลำดับ โดยจะนำผลการคำนวณที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อในรูปที่ 4.9

4.2.1.1 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า



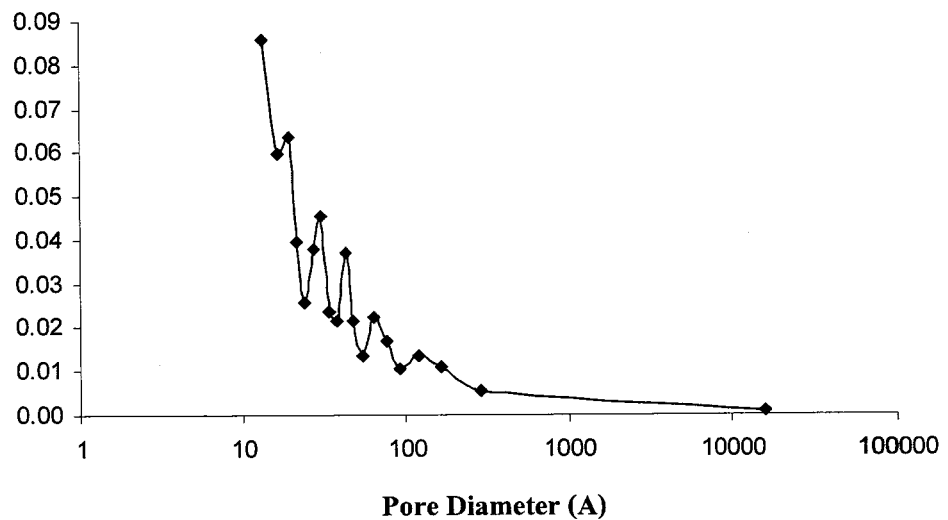
รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นพีคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เจือปนมากับแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า ดังนั้นควรเผาแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้าก่อนทำการทดสอบดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อลดปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เจือปนอยู่ให้น้อยลง ส่วนพีคแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่พบอาจเกิดจากแคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับความชื้นในบรรยากาศและสาเหตุที่ไม่พบพีคของแคลเซียมออกไซด์ อาจเนื่องมาจากแคลเซียมออกไซด์นั้นอยู่ในรูปอสัณฐาน

4.2.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้าด้วยวิธีบีอีที่พบว่าแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้ามีพื้นที่ผิวมากที่สุด คือ $35.14 \text{ m}^2/\text{g}$ และมีปริมาตรรูพรุนน้อยที่สุด คือ $0.0336 \text{ cm}^3/\text{g}$ เมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผา Linwood calcium carbonate (LC) dolomite (DL) และ Linwood calcium hydroxide (LH) ที่อุณหภูมิ $800 \text{ }^\circ\text{C}$ - $950 \text{ }^\circ\text{C}$ เวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้ไนโตรเจนเป็นแก๊สพา ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้ในตารางที่ 2.1 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนโดยเฉลี่ย (average pore diameter) เท่ากับ 3.829 นาโนเมตร ซึ่งจัดได้ว่าแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้ามีโครงสร้างเป็นแบบไมโครพอร์ส

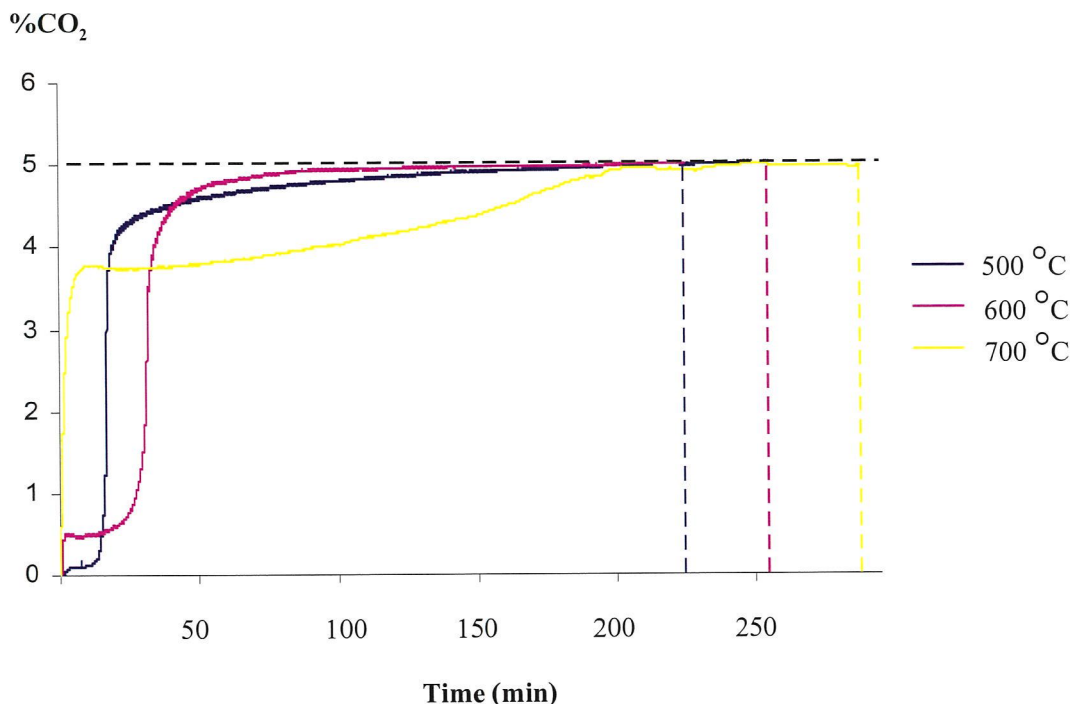
Desorption DV (log d) [cc/g]



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนและ Desorption DV (log d)

จากการวิเคราะห์การกระจายขนาดรูพรุนของแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า พบว่ามีค่าการกระจายขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 1.353 nm ถึง 1611.806 nm และปริมาณรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนขนาด 1.353 nm มีปริมาณมากที่สุด

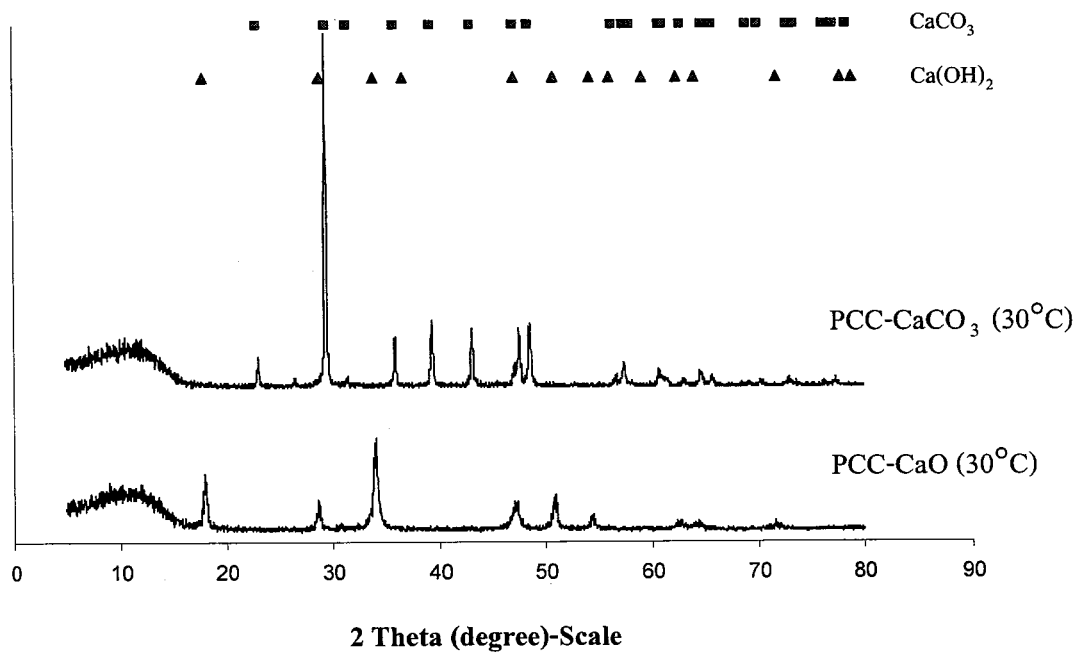
4.2.2 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับด้วย PCC-CaO (30 °C)



รูปที่ 4.6 เปรี่เซนต์ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของเครื่องปฏิกรณ์เปรียบเทียบกับเวลาในการทำปฏิกิริยา (PCC-CaO (30 °C))

จากรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 20 นาทีแรก พบว่า ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีค่าประมาณร้อยละ 0.1 0.5 และ 3.7 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 500 °C 600 °C และ 700 °C ตามลำดับ แสดงถึงประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น จึงทำให้พื้นที่ผิวด้านนอกของแคลเซียมออกไซด์เหลือน้อยลงอย่างรวดเร็วอาจเนื่องจากการอุดตันของรูพรุนแต่ปฏิกิริยายังดำเนินต่อไปได้ด้วยการแพร่ผ่านชั้นแคลเซียมคาร์บอเนตของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ด้านใน เมื่อทำการคำนวณปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สามารถดักจับได้ทั้งหมดมีค่า 5.77 7.09 และ 7.45 โมลต่อปริมาณแคลเซียมออกไซด์ 1 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 500 °C 600 °C และ 700 °C ตามลำดับ โดยจะนำผลการคำนวณที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อในรูปที่ 4.9

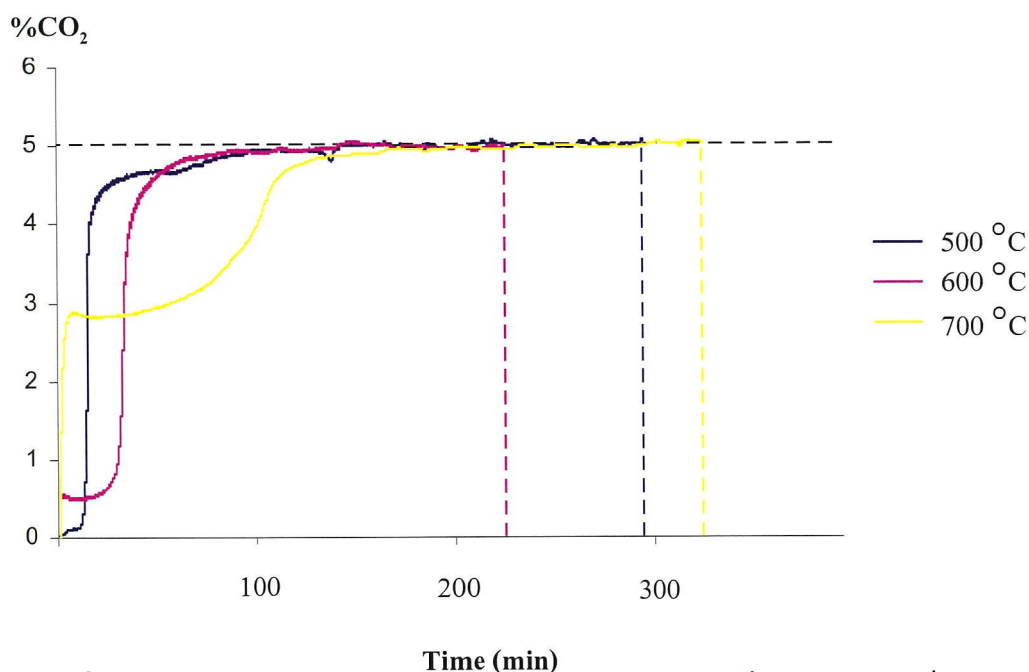
4.2.2.1 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PCC-CaCO₃ (30°C)



รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PCC-CaCO₃ (30 °C) และ PCC-CaO (30 °C)

จากรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ XRD ของ PCC-CaCO₃ (30 °C) นั้นจะพบพีคที่เป็นโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนมีความบริสุทธิ์สูงและเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ XRD ของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 700 °C ข้างต้น จะพบเพียงพีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งอาจเกิดจากแคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับความชื้นในบรรยากาศแต่ไม่พบพีคของแคลเซียมออกไซด์อาจเนื่องมาจากแคลเซียมออกไซด์นั้นอยู่ในรูปอสัณฐาน

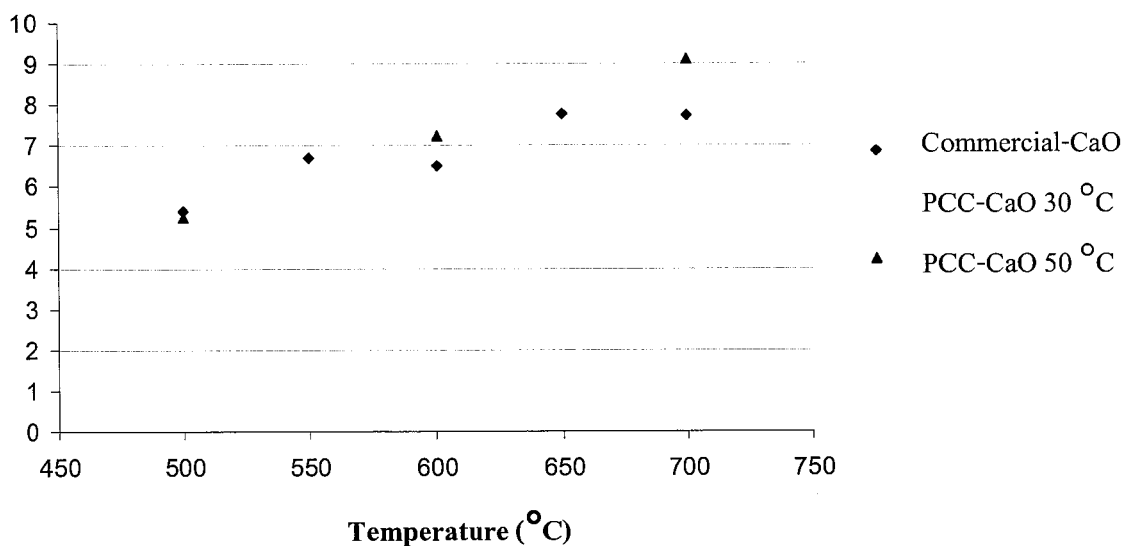
4.2.3 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับด้วย PCC-CaO (50 °C)



รูปที่ 4.8 เปรอ์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ที่ทางออกของเครื่อง ปฏิกรณ์เปรียบเทียบกับเวลาในการทำปฏิกิริยา (PCC-CaO (50°C))

จากรูปที่ 4.8 เมื่อพิจารณาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 20 นาทีแรก พบว่า ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิ สูงขึ้น โดยมีค่าประมาณร้อยละ 0.1 0.5 และ 2.8 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 500 °C 600 °C และ 700 °C ตามลำดับ แสดงถึงประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น จึงทำให้พื้นที่ผิวด้านนอกของแคลเซียมออกไซด์เหลือน้อยลง อย่างรวดเร็วอาจเนื่องจากการอุดตันของรูพรุนแต่ปฏิกิริยายังดำเนินต่อไปได้ด้วยการแพร่ผ่านชั้น แคลเซียมคาร์บอเนตของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ด้านใน เมื่อทำการคำนวณปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สามารถดักจับได้ทั้งหมดมีค่า 5.24 7.26 และ 9.12 โมลต่อปริมาณแคลเซียมออกไซด์ 1 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 500 °C 600 °C และ 700 °C ตามลำดับ โดยจะนำผลการคำนวณที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อในรูปที่ 4.9

เมื่อเปรียบเทียบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดที่ อุณหภูมิ 700 °C ในช่วง 20 นาทีแรก พบว่าแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาแคลเซียม- คาร์บอเนตที่สังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนที่อุณหภูมิ 50 °C (PCC-CaO (50 °C)) มีประสิทธิภาพใน การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด อาจเนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพของแคลเซียม ออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดที่แตกต่างกัน

mol CO₂/1 kg of CaO

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับ

จากรูปที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้ด้วยแคลเซียมออกไซด์มีแนวโน้มมากขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แพร่เข้าสู่รูพรุนเพื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ได้มากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 500 °C -600 °C มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้ด้วยแคลเซียมออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 700 °C พบว่าแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนที่อุณหภูมิ 50 °C (PCC-CaO (50 °C)) มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าชนิดตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยพบว่า ถ้าตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น และถ้าเปรียบเทียบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิเดียวกันแต่ตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่างชนิดกันพบว่าที่อุณหภูมิ 500 °C -600 °C มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้ด้วยแคลเซียมออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 700 °C พบว่าแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนที่อุณหภูมิ 50 °C (PCC-CaO (50 °C)) มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาอิทธิพลของไอน้ำที่มีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์
2. ควรวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนที่อุณหภูมิ 50 °C (PCC-CaO (50 °C)) เพื่อเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลได้แม่นยำยิ่งขึ้น
3. ควรทำการพัฒนาตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนที่อุณหภูมิ 50 °C (PCC-CaO (50 °C)) ด้วยวิธี Sodium-Based Sorbent ต่อไป

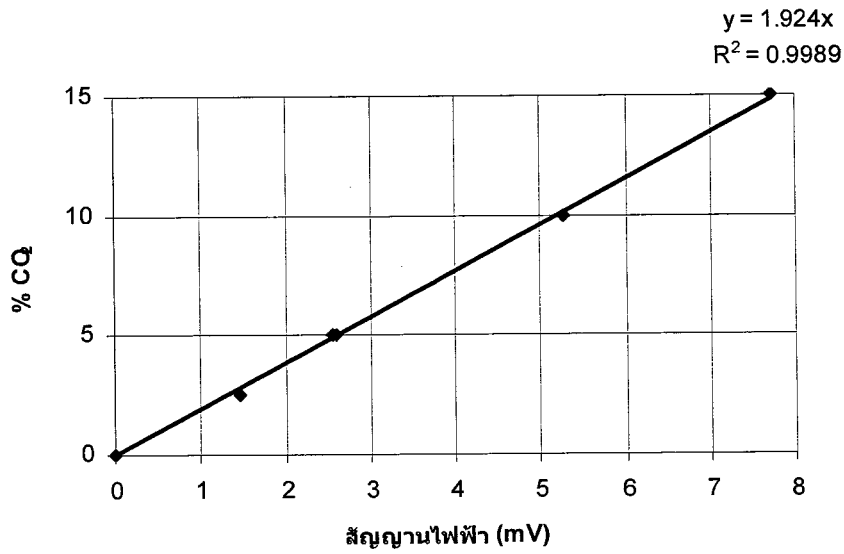
เอกสารอ้างอิง

- [1] Himanshu Gupta and Liang-S. Fan. **Carbonation-Calcination Cycle Using High Reactivity Calcium Oxide for Carbon Dioxide Separation from Flue Gas.** Ind Eng. Chem. Res. 2002, 41, 4035-4042.
- [2] Nicholas H. Florin and Andrew T. Harris. **Preparation and Characterization of a Tailored Carbon Dioxide Sorbent for Enhanced Hydrogen Synthesis in Biomass Gasifiers.** Ind. Eng. Chem. Res. 2008, 47, 2191-2202
- [3] Ranjani V. Siriwardane , Clark Robinson , Ming Shen , and Tom Simonyi. **Novel Regenerable Sodium-Based Sorbents for CO₂ Capture at Warm Gas Temperatures.** Energy & Fuels 2007, 21, 2088-2097
- [4] J.M. Smith , **Chemical Engineering Kinetics** , 3rd edition. McGraw-Hill.
- [5] Sam Wong and Rob Bioletti. **Carbon Dioxide Separation Technologies.** Carbon&Energy Management Alberta Research Council Edmonton, Alberta, T6N 1E4, Canada
- [6] Barteve B. Sakadjian, Mahesh V. Iyer, Himanshu Gupta, and Liang-Shih Fan. **Kinetics and Structural Characterization of Calcium-Based Sorbents Calcined under Subatmospheric Conditions for the High-Temperature CO₂ Captuer Process.** Ind. Eng. Chem. Res., 2007, 46 (1), 35-42
- [7] Liang-Shih Fan, Himanshu Gupta and Mahesh V. Iyer. **Separation of Carbon Dioxide (CO₂) From Gas Mixtures By Calcium Based Reaction Separation (Cars-Co₂) Process.** Ind. Eng. Chem. Res., 2006
- [8] Gemma S. Grasa , J. Carlos Abanades , Monica Alonso and Belen Gonzalez. **Reactivity of highly cycled particles of CaO in a carbonation/calcinations loop.** Chemical Engineering Journal 137 (2008) 561-567.

- [9] Octave Levenspiel. **Chemical Reaction Engineering**, 3rd edition. John Wiley & Sons. 1999.
- [10] Lanny D. Schmidt. **The Engineering of Chemical Reactions**, 2nd edition. Oxford University Press. 2005.
- [11] Stowel, F. P. **Limestone as a raw material in industry**. London : Oxford University Press,1963,p.30-52.

ภาคผนวก ก

กราฟมาตรฐานระหว่างสัญญาณไฟฟ้ากับร้อยละโดยโมลของคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานระหว่างสัญญาณไฟฟ้ากับร้อยละโดยโมลของคาร์บอนไดออกไซด์

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

จากข้อมูลสัญญาณที่วัดได้กับเวลาจากเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟที่มีตัวตรวจวัดแบบ TCD

ตารางที่ ข.1 ยกตัวอย่างข้อมูลเวลาและสัญญาณไฟฟ้าจากการทดลองที่ทดสอบการดักจับ CO₂ ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า ที่อุณหภูมิ 600 °C

เวลา (min)	สัญญาณไฟฟ้า(mV)
299.957	2.5935
299.973	2.5940
299.990	2.5927
300.007	2.5933

1. คำนวณปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด

- ร้อยละโดยโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ คำนวณจากสมการมาตรฐานรูปที่ ก.1
ที่เวลา 300.007 min (สิ้นสุดการดูดซับ)

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละโดยโมลของคาร์บอนไดออกไซด์} &= 1.9240 \times \text{ค่าสัญญาณไฟฟ้า} \\ &= 1.9240 \times 2.5933 \\ &= 4.9895 \% \text{ mol} \end{aligned}$$

- โมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเวลา
โมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเวลา

$$\begin{aligned} & \text{ความดัน} \times \text{ปริมาตรรวม} \\ &= (\text{ร้อยละโดยโมลของ CO}_2) \frac{\text{ค่าคงที่แก๊ส} \times \text{อุณหภูมิ}}{\text{ความดัน} \times \text{ปริมาตรรวม}} \\ &= (4.9895 / 100) \times (1 \text{ atm}) \times (50 \text{ ml/min}) \times \frac{1 \text{ dm}^3}{1000 \text{ ml}} \\ & \quad \frac{1}{(0.0820 \text{ atm dm}^3 / \text{mol K}) \times (273.15 \text{ K})} \\ &= 0.0001113 \text{ mol/min} \end{aligned}$$

หมายเหตุ ในการทดลองนี้เริ่มปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านตัวดักจับ ที่เวลา 5 นาที ดังนั้น เวลาที่ใช้ในการดักจับทั้งหมดเท่ากับ $300.007 - 5 = 295.007$ นาที

- โมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

โมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

$$= \text{โมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเวลา} \times \text{เวลาที่ดักจับ}$$

$$= (0.0001113 \text{ mol/min}) \times (295.007 \text{ min})$$

$$= 0.032843 \text{ mol}$$

2. คำนวณปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่ถูกดักจับ

จากการวิธีการคำนวณข้อมูลในตารางที่ ข.1 ข้างต้น จะได้ข้อมูลในตารางที่ ข.2 ดังนี้

ตารางที่ ข.2 ยกตัวอย่างข้อมูลเวลา สัญญาณไฟฟ้า ร้อยละของ CO_2 และ โมล CO_2 ต่อเวลาจากการทดสอบการดักจับ CO_2 ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า ที่อุณหภูมิ 600°C

เวลา (min)	สัญญาณไฟฟ้า (mV)	ร้อยละของ CO_2 (%mol)	โมล CO_2 ต่อเวลา (mol/min)
299.957	2.5935	4.9899	0.00011139
299.973	2.594	4.9909	0.00011141
299.990	2.5927	4.9884	0.00011136
300.007	2.5933	4.9895	0.00011138

- โมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่ถูกดักจับ

$$= \sum \left(\left(\frac{1}{2} \right) \times (\text{ผลบวกด้านคู่ขนาน}) \times (\text{สูง}) \right)$$

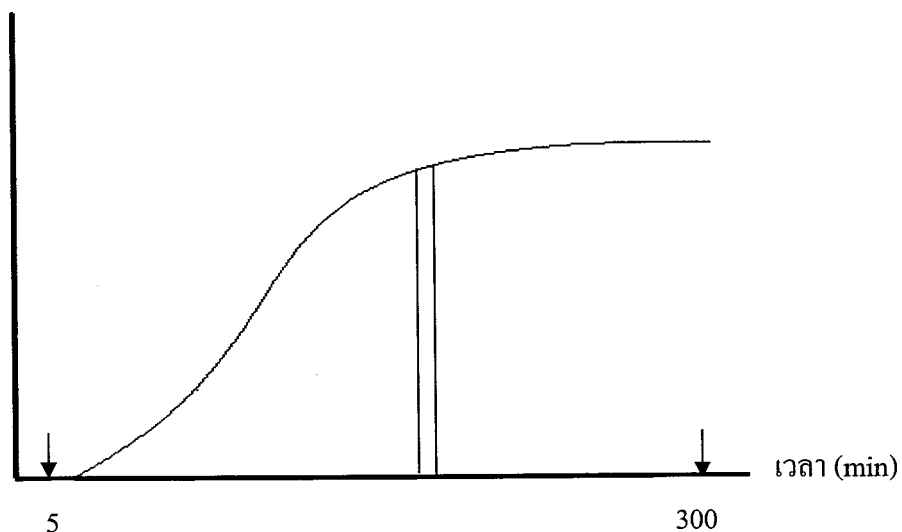
$$= \sum \left(\left(\frac{1}{2} \right) \times (0.00011138 + 0.00011136) \times (300.007 - 299.990) \right)$$

$$+ \left(\frac{1}{2} \right) \times (0.00011136 + 0.00011141) \times (299.990 - 299.973) + \dots$$

$$= 0.029509 \text{ mol}$$

หมายเหตุ ผลลัพธ์ที่ได้คือการคำนวณข้อมูลทั้งหมดของการทดลองนี้

ปริมาณ CO₂ ต่อเวลา



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ CO₂ ต่อเวลา กับเวลาที่ใช้ดักจับของการทดสอบการดักจับ CO₂ ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า ที่อุณหภูมิ 600 °C

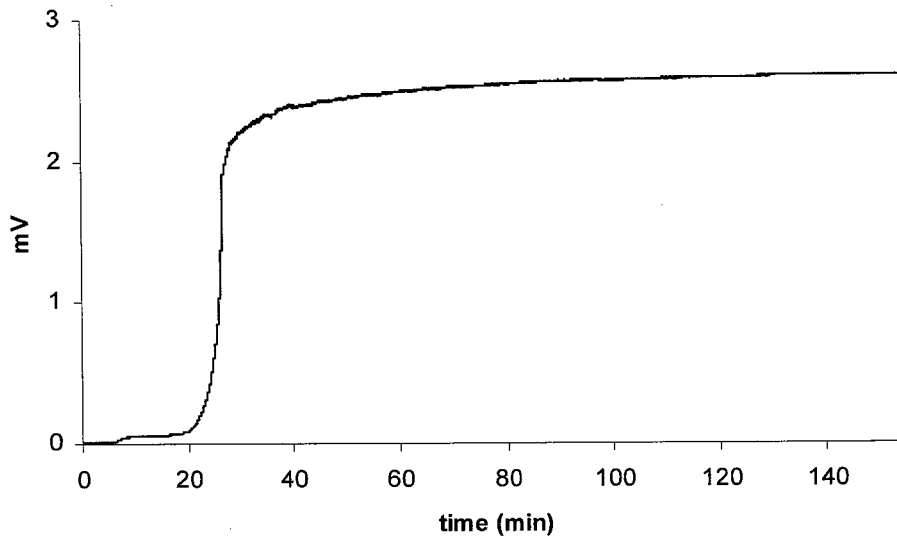
3. คำนวณปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับ

$$\begin{aligned}
 & - \text{โมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับ} \\
 & = \text{โมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์} - \text{โมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่ถูกดักจับ} \\
 & = 0.032843 - 0.029509 \\
 & = 0.003334 \text{ mol CO}_2 / 0.5116 \text{ g of CaO}
 \end{aligned}$$

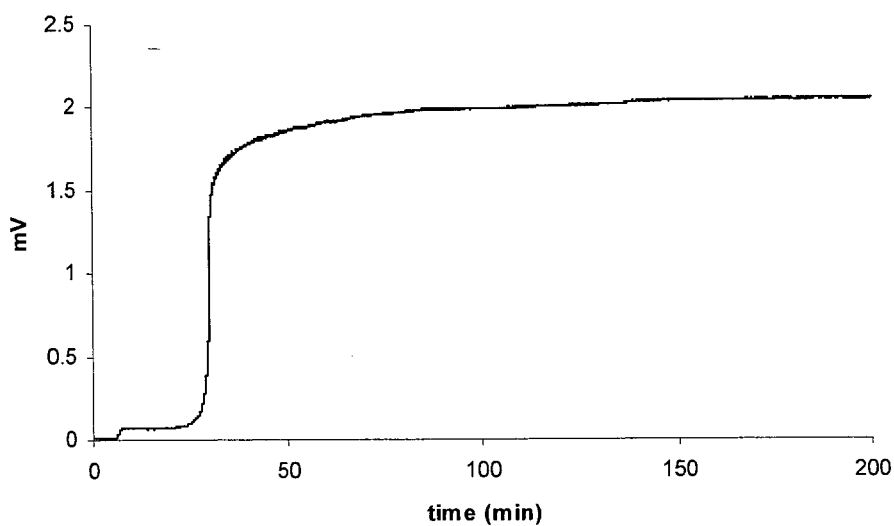
$$\text{หรือ} \quad = 6.5250 \text{ mol CO}_2 / 1 \text{ kg of CaO}$$

ภาคผนวก ก

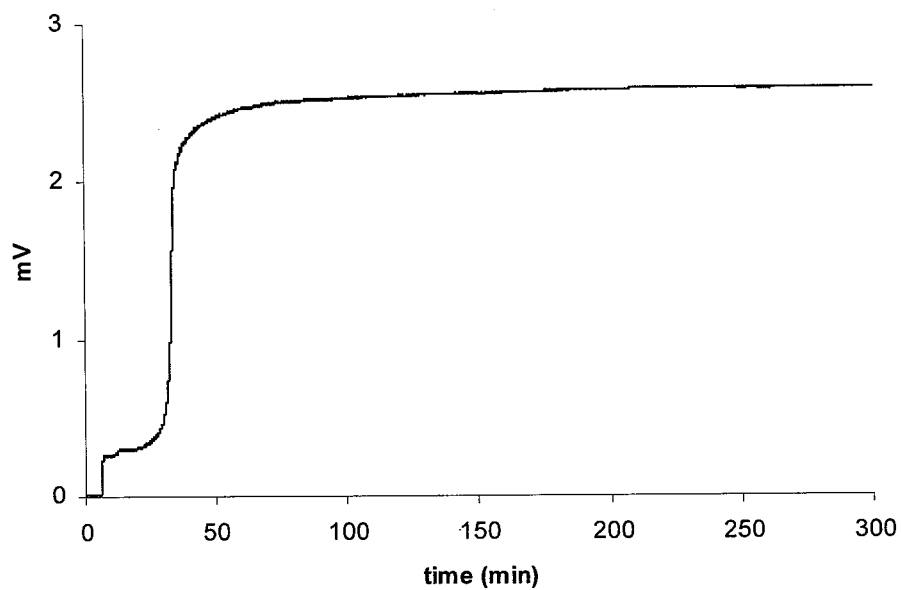
โครมาโตแกรมของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



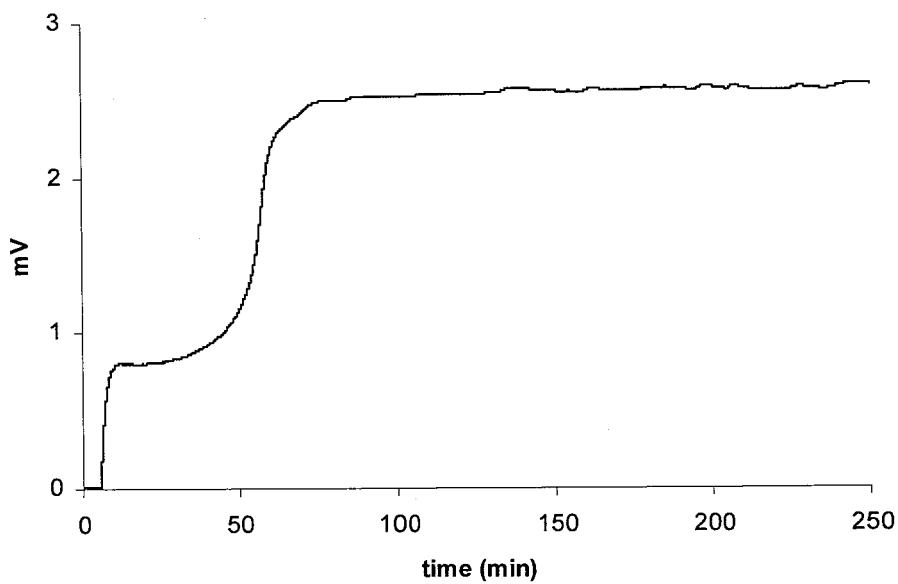
รูปที่ ก.1 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้าที่อุณหภูมิ 500 °C



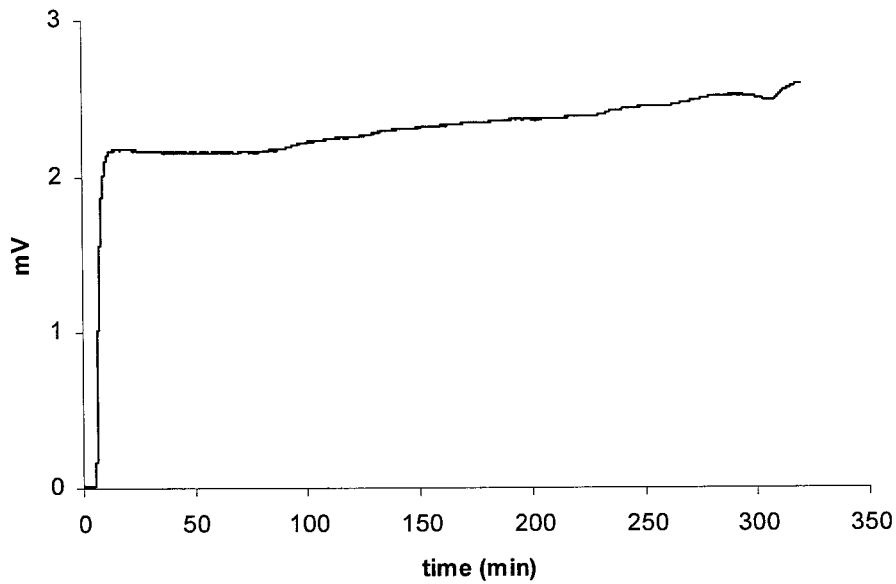
รูปที่ ก.2 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้าที่อุณหภูมิ 550 °C



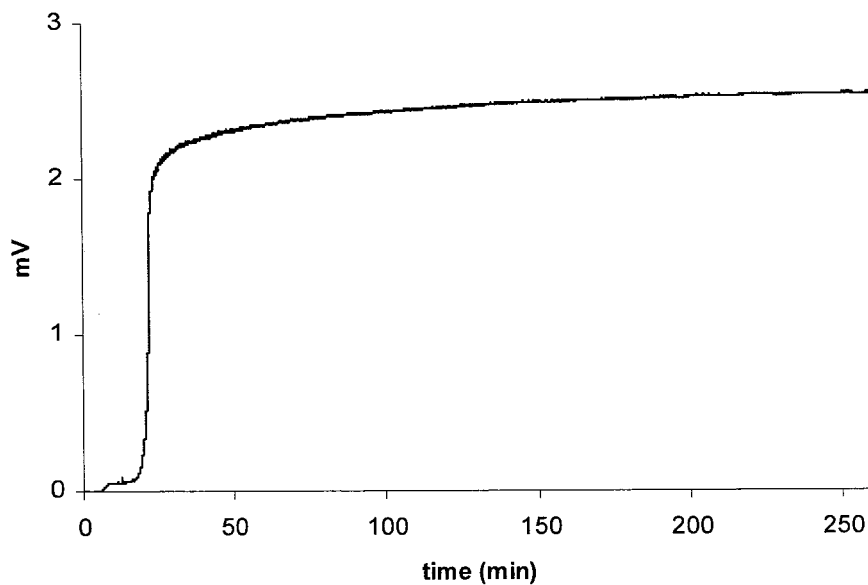
รูปที่ ค.3 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้าที่อุณหภูมิ 600 °C



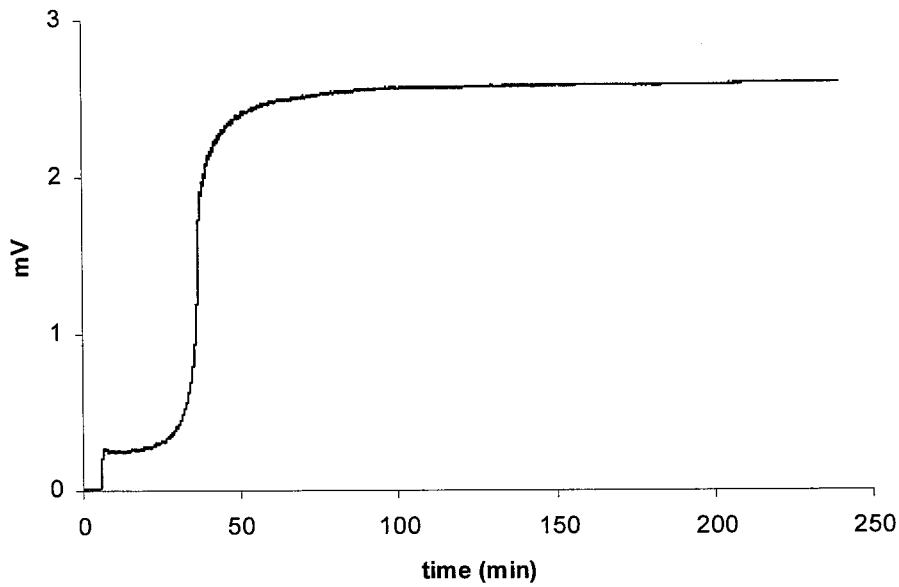
รูปที่ ค.4 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้าที่อุณหภูมิ 650 °C



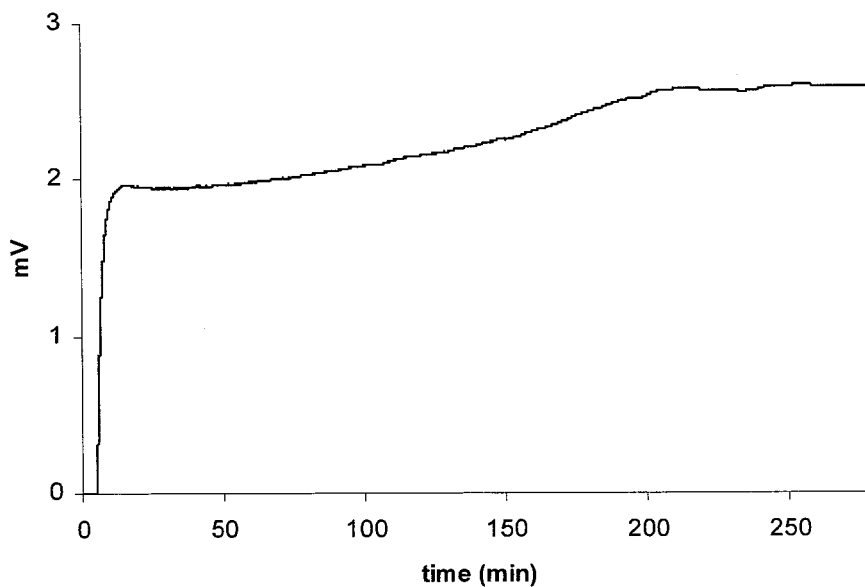
รูปที่ ๕.5 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้าที่อุณหภูมิ 700 °C



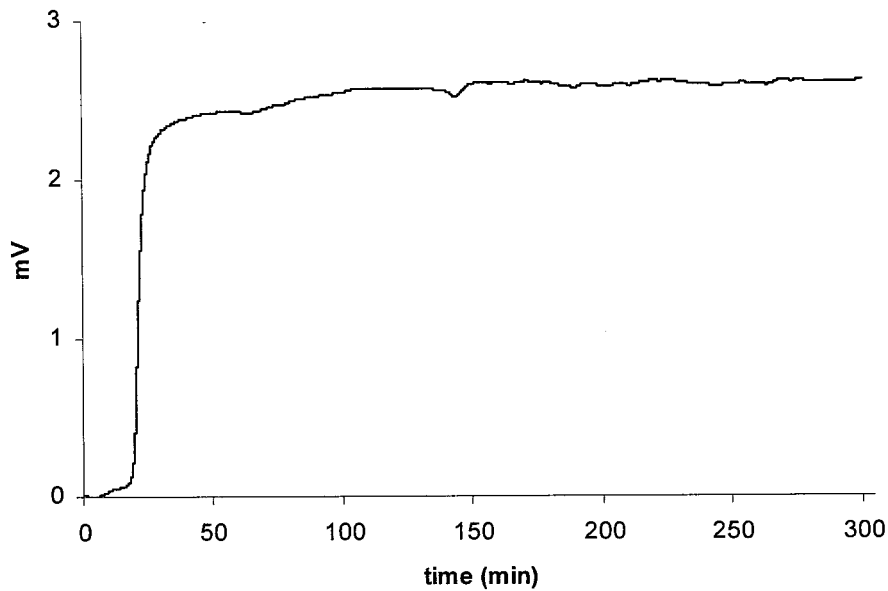
รูปที่ ๕.๖ โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์ที่เผาแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งได้จากวิธีตกตะกอนที่อุณหภูมิ 30 °C (PCC-CaO) ศึกษาที่อุณหภูมิ 500 °C



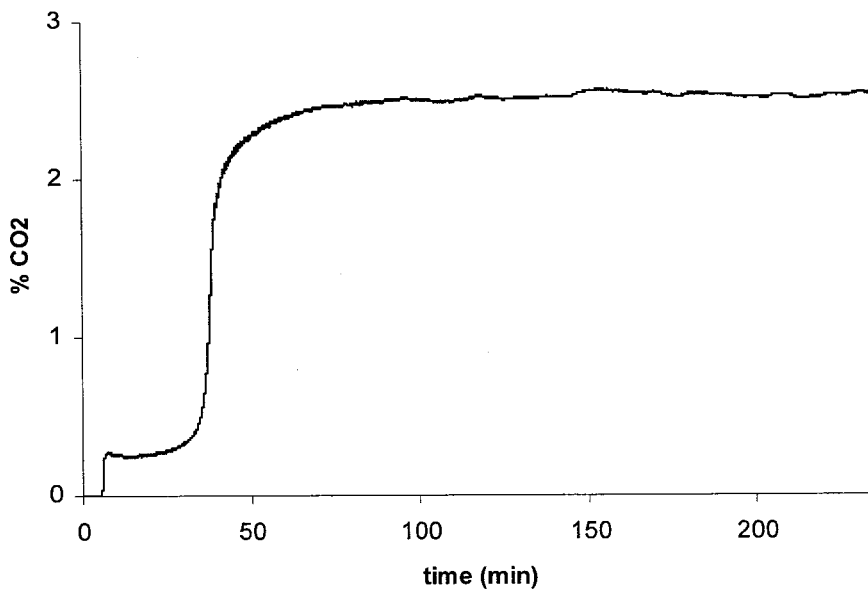
รูปที่ ค.7 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์ที่เผาแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งได้จากวิธีตกตะกอนที่อุณหภูมิ 30 °C (PCC-CaO) ศึกษาที่อุณหภูมิ 600 °C



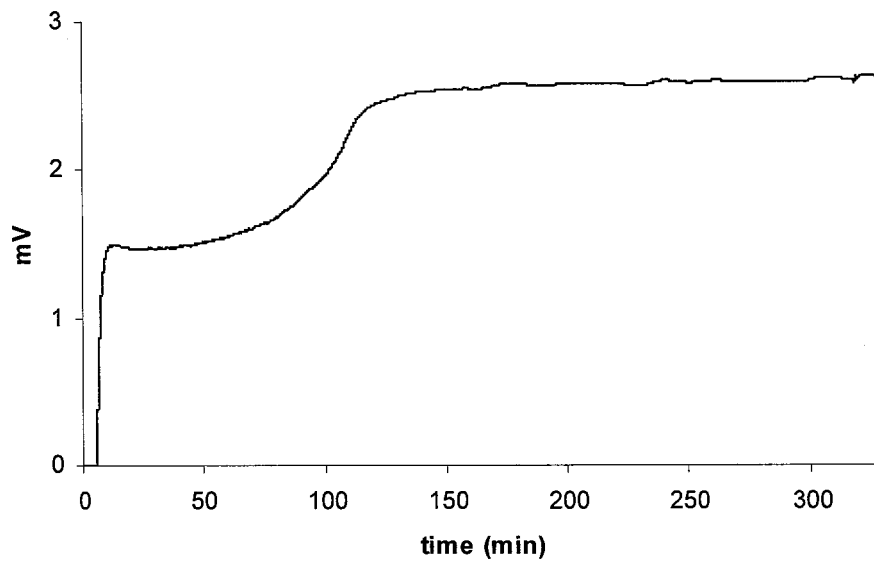
รูปที่ ค.8 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์ที่เผาแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งได้จากวิธีตกตะกอนที่อุณหภูมิ 30 °C (PCC-CaO) ศึกษาที่อุณหภูมิ 700 °C



รูปที่ ๙ โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์ที่เผาแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งได้จากวิธีตกตะกอนที่อุณหภูมิ 50 °C (PCC-CaO) ศึกษาที่อุณหภูมิ 500 °C



รูปที่ ๑๐ โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์ที่เผาแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งได้จากวิธีตกตะกอนที่อุณหภูมิ 50 °C (PCC-CaO) ศึกษาที่อุณหภูมิ 600 °C



รูปที่ ค.11 โครมาโตแกรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์ที่เผาแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งได้จากวิธีตกตะกอนที่อุณหภูมิ 50°C (PCC-CaO) ศึกษาที่อุณหภูมิ 700°C