

ผลของอุณหภูมิและขนาดต่อการเปลี่ยนสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมออกไซด์

นางสาวกัญญาภัทร สืบสาย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF TEMPERATURE AND SIZE ON THE CONVERSION OF CALCIUM CARBONATE COMPOUND TO CALCIUM OXIDE

Miss Gunyapat Subsuy



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering  
Department of Chemical Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2015  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของอุณหภูมิและขนาดต่อการเปลี่ยนสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมออกไซด์
โดย	นางสาวกัญญาภัทร สืบสาย
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กษิติศ หนูทอง)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร โทณานนท์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ขวัญทิพย์ โคนาคม)

กัญญาภัทร สืบสาย : ผลของอุณหภูมิและขนาดต่อการเปลี่ยนสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมออกไซด์ (EFFECT OF TEMPERATURE AND SIZE ON THE CONVERSION OF CALCIUM CARBONATE COMPOUND TO CALCIUM OXIDE) อ.ที่  
 ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.ไพศาล กิตติศุภกร, 58 หน้า.

การผลิตปูนขาวคือกระบวนการที่นำหินปูนมาทำการเผาเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างภายในของหินปูนซึ่งมีสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต( $\text{CaCO}_3$ )เป็นองค์ประกอบหลักให้เป็นปูนขาวหรือสารประกอบแคลเซียมออกไซด์( $\text{CaO}$ ) แต่ผลของขนาดมิติของหินปูนมีผลต่อการเกิดสารประกอบแคลเซียมออกไซด์และค่าการตกตะกอนแข็ง(ร้อยละของgrit)ที่ได้ต่างกันที่การเผาในแต่ละอุณหภูมิต่างกัน ซึ่งหากนำหินปูนที่ขนาดมิติที่ต่างกันมาเผาที่อุณหภูมิเดียวกัน จะก่อให้เกิดปัญหาต่อกระบวนการผลิตปูนขาวได้ โดยหินปูนที่นำมาศึกษาเป็นหินปูนขนาด 2 - 6 นิ้ว โดยทำการเผาหินดังกล่าว 2 ส่วนการทดลอง โดยส่วนการทดลองที่1 นำหินขนาด 2 - 6 นิ้วมาเผาที่อุณหภูมิ 850 - 1,050 องศาเซลเซียส เพื่อหาช่วงของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ได้ร้อยละ 90 ของแคลเซียมออกไซด์พบว่าที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสหินปูนขนาด 2 - 3 นิ้วสามารถเกิดเป็นสารประกอบ

แคลเซียมออกไซด์ได้ร้อยละ 90 ของแคลเซียมออกไซด์และที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียสหินปูนขนาด 2 - 6 นิ้วสามารถเกิดสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ได้ร้อยละ 90 ซึ่งจากผลดังกล่าวจึงเลือกช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมาทำการทดลองต่อในส่วนการทดลองที่ 2 โดยเลือกทดลองที่อุณหภูมิ 1,010 - 1,050 องศาเซลเซียสพบว่าที่อุณหภูมิ 1,040 องศาเซลเซียสหินปูนทุกขนาดที่นำมาทดลองสามารถเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ได้ร้อยละ 90 ของแคลเซียมออกไซด์และนอกจากนี้พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าร้อยละของGrit มีค่าลดต่ำลง

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558

# # 5670996521 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS:

GUNYAPAT SUBSUY: EFFECT OF TEMPERATURE AND SIZE ON THE  
CONVERSION OF CALCIUM CARBONATE COMPOUND TO CALCIUM OXIDE.

ADVISOR: PROF. PAISAN KITTISUPAKORN, Ph.D., 58 pp.

To produce lime from limestone is burning process to change internal structure of limestone that it has calcium carbonated ( $\text{CaCO}_3$ ) is main component to calcium oxide ( $\text{CaO}$ ). Sizing of limestone that we use to produce lime when we burnt at each temperature has the effect to change calcium carbonated ( $\text{CaCO}_3$ ) to calcium oxide ( $\text{CaO}$ ) and solid sludge( % grit). If we use the difference sizing of limestone to produce lime at the same temperature, it is the cause of the problem to produce lime.

In this study, limestone that we use have sizing in the range is 2 – 6 inches and we take it to burned in 2 part. Part 1 is to study by burning limestone at sizing 2 – 6 inches and we found 1,000 degree of celcius is the temperature that can change limestone sizing 2 – 3 inches to changed internal structure from calcium carbonated ( $\text{CaCO}_3$ ) to calcium oxide ( $\text{CaO}$ ) is 90% of calcium oxide. The temperature is 1,050 degree of celcius can change limestone sizing 2 – 6 inches to changed internal structure from calcium carbonated ( $\text{CaCO}_3$ ) to calcium oxide ( $\text{CaO}$ ) is 90% of calcium oxide. So we use the range of this temperature to study in part 2. Part 2 is to study the effect of sizing of limestone in the range 2 – 6 inches and selected temperature in the range 1,010 - 1,050 degree of celcius. The result of part 2 is the temperature is 1,040 degree of celcius change limestone sizing 2 – 6 inches to changed internal structure from calcium carbonated ( $\text{CaCO}_3$ ) to calcium oxide ( $\text{CaO}$ ) is 90% of calcium oxide and we found if we increase temperature, % grit is reduced.

Department: Chemical Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Chemical Engineering      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2015

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจากหลายๆฝ่าย ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาลกิตติ ศุภกร เป็นอย่างสูงที่คอยให้คำแนะนำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จและเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กษิติศ หนูทอง ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร โทณานนท์ และดร.ขวัญทิพย์ โภคาคมกรรมการสอบ ที่ให้คำแนะนำและแก้ไขข้อผิดพลาดจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณปู่ และครอบครัวที่สนับสนุน กำลังใจ และกำลังทรัพย์ ทุกท่านที่ให้ความร่วมมือช่วยเหลือ รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ ด้วยสำหรับคุณความดีจากงานวิจัยฉบับนี้ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	9
สารบัญภาพ .....	10
บทที่ 1 .....	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 .....	3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 หินปูน (limestone).....	3
2.2 ปูนขาว (Quicklime).....	3
2.3 การผลิตปูนสุก( Quicklime ).....	5
2.4 การผลิตปูนขาวในอุตสาหกรรม .....	15
2.5 การนำปูนขาวไปใช้ประโยชน์.....	16
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	17
บทที่ 3 .....	22
วิธีดำเนินการวิจัยและแผนการดำเนินงาน .....	22

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	22
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	22
บทที่ 4 .....	27
ผลการทดลอง .....	27
4.1 ผลการทดลองส่วนที่.....	27
4.1.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่า CaO และค่าCaCO <sub>3</sub> .....	27
4.1.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่ากากตะกอนแข็ง(Grit).....	31
4.2 ผลการทดลองส่วนที่ 2.....	31
4.2.1ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่า CaO และค่าCaCO <sub>3</sub> .....	31
4.2.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่า Color B และค่า Color Y.....	35
4.2.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่ากากตะกอนแข็ง(Grit) .....	36
บทที่5.....	40
สรุปผลการทดลอง.....	40
5.1 ส่วนการทดลองที่1 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่อุณหภูมิที่ 850องศาเซลเซียส, 900 องศาเซลเซียส, 950องศา เซลเซียส, 1,000องศาเซลเซียส, 1,050 องศาเซลเซียส.....	40
5.2 ส่วนการทดลองที่ 2 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ 1,010 องศาเซลเซียส 1,020 องศาเซลเซียส 1,030องศาเซลเซียส, 1,040 องศาเซลเซียส, 1,050 องศาเซลเซียส.....	40
รายการอ้างอิง .....	43
ภาคผนวก ก.....	47
ภาคผนวก ข.....	50
ภาคผนวก ค.....	53
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	58



## สารบัญตาราง

ตารางที่3.1	แสดงจำนวนหินปูนที่ต้องเก็บมาทดลองของส่วนการทดลองที่1.....	35
ตารางที่3.2	แสดงจำนวนหินปูนที่ต้องเก็บมาทดลองของส่วนการทดลองที่2.....	35
ตารางที่3.3	แสดงแผนการวิเคราะห์ตัวแปรของส่วนการทดลองที่1.....	36
ตารางที่3.4	แสดงแผนการวิเคราะห์ตัวแปรของส่วนการทดลองที่2.....	36
ตารางที่4	แสดงผลการวิเคราะห์หินปูนด้วยวิธีการ XRFก่อนทำการทดลอง.....	49
ตารางที่5	แสดงผลการวิเคราะห์หินปูนด้วย850องศาเซลเซียส, 900 องศาเซลเซียส, 950องศาเซลเซียส, 1,000องศาเซลเซียส, 1,050 องศาเซลเซียส .....	65
ตารางที่6	แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิ1,010, 1,020องศาเซลเซียส, 1,030 องศาเซลเซียส, 1,040องศาเซลเซียส, 1,050องศาเซลเซียส.....	65

## สารบัญภาพ

รูปที่2.1 แสดงการแตกตัวของหินปูนภายใต้กระบวนการเผา.....	14
รูปที่2.2 การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเผา(Calcination) ของหินปูนทรงกลมขนาด31 มิลลิเมตร (a)อุณหภูมิของเตาเผา; (b) อุณหภูมิที่ผิว; (c)อุณหภูมิที่ระยะเยลิกจากผิว 5 มิลลิเมตร; (d)% ของ CaCO <sub>3</sub> ; (e)รัศมีของแกนCaCO <sub>3</sub> .....	16
รูปที่2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผากับความดันก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการเผาหินปูน.....	16
รูปที่2.4 แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นและความดันก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการแยกตัวของแร่แคลไซต์.....	18
รูปที่2.5 แสดงอัตราการแยกตัวที่เปลี่ยนแปลงไปในตัวอย่างหินปูนแต่ละชนิด.....	20
รูปที่2.6 แสดง Loss On Ignition ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิในการแยกตัว.....	21
รูปที่2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวของปูนสุกที่ได้อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตปูน.....	24
รูปที่2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวปูนสุกและระยะเวลาที่ใช้ในการเผา.....	24
รูปที่2.9 แสดงภาพ Over view process for Quicklime.....	26
รูปที่3.1 แสดง Flow Chart แสดงวิธีการทดลอง.....	34
รูปที่4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO,ค่า CaCO <sub>3</sub> และค่า MgOที่อุณหภูมิ 850 องศา เซลเซียส.....	38
รูปที่4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO,ค่า CaCO <sub>3</sub> และค่า MgOที่อุณหภูมิ 900องศา เซลเซียส.....	39
รูปที่4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO,ค่า CaCO <sub>3</sub> และค่า MgOที่อุณหภูมิ 950องศา เซลเซียส.....	40
รูปที่4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO,ค่า CaCO <sub>3</sub> และค่า MgOที่อุณหภูมิ 1,000องศา เซลเซียส.....	41
รูปที่4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO,ค่า CaCO <sub>3</sub> และค่า MgOที่อุณหภูมิ 1,050 องศา เซลเซียส.....	42
รูปที่4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า% LOIของหินปูนขนาดตั้งแต่ 2 – 6 นิ้วที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 850องศาเซลเซียส, 900 องศาเซลเซียส, 950องศาเซลเซียส, 1,000องศา เซลเซียส, 1,050 องศาเซลเซียส.....	43
รูปที่4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO,ค่า CaCO <sub>3</sub> ที่อุณหภูมิ 1,010 องศา	

เซลเซียส.....	44
รูปที่4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO,ค่า CaCO <sub>3</sub> ที่อุณหภูมิ 1,020 องศาเซลเซียส.....	45
รูปที่4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO,ค่า CaCO <sub>3</sub> ที่อุณหภูมิ 1,030 องศาเซลเซียส.....	46
รูปที่4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO,ค่า CaCO <sub>3</sub> ที่อุณหภูมิ 1,040องศาเซลเซียส.....	46
รูปที่4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO,ค่า CaCO <sub>3</sub> ที่อุณหภูมิ1,050องศาเซลเซียส.....	47
รูปที่4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO,ค่า CaCO <sub>3</sub> ที่ขนาดหินต่างๆ.....	48
รูปที่4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า colour B และค่า colour Yที่อุณหภูมิและ ขนาดของหินต่างๆ.....	49
รูปที่4.14 แสดงความสัมพันธ์ของ % CaO และค่า % Grit ที่อุณหภูมิ1,010 องศาเซลเซียส.....	50
รูปที่4.15 แสดงความสัมพันธ์ของ % CaO และค่า % Grit ที่อุณหภูมิ 1,020องศาเซลเซียส.....	50
รูปที่4.16 แสดงความสัมพันธ์ของ % CaO และค่า % Grit ที่อุณหภูมิ 1,030องศาเซลเซียส.....	51
รูปที่4.17 แสดงความสัมพันธ์ของ % CaO และค่า % Grit ที่อุณหภูมิ1,040องศาเซลเซียส.....	51
รูปที่4.18 แสดงความสัมพันธ์ของ % CaO และค่า % Grit ที่อุณหภูมิ1,050องศาเซลเซียส.....	52
รูปที่4.19 แสดงความสัมพันธ์ค่า % Grit ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	53
รูปที่5.1 แสดงผลการวิเคราะห์หินปูนโดยวิธีการ XRF ก่อนการทดลอง.....	65
รูปที่5.2 แสดงผลการวิเคราะห์หินปูนโดยวิธีการ XRF ก่อนการทดลอง.....	65
รูปที่6.1 แสดงภาพถ่ายหินปูนขนาด 2 นิ้วที่ใช้ทำการทดลอง.....	68
รูปที่6.2 แสดงภาพถ่ายหินปูนขนาด 3 นิ้วที่ใช้ทำการทดลอง.....	68
รูปที่6.3 แสดงภาพถ่ายหินปูนขนาด 4 นิ้วที่ใช้ทำการทดลอง.....	69
รูปที่6.4 แสดงภาพถ่ายหินปูนขนาด 5 นิ้วที่ใช้ทำการทดลอง.....	69
รูปที่6.5 แสดงภาพถ่ายหินปูนขนาด 6 นิ้วที่ใช้ทำการทดลอง.....	70
รูปที่6.6 แสดงภาพถ่ายการสุมหินปูนอุตสาหกรรมจากกอง.....	70

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

กรรมวิธีในการผลิตปูนขาวเป็นกระบวนการที่นำหินปูนมาทำการเผาเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างภายในของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) หรือหินปูนให้เป็นสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) หรือปูนขาว แต่เนื่องจากหินปูนที่รูปร่างเดียวกันแต่มีขนาดมิติที่ไม่เหมือนกันจะส่งผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างภายในของหินปูนให้เป็นปูนขาวที่อุณหภูมิแตกต่างกัน จึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์สารประกอบแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ที่เกิดขึ้นหลังจากทำการเผาที่ได้แตกต่างกันและยังส่งผลต่อคุณภาพของการเกิดกากตะกอนแข็งของปูนขาว (Grit) ดังนั้นหากทำการผลิตปูนขาวโดยการนำขนาดของหินปูนที่มีมิติแตกต่างกันมาเผาที่อุณหภูมิเดียวกันจะทำให้เกิดการผลิตปูนขาวที่ไม่ได้คุณภาพเนื่องจากขนาดมิติของหินปูนแตกต่างกันจะทำให้หินปูนในแต่ละขนาดมิติได้รับอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ เช่นอาจจะได้รับอุณหภูมิต่ำเกินไปหรืออุณหภูมิสูงเกินไปก็จะส่งผลให้หินปูนเปลี่ยนเป็นปูนขาวไม่ได้คุณภาพที่ต้องการยกตัวอย่างเช่นหากได้รับอุณหภูมิสูงมาก (โดยเฉลี่ยหากมีอุณหภูมิสูงเกิน 1,200 องศาเซลเซียส) ปูนขาวจะเกิดการหลอมขึ้นและส่งผลกระทบต่อเตาเผาจึงอาจทำให้เตาเผาเกิดการหลอมและเป็นปัญหาต่อกระบวนการผลิตต่อไปในอนาคต ดังนั้นจึงเป็นที่มาที่ทำให้ทางผู้วิจัยนำปัญหาดังกล่าวมาพิจารณาโดยการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้หินปูนเปลี่ยนสภาพเป็นปูนขาวได้ร้อยละ 90 ของแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) และเกิดค่ากากตะกอนแข็ง (grit) ต่ำกว่า 8% โดยที่กระบวนการผลิตสามารถทำการผลิตได้โดยไม่เกิดการหลอมของหินปูนที่นำมาทำการผลิต

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อทราบอุณหภูมิเฉลี่ยที่เหมาะสมในการเผาหินปูนเพื่อผลิตปูนขาวที่ขนาดต่างกันในช่วง 2 - 6 นิ้ว

#### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 คัดหินโดยควบคุมขนาดของหินปูนให้มีด้านกว้าง 2 นิ้วและสูง 2 นิ้ว แต่แปรผันความยาวตั้งแต่ 2 - 6 นิ้ว

1.3.2 ทำการทดลองเผาหินปูนโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนการทดลอง

โดยส่วนการทดลองแรกเผาหินปูนที่อุณหภูมิ  $850^{\circ}\text{C}$  ,  $900^{\circ}\text{C}$  ,  $950^{\circ}\text{C}$  ,  $1,000^{\circ}\text{C}$  และ  $1,050^{\circ}\text{C}$  และส่วนการทดลองที่ 2 เผาหินปูนที่อุณหภูมิ  $1,010^{\circ}\text{C}$  ,  $1,020^{\circ}\text{C}$  ,  $1,030^{\circ}\text{C}$  ,  $1,040^{\circ}\text{C}$  และ  $1,050^{\circ}\text{C}$

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบอุณหภูมิเฉลี่ยของหินปูนที่ขนาดความยาว 2 - 6 นิ้ว ที่เหมาะสมสำหรับการเผาเพื่อให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเกิดสารประกอบแคลเซียมออกไซด์มากกว่าร้อยละ 90 ของการเกิดสารประกอบแคลเซียมออกไซด์และเกิดค่ากากตะกอนแข็ง(%grit) ต่ำกว่า 8%



## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 หินปูน (limestone)

**หินปูน** (limestone) เป็นหินในกลุ่มหินตะกอน มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า แร่แคลไซต์ ( $CaCO_3$ ) จัดเป็นหินตะกอนคาร์บอเนต เกิดจากการทับถมของตะกอนคาร์บอเนตทั้งจากสารอนินทรีย์ และสารอินทรีย์ได้แก่ ปะการัง และกระดองของสัตว์ทะเล ซึ่งทับถมกันภายใต้ความกดดันและเกิดการตกผลึกใหม่เป็นแร่แคลไซต์ซึ่งสารดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยากับกรดได้ ลักษณะของเนื้อผลึกของหินปูนเป็นหินที่มีเนื้อแน่นและละเอียดหยาบ มีสีออกขาว เทา ชมพู หรือสีดำ

### 2.2 ปูนขาว (Quicklime)

**ปูนขาว(Quicklime)** ผลิตได้โดยกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างของหินปูนโดยการแยกตัวของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารประกอบแคลเซียมออกไซด์หรือปูนขาวโดยอาศัยความร้อนและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตไปเป็นสารประกอบแคลเซียมออกไซด์พบว่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหินปูนและอุณหภูมิระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนี้คุณภาพของความบริสุทธิ์ของสารประกอบแคลเซียมออกไซด์หรือปูนขาวสามารถพิจารณาได้จากปัจจัยหลายอย่าง เช่น คุณสมบัติทางฟิสิกส์ และคุณสมบัติทางเคมี

#### คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของปูนขาว

##### มวลโมเลกุล

มวลโมเลกุลของแคลเซียมออกไซด์ คือ 56.08 และมวลโมเลกุลของแมกนีเซียมออกไซด์คือ 40.31

สี

สีของปูนขาวส่วนใหญ่เป็นสีขาว ถ้ามีสิ่งปนเปื้อนเป็นพวกเหล็กและแมงกานีส สีของปูนขาวจะออกสีเทา น้ำตาล หรือเหลือง ถ้าปูนขาวที่ได้มาจากการเผาเชื้อเพลิงแข็ง ถ้าผ่านการเผาไหม้จะปกคลุมผิวของปูนขาวทำให้เห็นเป็นสีน้ำตาล หรือเทา

##### กลิ่น

กลิ่นของปูนขาวมีกลิ่นคล้ายกลิ่นของดิน

##### เนื้อสัมผัส

ปูนขาวจะประกอบด้วยผลึกเล็กๆรวมกันแต่รูปร่างที่ปรากฏภายนอกมองเห็นเป็นรูปร่างที่ไม่แน่นอน

### ค่าการละลาย (Solubility)

ค่าการละลายในน้ำของปูนขาวไฮเดรต เท่ากับ  $1.85 \text{ g Ca(OH)}_2/\text{L}$  ที่  $0^\circ\text{C}$

### ค่าการตะกอนแข็ง ( Grit)

ค่าที่แสดงน้ำหนักของปูนขาวที่ไม่สามารถละลายน้ำได้หมดกลายเป็นตะกอนแข็งอยู่ในน้ำที่นำมาละลายปูนขาว

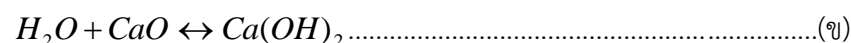
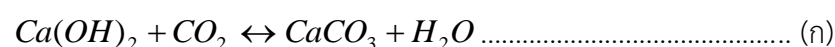
### คุณสมบัติทางเคมีของปูนขาว

ปูนขาวเป็นวัตถุที่ไม่ไหม้ไฟเพราะมีจุดหลอมเหลวสูง ซึ่งทั้งคู่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำทั้งในสถานะของเหลวและไอความร้อนที่ปล่อยออกมาขณะทำปฏิกิริยากับน้ำ ความร้อนที่ปล่อยออกมาจากการทำปฏิกิริยาของปูนขาวกับน้ำมีค่าเท่ากับ  $1,140 \text{ kJ/kg}$  ของแคลเซียมออกไซด์ค่าปฏิกิริยากับน้ำ ถูกวัดโดยค่าอัตราการปล่อยความร้อนของการไฮเดรชัน (Hydration) หรือ วัดค่าของอัตราการเกิดของไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl ions) ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Affinity for water) ปูนขาวมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงและมีค่าการดูดซับน้ำสูงกว่าค่าของซิลิกาเจล ซึ่งปูนขาวสามารถนำไปใช้ในเครื่องดูดความชื้นได้

ฉะนั้นการเก็บรักษาปูนขาวต้องเก็บในที่แห้งและมีการผนึกอย่างดีเพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับน้ำ(เกิดขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับไอน้ำในบรรยากาศในส่วนการเย็นตัวของเตาเผา)

นอกจากนี้ในทางปฏิบัติปูนขาวสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้บรรยากาศทั่วไป คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซับโดยไฮดรอกไซด์ดังสมการ...ก ซึ่งปฏิกิริยานี้จะให้น้ำออกมาและน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยาต่อกับปูนขาวถัดไปดังสมการ..ข

เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์



จากการศึกษาพบว่าปูนขาวที่ไม่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้เฉพาะที่อุณหภูมิประมาณ  $300^\circ\text{C}$  แต่ไม่เกิน  $800^\circ\text{C}$  ซึ่งปฏิกิริยานี้สามารถเกิดในส่วนการเย็นตัว( Cooling zone ) ของเตาเผาภายใต้สภาวะที่ไม่ปกติ เป็นผลทำให้เกิดกระบวนการคาร์บอนชั่น(Carbonation) ที่ผิวหน้าและทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาที่ต่ำผิดปกติ

### วัตถุเจือปน

1. แมกนีเซียมออกไซด์ที่ปนอยู่ในปูนขาวโดยปกติไม่ได้พิจารณาให้เป็นวัตถุเจือปนในปูนขาว เนื่องจากสารดังกล่าวสามารถใช้ในการถลุงเหล็ก แต่ถ้าสารประกอบแมกนีเซียมออกไซด์ปนในปูนขาวจำนวนมากเกินกว่า  $2 - 5 \%$  จะทำให้ปูนขาวไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม

2. ซิลิโคน, อลูมินัม, เหล็ก และซัลเฟอร์ จะพบเป็นวัตถุเจือปนในปูนขาวรวมแล้วไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนขาวโดยรวม แต่จะพบสารประกอบดังกล่าวปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เชื้อเพลิงแข็งในการเผาหินปูนเพื่อให้เกิดเป็นปูนขาว

#### หมายเหตุ

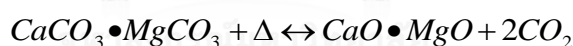
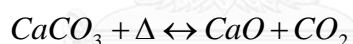
ระดับของสารปนเปื้อนอื่นๆ อาทิ ตะกั่ว พลวง อาเซนิก แคดเมียม โครเมียม โมลิบดีนัม นิกเกิล และเซเลเนียม จะหาปริมาณได้โดยหาความเข้มข้นของสารดังกล่าวในหินปูนที่นำมาเผา (บางสารเช่น โบรอนและปรอท จะระเหยไปเองภายในกระบวนการเผา) ถ้าปูนขาวที่มีระดับสารปนเปื้อนที่มีพิษสูงก็จะไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเช่นการผลิตน้ำดื่ม เป็นต้น

### 2.3 การผลิตปูนสุก( Quicklime )

การผลิตปูนสุก จะมีกระบวนการที่สำคัญคือการเผาหินปูน ( Calcination ) เพื่อให้ได้ปูนสุก ซึ่งในการ Calcination มีสิ่งที่จะต้อง พิจารณาดังนี้คือ

#### 2.3.1 ปฏิกริยาทางเคมีในการเผาหินปูน ( Calcination )

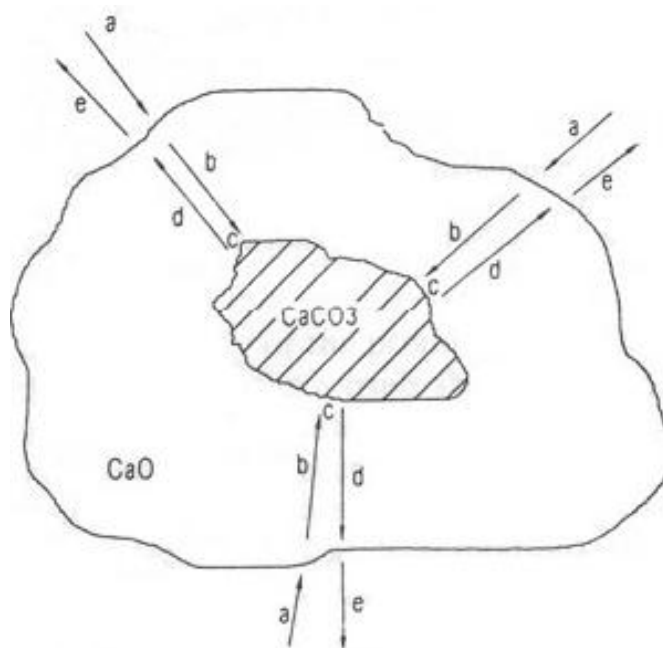
ขั้นตอนที่สำคัญในการผลิตปูนสุก คือ Calcination เป็นการเผาหินปูนเพื่อให้ได้ปูนสุกสามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้ คือ



จากสมการทางเคมีข้างต้น จะเห็นได้ว่าปูนสุก ( Quicklime ) หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการ Calcination วัตถุดิบที่เป็นหินปูนที่มีส่วนประกอบของแร่แคลไซต์ ( Calcite;  $CaCO_3$  ) หรืออาจจะมีแร่ โดโลไมต์ ( Dolomite;  $CaCO_3 \bullet MgCO_3$  ) โดยปฏิกิริยาจะเริ่มจากผิวหน้าด้านนอกของหินปูนแล้วผ่านเข้าไปยังแกนของกลางของหินปูน ขณะที่เกิดการ Calcination จะพบว่ามีการคายคาร์บอนไดออกไซด์ (  $CO_2$  ) เกิดในปฏิกิริยา ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้จะประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ ( CaO ) อาจจะเป็นปูนสุกแคลเซียมออกไซด์ ( CaO ) หรือที่เรียกว่า High Calcium Quicklime ซึ่งเกิดจากการเผา High Calcium limestone ( คือหินปูนที่มีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นแร่แคลไซต์มากกว่าร้อยละ 95 หรืออาจจะเป็นปูนสุกแคลเซียมแมกนีเซียมออกไซด์ (  $CaO \bullet MgO$  ) หรือที่เรียกว่า Dolomite Quicklime ที่ได้จากการเผา Dolomite Limestone คือหินปูนที่มีส่วนประกอบของแร่โดโลไมต์



การเผาหินปูนเพื่อให้ได้ปูนสุก จะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์( $CO_2$ ) เกิดขึ้น ซึ่งมีผลทำให้น้ำหนักของหินปูนหายไป โดยเรียกน้ำหนักของร้อยละของหินปูนที่หายไปนี้ว่า Loss On Ignition ( LOI ) ซึ่งการเผาหินปูนหรือแรโดโลไมท์ให้เป็นปูนสุกจะมีน้ำหนักหายไปร้อยละ 44 - 48 ปูนสุกที่เผาได้นั้นบางครั้งมีลักษณะเป็นก้อนเรียกว่า Lump Limeซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการเผาหินปูน ( Calcination ) ได้ดังนี้



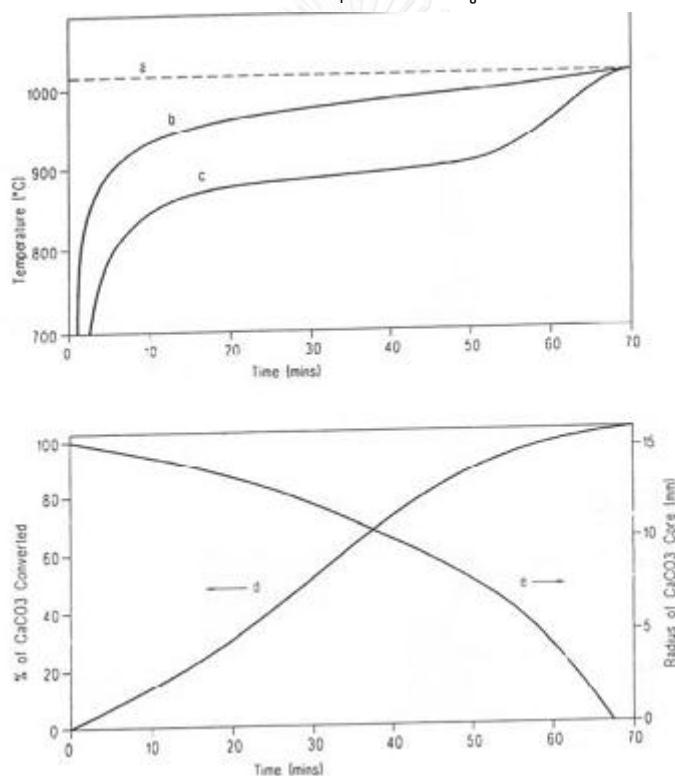
รูปที่ 2.1 แสดงการแตกตัวของหินปูนภายใต้กระบวนการเผา  
ที่มา: Octae(1988)

- ความร้อนจะถ่ายเทจากก๊าซของเตาสู่อผิวหน้าของอนุภาค
- ความร้อนจะถูกนำจากผิวหน้าสู่เนื้อภายในผ่านชั้นของช่องว่างเล็กๆของปูนขาว
- เมื่อความร้อนเข้ามาสู่ส่วนเกิดปฏิกิริยาภายในเนื้อวัตถุ จะทำให้เกิดการแยกตัวของ  $CaCO_{3(s)}$  กลายเป็น  $CaO(s)$  และ  $CO_{2(g)}$
- คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยา จะลอยผ่านชั้นของปูนขาวสู่อผิวหน้าของอนุภาค และจะถูกทำให้ร้อนขึ้นจากอุณหภูมิของส่วนที่เกิดปฏิกิริยาสู่อุณหภูมิที่ผิวหน้านั้น
- คาร์บอนไดออกไซด์จะลอยออกจากผิวหน้าสู่ก๊าซที่ออกจากเตา

สภาพทางเคมีฟิสิกส์ของกระบวนการ(a), (c) และ(e) นั้นไม่ซับซ้อนสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย แต่ผลกระทบของโครงสร้างจุลภาคของชั้นของปูนขาวในกระบวนการ(b) และ(d) นั้นซับซ้อนมาก และขึ้นอยู่กับลักษณะของหินปูนและจะเพิ่มขึ้นเมื่อการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในโครงสร้างของชั้นผิวหน้าของปูนขาวซึ่งเป็นผลจากการสตุ(Sintering), การเกิดเกร็ด(Slagging) และการดูดซับซัลเฟอร์ไดออกไซด์

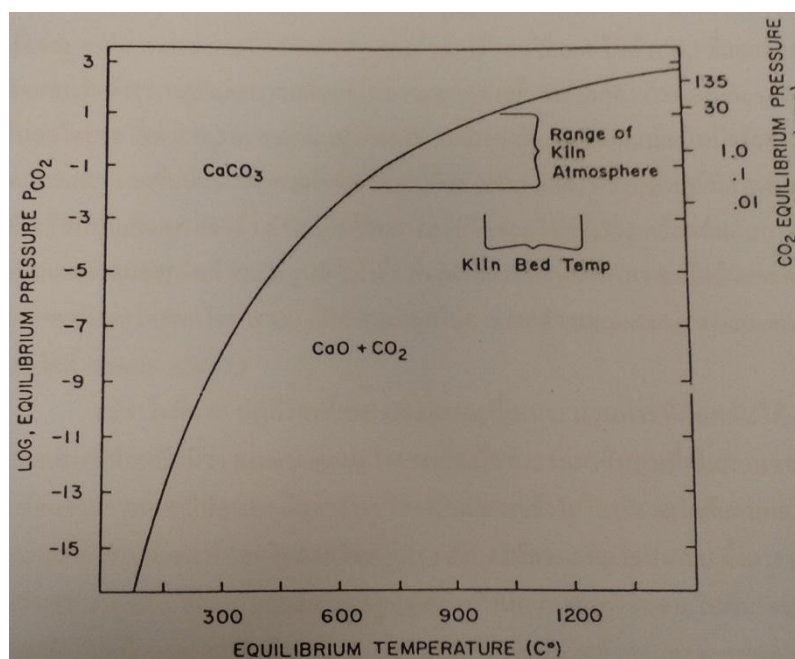
ในการวิเคราะห์การเกิดขึ้นของกระบวนการนั้นวัดออกมาได้ยาก จึงใช้การวัดอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์จากส่วนที่เกิดปฏิกิริยาเป็นตัววัดแทนการวัดการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านแคลเซียมออกไซด์ในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งตรงข้ามกับรูปร่างที่ซับซ้อนของกราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียที่ความดันบรรยากาศกับความสัมพันธ์แบบเส้นตรงภายในสุญญากาศ

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนั้นสามารถอธิบายได้โดยผลจากการทดลองการเกิดกระบวนการเผา (Calcination) ของหินปูนรูปร่างทรงกลม ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 31 มม. และมีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ผิวหน้าของหินปูนและที่ต่ำกว่าผิวหน้าลงไป 5 มม. และทรงกลมนั้นอยู่ในเตาเผาที่มีอุณหภูมิ 1,020 °C พบว่าอุณหภูมิที่ผิวหน้านั้นสามารถเพิ่มสูงขึ้นถึง 900 °C ภายในเวลา 5 นาที และเพิ่มจนสูงถึง 1,000 °C หลังจากผ่านไปแล้ว 60 นาที และเพิ่มจนเท่ากับอุณหภูมิของเตาเผาหลังจากผ่านไป 67 นาทีซึ่งเวลาดังกล่าวนี้อนุภาคจะเข้าสู่การเผา (Calcined) โดยสมบูรณ์



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเผา (Calcination) ของหินปูนทรงกลมขนาด 31 มิลลิเมตร (a) อุณหภูมิของเตาเผา; (b) อุณหภูมิที่ผิว; (c) อุณหภูมิที่ระยะลึกจากผิว 5 มิลลิเมตร; (d) % ของ CaCO<sub>3</sub>; (e) รัศมีของแกนของ CaCO<sub>3</sub>.  
ที่มา: Oates (1998)

และจากรูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผากับความดันที่เกิดขึ้นของ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ในบรรยากาศ ซึ่งพบว่า ถ้าเกิดปฏิกิริยา Calcination ขึ้นตรงส่วนล่าง ของกราฟนี้แล้วปฏิกิริยาจะเกิดไปข้างหน้าคือหินปูนถูกเผากลายเป็นปูนสุก ( Quicklime ) ในขณะที่ หากเกิดปฏิกิริยาตรงส่วนบนของกราฟนี้ ปฏิกิริยาจะผันกลับกลายเป็นแร่แคลไซต์โดยมีเพียงส่วนบน ของกราฟที่เกิดสภาวะสมดุลซึ่งเตาเผาปูนขาวส่วนใหญ่จะทำการผลิตที่อุณหภูมิ  $1,000^{\circ}C - 1,500^{\circ}C$



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผากับความดันในการเกิดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการเผาหินปูน  
ที่มา: R.S. Boynton(1980)

### 2.3.2 อุณหภูมิในการแยกตัว ( Dissociation Temperature )

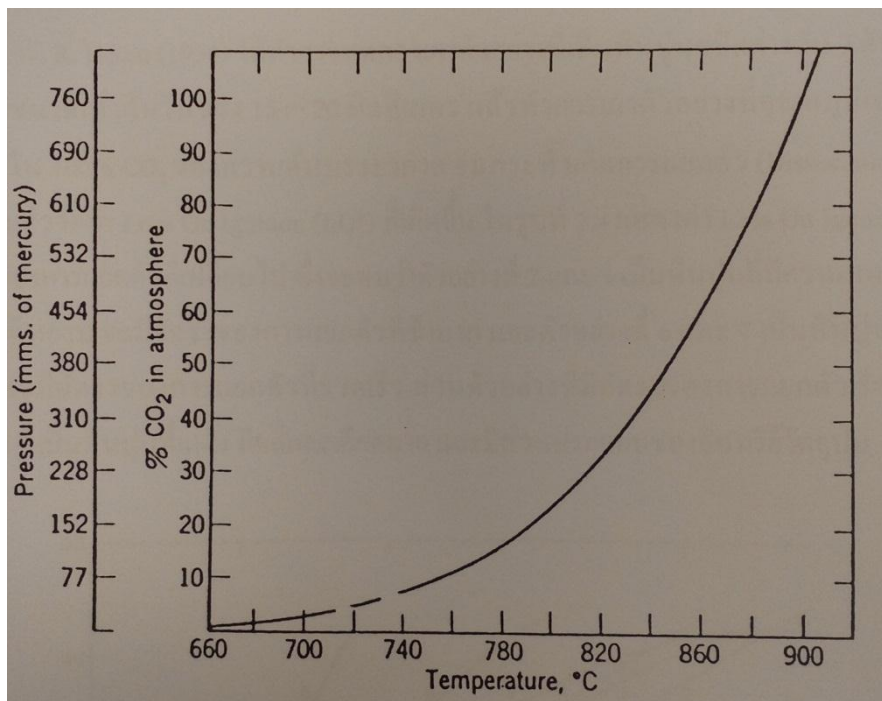
การแยกตัว (Dissociation) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ออกจากหินปูนกลายเป็น ปูนสุก ( Quicklime ) จะเริ่มต้นจากผิวหน้าเข้าสู่แกนกลางของหินปูน ซึ่งพบว่าอุณหภูมิในการ แยกตัวที่ผิวหน้าของ High Calcium Limestone อยู่ที่ประมาณ  $742^{\circ}C$  ( V.J. Azbe, 1939 ) แต่ การแยกตัวต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นเพื่อทำให้เกิดการแยกตัวที่แกนกลางของหินปูน ซึ่งความแตกต่าง ของอุณหภูมิในการแยกตัวที่บริเวณผิวด้านนอก และแกนกลางของหินปูนอาจจะมีค่าประมาณ  $150^{\circ}C - 370^{\circ}C$  ขึ้นอยู่กับขนาดของหินปูนที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเมื่อพิจารณาถึงขนาดของหินปูนจะ พบว่าหินปูนยังมีขนาดใหญ่ก็จะใช้อุณหภูมิที่มีค่าสูงขึ้นในการแยกตัวที่บริเวณแกนกลางของหินปูนให้

มีค่าเพียงพอที่จะเพิ่มความดันเพื่อขับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) แยกตัวออกมาเมื่อเปรียบเทียบกับหินปูนขนาดเล็ก

อุณหภูมิและอัตราในการแยกตัวพบว่าจะมีค่าไม่ตายตัวสม่ำเสมอขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความดันและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ที่แยกตัวออกมา โดยจะพบว่าถ้าอุณหภูมิและความดันอยู่ในสภาวะสมดุลแล้วอัตราการแยกตัว (Dissociation) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ออกจากหินปูนจะมีค่าคงที่ แต่ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงในปัจจัยต่างๆ เช่น ความดันและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) พร้อมกับการรวมตัวกันเป็นสารแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รูปที่ 2.3 เป็นกราฟแสดงอิทธิพลของความเข้มข้นและความดัน โดยจะพบว่า ถ้าอุณหภูมิและความดันอยู่ในสภาวะสมดุลแล้วการแยกตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ออกจากหินปูนจะคงที่ แต่ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงในปัจจัยต่างๆ เช่น ความดันและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ลดลง หรืออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้หินปูนเกิดการแยกตัวทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) พร้อมกับการรวมตัวเกิดเป็นสารแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รูปที่ 2.4 ที่แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นและความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ที่มีผลต่ออุณหภูมิในการแยกตัว (Dissociation Temperature) ของแร่แคลไซต์ (Calcite;  $CaCO_3$ )

อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาที่เกิด Calcination เป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ ซึ่งเรียกกระบวนการดังกล่าวนี้ว่า Recarbonation โดยจะเกิดขึ้นเมื่อเราทำการเผาหินปูนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งเกิดจากการที่เราเผาหินปูนขนาดใหญ่ ความร้อนจากภายนอกที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะไหลเข้าสู่ภายในผ่านช่องว่างและรูพรุนของหินปูนเข้าสู่แกนกลางของหินปูน ทำให้เกิดการแยกตัวก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ส่งผลให้ความดันเริ่มมากขึ้นซึ่งอาจจะสูงกว่าความดันบรรยากาศถึง 100 Psi และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ให้ความดันสูงมากตามไปด้วยจนทำให้ผิวนอกของหินปูนเมื่อถูกเผาสุกเกินไป (Over burnt) ส่งผลให้หินปูนหดตัวลงและทำให้ช่องว่างภายในที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เคยไหลออกมาปิดตัวลง

การเผาหินปูนต้องรักษาระดับอุณหภูมิในการแยกตัวให้คงที่ในระดับที่ต้องการและต้องคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ในการเผา รวมถึงการสูญเสียไปในระหว่างรับหินปูนและจ่ายปูนสุกเมื่อเผาเสร็จ



รูปที่ 2.4 แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นและความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ที่มีผลต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการแยกตัวของแร่แคลไซต์ (Calcite;  $CaCO_3$ )  
ที่มา; V.J. Azbe(1939)

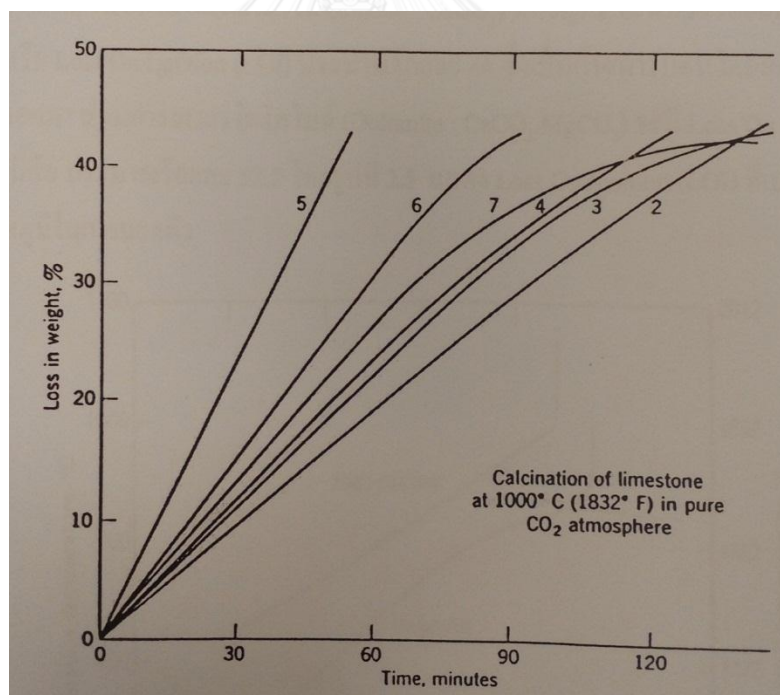
### 2.3.3 อัตราการแยกตัว (Rate of Dissociation)

จะพบว่าถ้ายิ่งใช้อุณหภูมิในการเผาที่สูง และระยะเวลาในการเผานานจะส่งผลให้ปูนสุกแบบสุกมาก (Hard burnt) คือปูนสุกมีการหดตัวมาก มีความหนาแน่นสูง ช่องว่างภายในของปูนขาวน้อยลงและมีความสามารถที่ทำปฏิกิริยาทางเคมีต่ำลง ในทางกลับกันหากใช้อุณหภูมิในการเผาต่ำหรือระยะเวลาในการเผาสั้นจะทำให้ปูนสุกที่ได้ได้ผลแบบสุกพอดีคือ มีอัตราการหดตัวน้อย มีช่องว่างภายในของปูนสุกมาก และมีความสามารถที่ทำปฏิกิริยาทางเคมีสูง

R.Hedin (1954) ได้ทำการทดลองเผาตัวอย่างที่เป็นหินปูนชนิดต่างกัน 7 ตัวอย่างมาย่อยให้มีขนาดเท่ากันในช่วง 15 - 20 มิลลิเมตร แล้วทำการเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิกัน  $1000^{\circ}C$  ใน  $100\% CO_2$  ของความดันบรรยากาศ จนกระทั่งเกิดการแยกตัว (Dissociation) อย่างสมบูรณ์แล้ววัดค่า Loss On Ignition (LOI) ที่เกิดขึ้นดังในรูปที่ 2.4 แสดงค่า Loss On Ignition (LOI) ในอัตราของการแยกตัวที่เปลี่ยนแปลงไปพบว่า ตัวอย่างที่ 2 และ 3 เป็นหินปูนที่มีความหนาแน่นสูงและมีผลึกที่หยาบ จะมีอัตราการแยกตัวที่ช้ามาก และตัวอย่างที่ 6 และ 7 มีผลึกที่ละเอียดจะมีอัตราการแยกตัวที่เร็ว ส่วนตัวอย่างที่เร็วที่สุดคือตัวอย่างที่ 5 เป็นหินปูนที่แน่น มีผลึกละเอียดมาก และมีส่วนประกอบเป็นอินทรีย์วัตถุเป็นหลัก ซึ่งจากการทดลองดังกล่าว R. Hedin(1954) ได้อธิบายไว้ว่าหินปูนที่มีผลึกหยาบและมีโครงสร้างของอนุภาคหนาแน่นจะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ถูกปล่อยออกมาได้

ซ้ำ เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่หนาแน่นทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ออกมาได้ยาก ซึ่งการที่จะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ออกมาได้นั้นต้องทำให้ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ภายในของผลึกมีค่าสูงกว่าภายนอกของผลึก จากตัวอย่างที่ 2 ที่เป็นหินปูนที่มีความหนาแน่นมากไม่ได้ถูกเผาให้เป็นรอยแตกภายในเนื้อของหินปูนระหว่างช่วงการอุ่นวัตถุดิบแต่ตัวอย่างที่ 3 ถูกเผาให้เป็นรอยแตกซึ่งรอยแตกดังกล่าวนี้ก่อให้เกิดการสลายตัวมากกว่าตัวอย่างที่ 2 เป็นผลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ผ่านออกมาจากรอยแตกได้และการแยกตัวที่เร็วที่สุดในตัวอย่างที่ 5 เนื่องจากเมื่อผลึกของหินปูนที่มีส่วนประกอบของอินทรีย์วัตถุปนอยู่ได้รับความร้อนจะทำให้เกิดโครงสร้างผลึกที่หลวมๆ และมีรูพรุนเป็นผลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ผ่านออกมาได้ง่าย

ดังนั้นอัตราการแยกตัวจะเกิดขึ้นได้เร็วเมื่อหินปูนที่ใช้เป็นวัตถุดิบต้องมีรูพรุนสูงหรือรอยแตกภายในเนื้อของหินปูนมีปริมาณมากพอจนสามารถที่จะเกิดเป็นช่องให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ผ่านออกมาได้

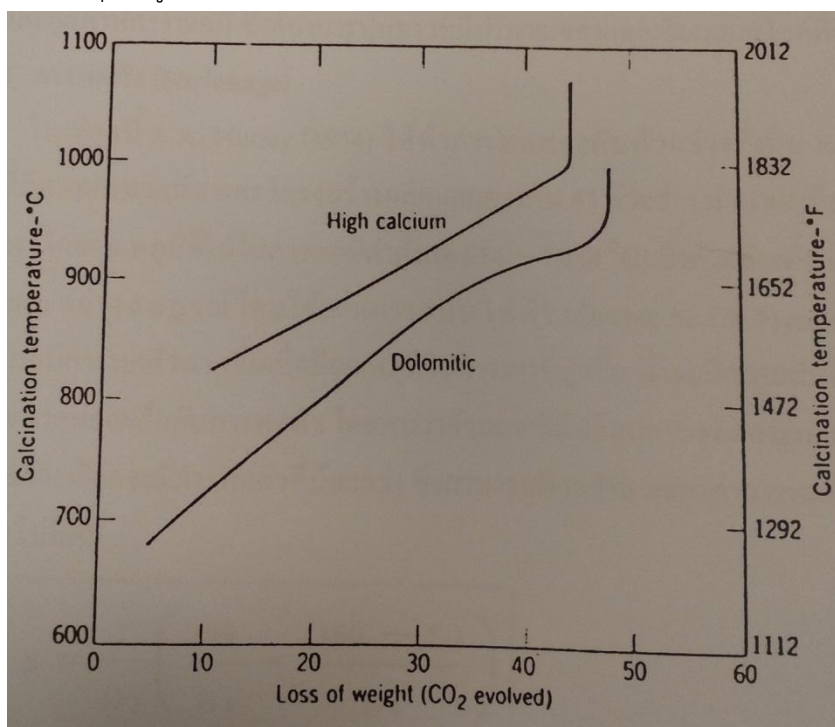


รูปที่ 2.5 แสดงอัตราของการแยกตัวที่เปลี่ยนไปในตัวอย่างที่เป็นหินปูนแต่ละชนิดที่มา; R.Hedin(1954)

#### 2.3.4 น้ำหนักที่หายไป ( Loss On Ignition; LOI )

เมื่อทำการเผาแร่ (Calcite;  $CaCO_3$ ) ที่บริสุทธิ์จะพบว่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไป หรือ Loss On Ignition(LOI)ประมาณร้อยละ 44 ซึ่งเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ที่แยกตัว

ออกมา ส่วนแร่แร่ โดโลไมต์ ( Dolomite;  $CaCO_3 \bullet MgCO_3$  )จะมีค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไป(LOI) ประมาณร้อยละมากกว่าที่ร้อยละ 52.2 โดยรูปที่ 2.6 แสดง Loss On Ignition (LOI) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิในการแยกตัว



รูปที่ 2.6 แสดง Loss On Ignition(LOI)ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิในการแยกตัว  
ที่มา; R.S. Boynton, 1980

H.K. Linzell et al. (1926) ได้กล่าวว่าแม้จะเกิด Calcination อย่างสมบูรณ์แต่ก็จะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) อยู่ในเนื้อปูน แม้ว่าหินปูนถูกเผาจนเป็นปูนสุกที่เรียกว่า สุกแบบสุกมาก (Hard burn) จะมีแกนกลางคงอยู่ในเนื้อของปูนสุก แต่อาจมีพื้นที่ผิวบางส่วนที่ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ได้เป็นเพราะเกิดการ Recarbonation จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) จากการเผาไหม้อยู่มากมายกระจายรอบๆปูนขาวภายในเตापูนขาว ซึ่งถ้าทำให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพ จะทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ที่เกิดจากการเผาไหม้นี้ลดลงและออกมาภายนอกอย่างรวดเร็ว

ปัจจัยที่ทำให้เกิดการ Recarbonation ขึ้นในเตापูนขาวคืออุณหภูมิในการเผาที่สูงเกินไป การกระจายตัวที่ไม่แน่นอนของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้อยู่รอบๆปูนขาวภายในเตาเผาแตกต่างกัน การกระจายตัวของความร้อนในหม้อเย็น (Cooler) ที่ไม่มีประสิทธิภาพที่ดีพอในการระบายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ออกจากเตापูนขาว และระยะเวลาที่นานเกินไปในการทำให้ปูนสุก

เย็นตัวลงเมื่อเกิดการ Recarbonation ขึ้นมากจะทำให้ปูนสุกที่ได้มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ( CaO ) ต่ำลง

### 2.3.5 การหดตัว(Shrinkage)

J.A.Murray(1954) ได้ทำการทดลองกับตัวอย่างที่เป็น High Calcium Limestone ที่มีความหนาแน่น และโครงสร้างที่แตกต่างกัน 43 ตัวอย่าง นำมาเผาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 4 ช่วง (โดยใช้อุณหภูมิในการเผาตั้งแต่ 954-1354 °C) ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดถูกเผาให้เป็น Calcination อย่างสมบูรณ์โดยใช้เตาเผาไฟฟ้าพบว่า ตัวอย่างทั้งหมดเกิดการหดตัวมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งพบว่ามาจากความสัมพันธ์ ระหว่างลักษณะและขนาดของผลึก โดยพบว่าตัวอย่างของผลึก หยาบจะมีการหดตัวสูง ส่วนตัวอย่างที่มีผลึกละเอียดจะมีการหดตัวต่ำกว่า และสามารถคำนวณค่า การหดตัวของปูนสุกได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$S = \frac{1}{D_s} \left( \frac{100}{D_s} - \frac{(100-L)}{D_L} \right)$$

โดยที่ S = Shrinkage

$D_s$  = Bulk Density of Limestone

$D_L$  = Bulk density of Quicklime

L = Loss on Ignition

การหดตัวและการขยายตัวจะขึ้นอยู่กับขนาดของผลึกและอุณหภูมิในการแยกตัวของหินปูน ที่นำมาใช้ซึ่งอุณหภูมิในการเผาจะเป็นปัจจัยสำคัญต่อหินปูนที่มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นสูง มากกว่าหินปูนที่มีผลึกขนาดเล็กและมีรูพรุนสูงเป็นเพราะการเกิดรอยแตกในหินปูนที่มีขนาดใหญ่เมื่อเกิดการขยายตัวจากการ Calcination แล้ว รอยแตกดังกล่าวจะไม่ถูกปิด

### 2.3.6 ความพรุนตัว(Porosity) และความหนาแน่น (Density)

ปัจจัยของความพรุนตัวและความหนาแน่น และการกระจายตัวของขนาดรูพรุนจะมี ความสัมพันธ์กับความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาและการกระจายตัวของขนาดและพื้นผิวของปูนขาว ซึ่งพบว่าปูนขาวที่มีรูพรุนจะมีการหดตัวน้อย ส่วนปูนขาวที่มีรูพรุนสูงจะเกิดการหดตัวมาก

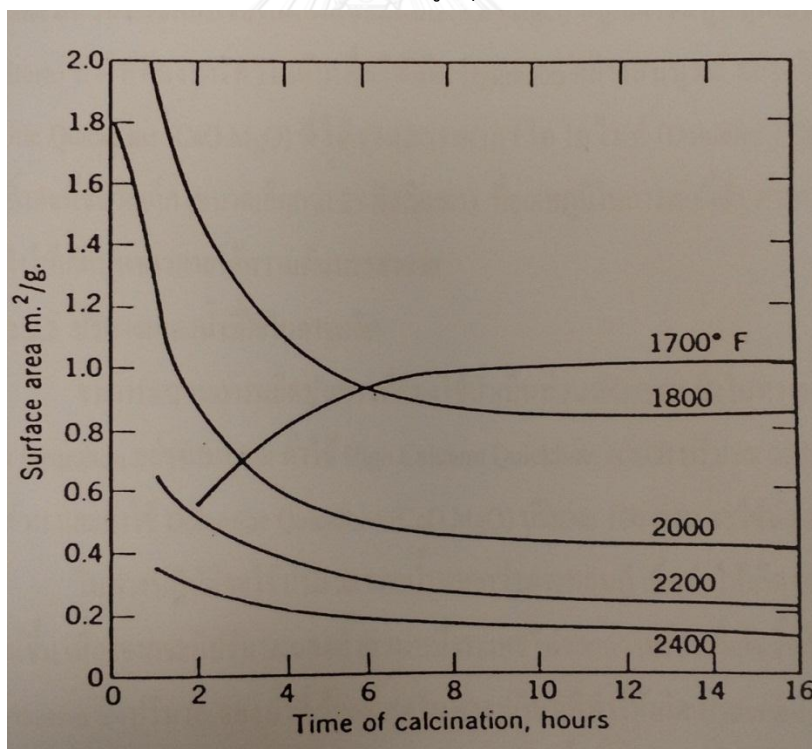
การทดลองของ J.A.Murry (1956) โดยการนำตัวอย่างที่เป็นแร่แคลไซต์มาเผาที่อุณหภูมิสูง และระยะเวลาในการเผาแตกต่างกัน พบว่าระยะเวลาในการเผาเพียง 1 - 4 ชั่วโมงจะมีผลน้อยมาก กับค่าความพรุนที่พื้นผิว หรือความสามารถที่จะทำปฏิกิริยาในการเผา ที่อุณหภูมิ 954 °C - 1,066 °C นอกจากนี้ถ้าปูนสุกสองขนาดมีความพรุนตัวที่เหมือนกันแต่รูพรุนของหินปูนชนิดแรกมีความพรุน



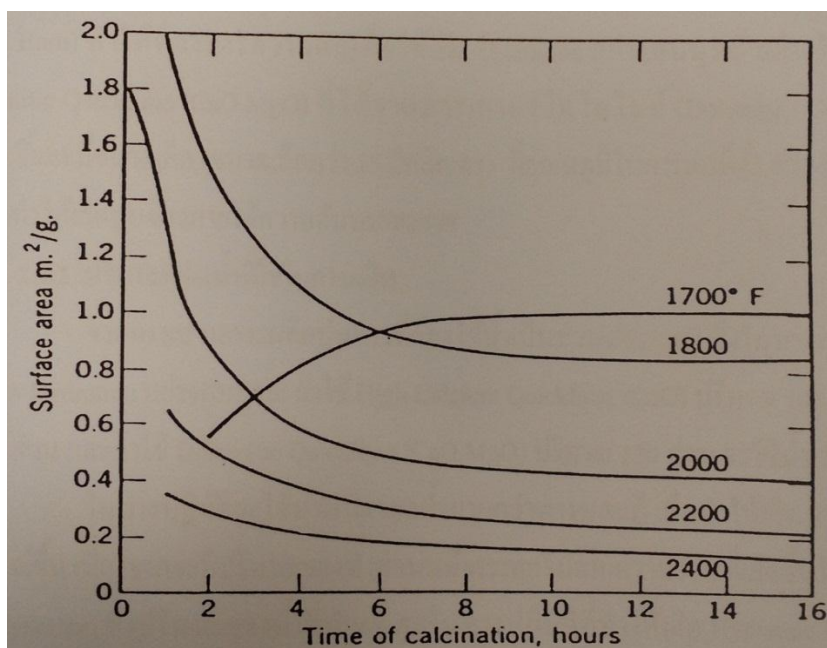
ตัวเฉลี่ย  $1,000^{\circ}A$  และปูนสุกอีกชนิดมีขนาดของรูพรุน  $40^{\circ}A$  จะพบว่าพื้นที่ผิวภายในของปูนสุกชนิดแรกจะมีพื้นที่ผิวภายในมากกว่าเพียงร้อยละ 4 การหดตัวและความหนาแน่นมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อขนาดโมเลกุลของแคลเซียมออกไซด์(CaO) มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกับการแยกตัว โดย R.Hedin(1961) ได้ทำการทดลองเผาแร่แคลไซต์ พบว่าอุณหภูมิที่เริ่มแยกตัวอยู่ที่  $900^{\circ}C$  พบว่าขนาดของผลึกมีขนาดประมาณ  $0.1 \mu m$  และที่อุณหภูมิ  $1,000^{\circ}C$  ขนาดของผลึกเป็น  $1 \mu m$  และจะเริ่มเชื่อมติดกันที่อุณหภูมิ  $1,100^{\circ}C$  เนื่องจากเกิดพันธะที่แข็งแรงระหว่างผลึกเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

ความถ่วงจำเพาะที่แท้จริงของแคลเซียมออกไซด์มีค่าเท่ากับ 3.34 - 3.40 ซึ่งเป็นค่าในทางทฤษฎีของปูนสุกบริสุทธิ์ที่ถูกเผาอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเกิดการหดตัวที่พอเหมาะและไม่เกิดรูพรุนเกิดขึ้น ส่งผลให้ปูนดังกล่าวไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีต่อไปได้ และค่าความถ่วงจำเพาะจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.45 - 1.65 ทำให้เกิดความพรุนตัวร้อยละ 50 (V.J.Azbe,1939)

โดยรูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของปูนสุกที่ได้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตปูน และรูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของปูนสุกและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาหินปูน



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของปูนสุกที่ได้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตปูน ที่มา J.A.Murray(1956)



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของปูนสุกและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาหินปูน  
ที่มา J.A.Murray(1956)

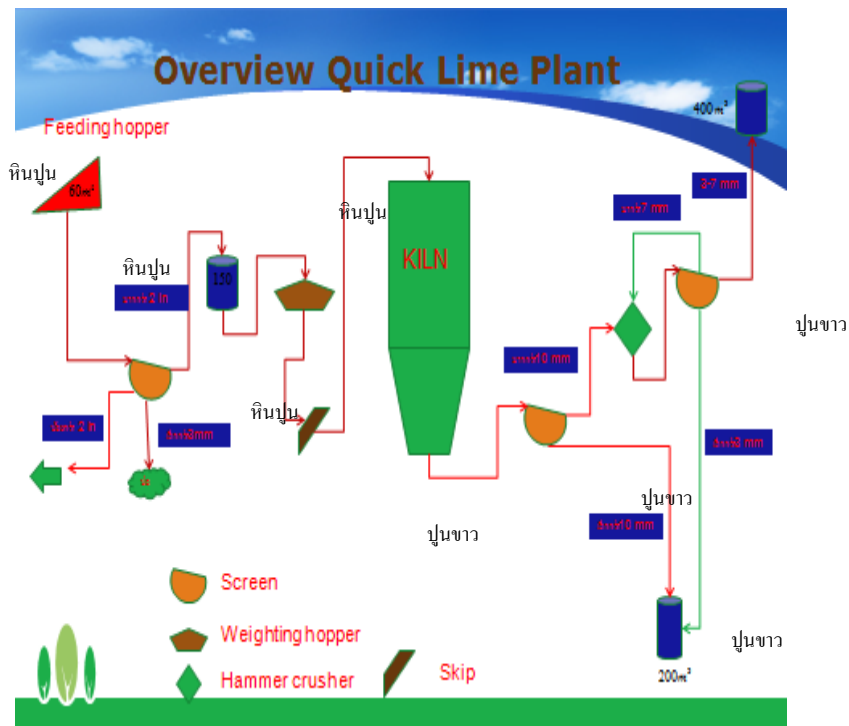
## 2.4 การผลิตปูนขาวในอุตสาหกรรม

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตคือ หินปูน (Limestone) ซึ่งได้จากการระเบิดหินจากภูเขาหินปูน แต่หินปูนที่ได้ยังมีขนาดใหญ่ จึงต้องนำมาลดขนาดโดยเครื่องย่อย (Crusher) เพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตขั้นต่อไป วัตถุดิบอื่นคือ ดินดาน (Shale) และวัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ (Corrective Materials) ซึ่งใช้เฉพาะบางตัว เพื่อให้ได้ส่วนประกอบทางเคมีตามค่ามาตรฐานที่กำหนด วัตถุดิบอื่นเหล่านี้ก็ต้องผ่านเครื่องย่อยเพื่อลดขนาดให้เหมาะสมเช่นกัน วัตถุดิบที่ผ่านการย่อยแล้วจะถูกนำมาเก็บไว้ที่กองเก็บวัตถุดิบ (Storage Yard) จากนั้นก็จะลำเลียงไปยังหม้อบดวัตถุดิบ (Raw Mill) ต่อไป

หม้อบดวัตถุดิบ (Raw Mill) มีหน้าที่บดหินปูน ดินดาน และวัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ ให้เป็นผงละเอียดซึ่งเรียกว่า วัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal) การควบคุมอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่หม้อบดวัตถุดิบมีความสำคัญ เนื่องจากอัตราส่วนของวัตถุดิบที่เหมาะสมจะทำให้ วัตถุดิบสำเร็จมีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมกับการเผา

หลังจากผ่านกระบวนการบดแล้ว จึงส่งวัตถุดิบสำเร็จไปยังยังผสมวัตถุดิบสำเร็จ เพื่อเก็บและผสมวัตถุดิบสำเร็จให้เป็นเนื้อเดียวกัน ก่อนส่งไปเผาในหม้อเผาแบบตั้ง กระบวนการเผาช่วงแรกเป็น ชุดเพิ่มความร้อน (Preheater) จะค่อยๆ เพิ่มความร้อนให้แก่วัตถุดิบสำเร็จ แล้วส่งวัตถุดิบสำเร็จไปเผาในหม้อเผา ซึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงประมาณ  $1,200^{\circ}\text{C}$  -

1,400 °C จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีตามลำดับ จนในที่สุดกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker) จากนั้นทำให้ปูนเม็ดเย็นลง แล้วจึงลำเลียงปูนเม็ดไปเก็บไว้ที่ถังเก็บเพื่อรอการบดปูนเม็ดต่อไป สำหรับการบดปูนเม็ดให้กลายเป็นปูนขาว



รูปที่ 2.9 แสดงภาพ Over view process for Quicklime

## 2.5 การนำปูนขาวไปใช้ประโยชน์

ปูนขาวสามารถนำมาใช้ในงานได้หลายประเภทเช่นในอุตสาหกรรมการเกษตร อุตสาหกรรมน้ำตาลและอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น โดยจะพิจารณาจำแนกประเภทตามการใช้งานออกเป็นลักษณะต่างๆดังนี้

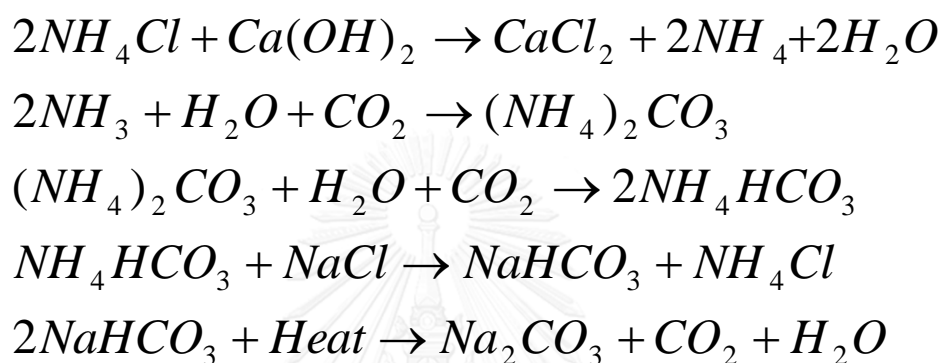
### 1) อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า

ปูนขาวถูกนำมาใช้เป็นฟลักซ์ในการหลอม และการแยกเหล็กออกจากแร่เหล็ก โดยปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับซิลิกา ( $SiO_2$ ) และอลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ที่เป็นสิ่งเจือปนในแร่เหล็กและกลายเป็นกากแร่ที่หลอมลอยอยู่ด้านบนของส่วนที่หลอมละลาย ดังนั้นปูนขาวที่ใช้ในอุตสาหกรรมนี้จะต้องมีความบริสุทธิ์สูงและมีปริมาณซิลเฟอร์และฟอสฟอรัสต่ำ

นอกจากนี้ปูนขาวยังใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กกล้าเพื่อใช้แยกซิลิกา ( $SiO_2$ ) และฟอสฟอรัส ออกจากเหล็กที่ได้ถลุงแล้ว ซึ่งจะมีมาตรฐานคือมีความเจือปนของซิลเฟอร์ได้ไม่เกินร้อยละ 0.1 และซิลิกาไม่เกินร้อยละ 5

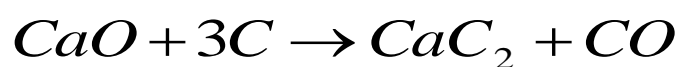
## 2) อุตสาหกรรมเคมี

(1) การผลิตโซดาแอช (Sodium Carbonate:  $Na_2CO_3$ ) เป็นวัตถุดิบอย่างหนึ่งสำหรับ อุตสาหกรรมเคมี ซึ่งผลิตโดยกระบวนการ Solvay มีขั้นตอนดังนี้คือ



จะพบว่าการผลิตในกระบวนการ Solvay ใช้ปูนขาวประมาณ 610 กิโลกรัม เพื่อผลิตโซดาแอช Sodium Carbonate:  $Na_2CO_3$ ) 1 ตัน

(2) การผลิตคาร์ไบด์ (Carbide) โดยแคลเซียมคาร์ไบด์ ( Calcium Carbide;  $CaC_2$ ) เป็น วัตถุดิบสำคัญในการผลิตก๊าซอะเซทิลีนซึ่งเกิดจากการผสมปูนสุกกับถ่านโค้กแล้วนำไปเผาที่เตาเผา ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 2000 °C โดยมีปฏิกิริยาดังสมการ



## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยในการผลิตปูนขาวพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตปูนขาวแบ่งออกได้ เป็น 2 ส่วนที่นำมาพิจารณาคือปัจจัยจากหินปูนที่ทางผู้วิจัยสนใจและนำมาศึกษา และปัจจัยในด้าน ของอุณหภูมิที่ใช้ทำการผลิต

### 2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตปูนขาวจากปัจจัยของหินปูน

จากการศึกษางานวิจัยพบว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตปูนขาวจากปัจจัยของหินปูนประกอบไปด้วย

### 2.6.1.1 ปัจจัยด้านรัศมีของรูพรุนของหินปูน

โดยงานวิจัยของ Antonia[17] พบว่าหินปูนที่นำมาศึกษามีสองแหล่งคือจากแหล่ง Sises และ แหล่ง latzima พบว่าหินปูนของแหล่ง Sises มีขนาดความกว้างของรูพรุนของหินปูนเฉลี่ยมากกว่าอยู่ที่ขนาดรัศมี  $0.14 \mu\text{m}$ . พบว่าที่อุณหภูมิในการเผา  $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$  มีเปอร์เซ็นต์การเกิดปูนขาวมากกว่า หินปูนของแหล่ง latzima ซึ่งมีรัศมีของรูพรุนของหินปูนเฉลี่ยอยู่ที่  $0.01 \mu\text{m}$

นอกจากนี้ จากการศึกษาของ KemperLJ [26] ได้ทำการทดลองเผาหินปูนที่ขนาดรูพรุน  $40 \mu\text{m}$ ,  $63 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$  พบว่าที่ขนาดความพรุนตัวเฉลี่ยของอนุภาคหินปูนที่มีค่ามากจะทำให้หินปูนเปลี่ยนสภาพเป็นปูนขาวได้เร็วขึ้น

### 2.6.1.2 ปัจจัยด้านขนาดของหินปูน

จากงานวิจัยของ Azbe [19] พบว่าขนาดของหินปูนมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนสภาพหินปูนเป็นปูนขาว โดยหินปูนที่ทางผู้วิจัยสรุปผลพบว่าหินปูนที่มีขนาดตั้งแต่ 6 นิ้วขึ้นไปจะเปลี่ยนสภาพการเป็นปูนขาวได้ยาก โดยต้องใช้อุณหภูมิในการเผาสูงถึง  $2300\text{-}2450 \text{ }^{\circ}\text{F}$

นอกจากนี้จากงานวิจัยของ J. Wuhler [20] พบว่า ในการเผาหินปูน ยังมีปริมาณของหินปูนขนาดเล็กเข้าสู่เตาเผาในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลให้การเผาปูนขาวที่ได้มีคุณภาพที่ตกเกรดค่า CaO มากขึ้นเนื่องจากหินปูนขนาดเล็กจะส่งผลให้เกิดช่องว่างในการเรียงตัวของหินปูนในเตาเผาที่ลดลงมากกว่าหินปูนขนาดใหญ่ทำให้การเคลื่อนที่ผ่านของก๊าซร้อนในเตาเผาเคลื่อนที่ได้ยากมากขึ้นและทำให้ปูนในเตาเผาบางส่วนเกิดการหลอมและบางส่วนเกิดการเผาไม่สุก และจากบทความของ Mohamad[25] พบว่าหินปูนยังมีขนาดใหญ่( ตั้งแต่ 4 นิ้วขึ้นไป) จะต้องใช้อุณหภูมิในการเผาที่สูงกว่า  $1,100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ในการผลิตปูนขาว

### 2.6.1.3 ปัจจัยด้านความพรุนตัวของหินปูน

จากการศึกษาของงานวิจัยของ Murray[21] โดยทำการทดลองเผาหินปูนในเตาเผาโดยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  พบว่าที่อุณหภูมิในการทดลองในช่วง  $954 \text{ }^{\circ}\text{C} - 1,066 \text{ }^{\circ}\text{C}$  พบว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าวการหดตัวของปูนขาวจากผลของความพรุนตัวมีค่าน้อยมากและจากงานวิจัยของ Ghosh A.[27] พบว่า หินปูนบริสุทธิ์(มีค่าสารประกอบ CaO มากกว่า 95% ขึ้นไป)เมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิสูงเกิน  $1,200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ขึ้นไป และที่ค่าความพรุนตัวของอนุภาคปูนขาวที่นำมาเผามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่  $50 \mu\text{m}$  ขึ้นไป จะเกิดการหดตัวของอนุภาคปูนขาวเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น แต่หากหินปูนที่นำมาใช้ทดลองมีสารปนเปื้อนเช่น CuO เป็นองค์ประกอบในเนื้อหินปูนตั้งแต่ 1 %CuO ขึ้นไปจะทำให้การหดตัวของปูนขาวคงที่แม้จะมีการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้น เช่นเดียวกันการศึกษาของ Cundall[5] ที่พบว่าขนาดของความพรุนตัวของหินปูนส่งผลต่อการผลิตปูนขาวโดยหากปูนขาวมีค่าความพรุนตัวที่

สูงจะส่งผลให้ปูนขาวสามารถเปลี่ยนสภาพสารประกอบ  $\text{CaCO}_3$  เป็นสารประกอบ  $\text{CaO}$  ได้เร็วกว่าที่ค่าความพรุนตัวของหินปูนต่ำ

#### 2.6.1.4 ปัจจัยด้านความบริสุทธิ์ของปูนขาว

จากการศึกษาของ Boynton, R.S.[5] พบว่าหินปูนที่มีค่าความเป็นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ต่ำกว่า 50% ลงไป เมื่อนำไปทำการผลิตปูนขาวพบว่าจะให้ผลของการเกิดของสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ที่ต่ำตามไปด้วยซึ่งให้ผลสอดคล้องกับบทความของ Mohamad[25] ซึ่งพบว่าเมื่อหินปูนที่ถูกนำมาใช้ผลิตปูนขาวมีสารประกอบอื่นๆ เช่น  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Mn, S และอื่นๆ เป็นองค์ประกอบรวมกันในปริมาณมากจะส่งผลให้ปูนขาวที่ผลิตได้มีค่าความบริสุทธิ์หรือเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ต่ำลง เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Hepworth[29]

#### 2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตปูนขาวจากปัจจัยของอุณหภูมิ

##### 2.6.2.1 ปัจจัยของอุณหภูมิที่มีผลต่อการปฏิบัติการแคลซิเนชัน

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการผลิตปูนขาวพบว่า ที่ขนาดของรูปร่างของหินปูนที่ใกล้เคียงกันพบว่าที่อุณหภูมิยังมีค่าเพิ่มสูงขึ้นก็จะทำให้หินปูนสามารถเกิดปฏิบัติการแคลซิเนชันได้เพิ่มมากขึ้น โดยจากการศึกษาของ Antonia[17] พบว่าที่อุณหภูมิในการทดลองยิ่งเพิ่มสูงขึ้นที่  $1,200\text{ }^\circ\text{C}$  พบว่าหินปูนสามารถเปลี่ยนสภาพเป็น ปูนขาวได้เพิ่มมากขึ้นมากกว่าที่อุณหภูมิ  $900\text{ }^\circ\text{C}$  นอกจากนี้จากการศึกษาของ S. Dash[22] พบว่ายิ่งเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิบัติการแคลซิเนชันมากขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่ง (อุณหภูมิของผู้ทำการศึกษา อยู่ที่อุณหภูมิ  $900\text{ }^\circ\text{C}$ ) ก็จะไม่ส่งผลให้หินปูนเปลี่ยนสภาพเป็นปูนขาวได้เพิ่มมากขึ้นโดยพิจารณาจากปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก ซึ่งการศึกษาดังกล่าวก็ให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาของ Yanqing Zhu[24] ซึ่งพบอีกว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาปูนขาวให้มีค่าสูงขึ้นกลับส่งผลให้ปริมาณการเกิด  $\text{CaO}$  ลดลงเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น อนุภาคพรุนของปูนขาวจะหดตัวลงมากขึ้นทำให้ปูนขาวเกิดการหลอมแสดงให้ทราบว่าเกิดปฏิบัติการรีคาร์บอเนชัน ( Re-Carbonated ) เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของปูนขาวเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาปูนขาวให้มากขึ้น

##### 2.6.2.2 ปัจจัยของอุณหภูมิที่มีผลต่อการรีคาร์บอเนชัน ( Recarbonation)

จากงานวิจัยของ J.-M. Commandr'e\*[18] พบว่ายิ่งเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิบัติการในการแคลซิเนชันให้กับหินปูนที่มากกว่า  $1050\text{ }^\circ\text{C}$  ในเตาเผา เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Cundall[5] และการศึกษาของ Yanqing Zhu[24] พบว่าค่าความพรุนตัวของหินปูนจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปูนขาวดังกล่าวเริ่มเกิดการ Overburnt เนื่องจากรูพรุนของหินปูนเริ่มเกิดการหลอมและส่งผลให้หินปูนส่วนในปูนขาวไม่เกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นปูนขาว และ

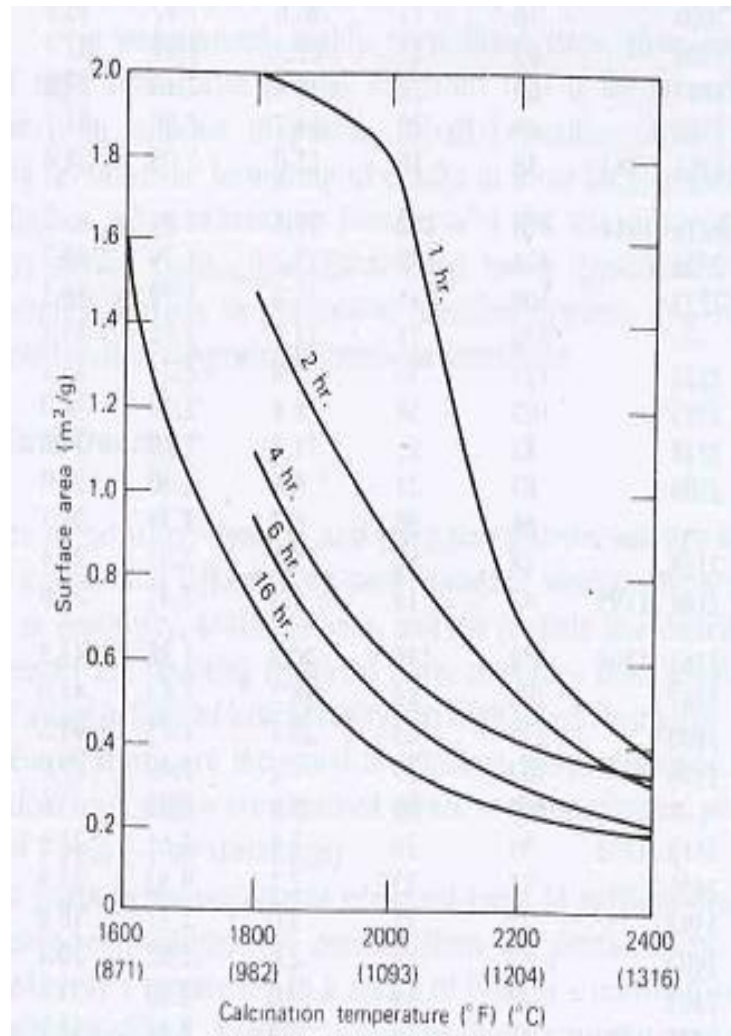
จากการศึกษาของ Antonia[17] พบว่ายิ่งทำการเผาปูนขาวที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับน้ำของปูนขาวกลับยังมีค่าลดต่ำลงแสดงให้เห็นว่าปูนขาวเกิดการเกิดปฏิกิริยาการรีคาร์บอนเนชั่น

### 2.6.2.3 ปัจจัยของอุณหภูมิที่มีผลต่อการสภาพความพรุนตัวของหินปูน

การทดลองของ J.A.Murray[23] โดยการนำตัวอย่างที่เป็นแร่แคลไซต์มาเผาที่อุณหภูมิสูงและระยะเวลาในการเผาแตกต่างกัน พบว่าระยะเวลาในการเผาเพียง 1-4 ชั่วโมงจะมีผลน้อยมากกับค่าความพรุนที่พื้นผิว หรือความสามารถที่จะทำปฏิกิริยาในการเผา ที่อุณหภูมิ  $954^{\circ}\text{C}$  -  $1,066^{\circ}\text{C}$  นอกจากนี้ถ้าปูนสุกสองขนาดมีความพรุนตัวที่เหมือนกันแต่รูพรุนของหินปูนชนิดแรกมีความพรุนตัวเฉลี่ย  $1,000^{\circ}\text{A}$  และปูนสุกอีกชนิดมีขนาดของรูพรุน  $40^{\circ}\text{A}$  จะพบว่าพื้นที่ผิวภายในของปูนสุกชนิดแรกจะมีพื้นที่ผิวภายในมากกว่าเพียงร้อยละ 4 การหดตัวและความหนาแน่นมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อขนาดโมเลกุลของแคลเซียมออกไซด์(CaO) มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกับการแยกตัว

### 2.6.2.4 ปัจจัยของอุณหภูมิที่มีผลต่อพื้นผิวของปูนขาว

จากงานศึกษาของ J.A.Murray[23] ดังกราฟรูปที่ 10 พบว่าที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นและที่ระยะเวลาในการเผามากขึ้นพบว่าพื้นผิวของปูนขาวที่ถูกเผาแล้วจะเกิดการหดตัวลงแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นที่ระยะเวลาในการเผานานขึ้นจะส่งผลให้พื้นผิวของปูนขาวเกิดการหลอมตัวลงซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ghoneim [28] ที่พบว่าอนุภาคบริเวณผิวหน้าของปูนขาวจะเกิดเกร็ดตัวลงเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวของปูนสุกที่ได้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตปูน  
ที่มาจาก J.A.Murray(1956 )



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัยและแผนการดำเนินงาน

##### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. หินปูนขนาดความกว้างและความหนาอยู่ในช่วง 1 - 2 นิ้ว แต่เปลี่ยนขนาดความยาวของหินปูน ตั้งแต่ 2 - 6 นิ้ว
2. เตาเผาขนาดทำอุณหภูมิสูงสุดได้ 1,200 °C
3. เครื่อง X-Ray Fluorescence spectrometer ( XRF )

##### 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนการทดลองดังนี้

ส่วนที่ 1 : เป็นการทดลองที่ทำการทดลองเพื่อหาช่วงของอุณหภูมิที่ทำให้หินคล้ำสีเหลืองผืนผ้า (หินแผ่น) ช่วง 2 - 6 นิ้วเปลี่ยนเป็นร้อยละ 90 ของ CaO

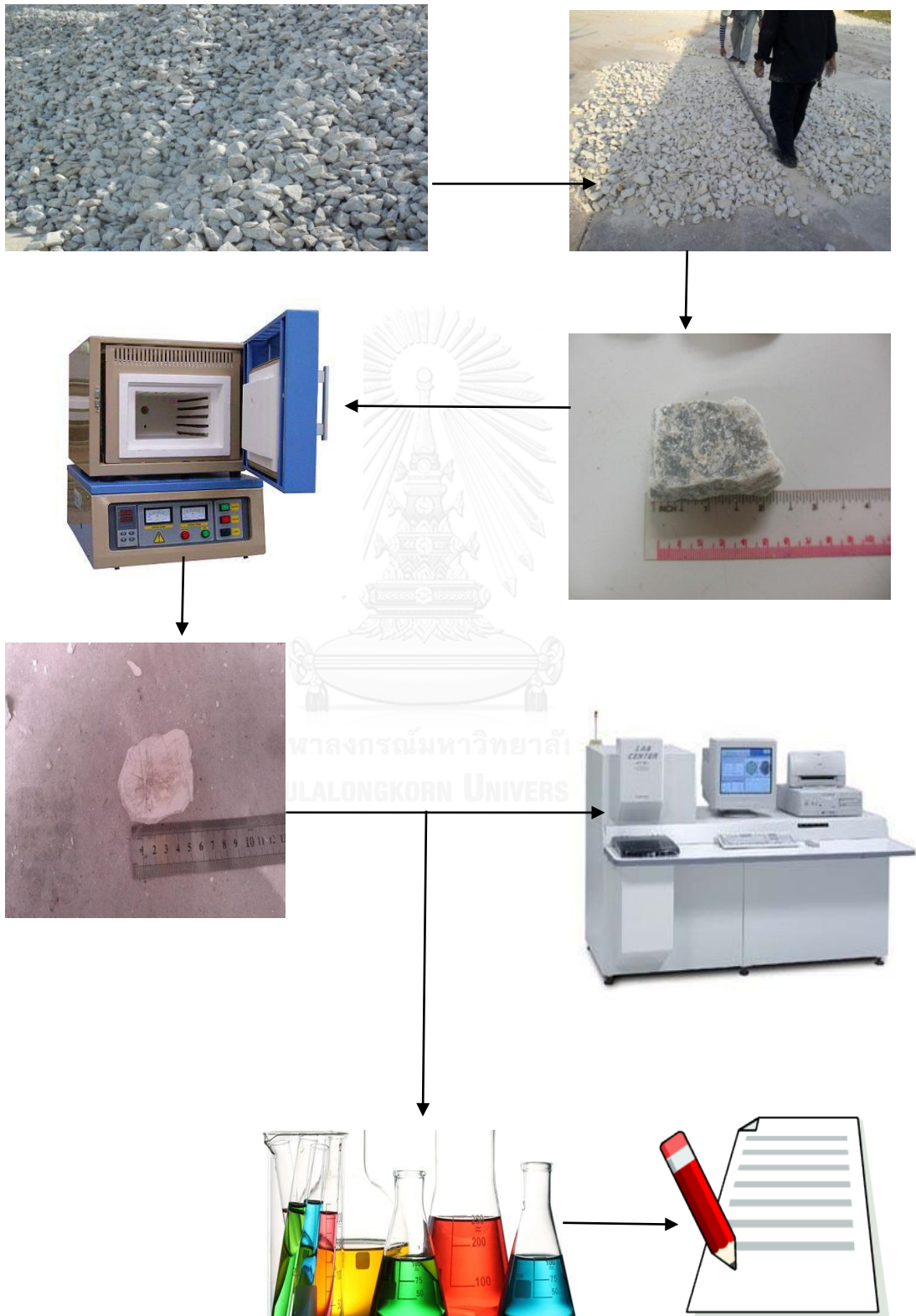
1. ทำการสุ่มตัดหินปูนจำนวน 3 ตักรถแบ็คโฮ ใส่รถบรรทุกและชั่งน้ำหนัก
2. ทำการคัดขนาดหินแต่ละ Size และจัดบันทึกจำนวนก้อนและสีทางกายภาพของหินปูนที่พบจากการสุ่มตัดหินปูนจากลานหิน แยกตามขนาดความยาว
3. คัดขนาดของหินปูนตามที่กำหนด โดยเลือกรูปทรงที่คล้ำสีเหลืองผืนผ้า ขนาดยาว 2 นิ้ว 3 นิ้ว 4 นิ้ว 5 นิ้ว และ 6 นิ้ว โดยคัดเลือกมาอย่างละ 16 ก้อน นำหินดังกล่าวบันทึกภาพ ชั่งน้ำหนักและนำหินที่จะใช้ทดลองมาทำความสะอาด
4. แบ่งหินปูนส่วนหนึ่งนำมาหาค่าองค์ประกอบทางเคมีของหินปูนก่อนเผาโดยใช้เครื่อง XRF วิเคราะห์
5. นำหินแต่ละ SIZE เรียงใส่ถาดเดียวกันดังนั้นใน 1 ถาดจะประกอบด้วยหินแผ่นขนาด 2 - 6 นิ้ว นำเข้าเตาอบที่ตั้งอุณหภูมิทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 850 °C ปิดเตาและตั้งเวลาให้หินปูนอยู่ในเตาเผา 3 ชั่วโมง (อ้างอิงจากระยะเวลาที่หินปูนอยู่ในช่วง Heating Zone ของเตาเผาแนวตั้ง) และปล่อยให้เย็นตัวในเตาเผาจนถึงอุณหภูมิห้องและนำออกจากเตาเผา

6. นำปูนขาวจากข้อ 5 มาทำให้ละเอียดและ แบ่งปริมาณปูนขาวส่วนหนึ่งเข้าวิเคราะห์หาองค์ประกอบปูนขาวโดยใช้เครื่อง XRF และนำอีกส่วนหนึ่งวิเคราะห์ค่าทางเคมีคือ ค่า %LOI, CaO และ  $CaCO_3$  และบันทึกผลการทดลอง
7. ทำการทดลองซ้ำแบบเดียวกันกับการทดลองในข้อที่ 5 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิการทดลองเป็น  $850^{\circ}C$ ,  $900^{\circ}C$ ,  $950^{\circ}C$ ,  $1,000^{\circ}C$  และ  $1,050^{\circ}C$  โดยทำการทดลองซ้ำที่อุณหภูมิละ 3 การทดลอง

ส่วนที่ 2 : เป็นการทดลองที่ทำการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิเฉลี่ยที่ทำให้หินคล้าย  
สีเหลี่ยมผืนผ้า(หินแผ่น)ช่วง 2 - 6 นิ้วเปลี่ยนเป็นร้อยละ 90 ของ CaO และค่าร้อยละการ  
เกิดกาดตะกอนแข็ง(Grit)ต่ำกว่าร้อยละ 8

ทำการทดลองเหมือนช่วงการทดลองตั้งแต่ข้อที่ 1 - 7 แต่ในข้อที่ 7 ให้เปลี่ยนอุณหภูมิ ที่ทำการเผา  
หินปูนในการทดลองเป็น  $1,010^{\circ}C$ ,  $1,020^{\circ}C$ ,  $1,030^{\circ}C$ ,  $1,040^{\circ}C$  และ  $1,050^{\circ}C$

3.1แสดง Flow Chartแสดง วิธีการทดลอง



แสดงตารางจำนวนหินปูนที่แต่ละอุณหภูมิ

ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนหินปูนที่ต้องเก็บมาทดลองของส่วนการทดลองที่ 1

อุณหภูมิ (°C)	หินปูน(ก้อน)				
	2 นิ้ว	3 นิ้ว	4 นิ้ว	5 นิ้ว	6 นิ้ว
850	3	3	3	3	3
900	3	3	3	3	3
950	3	3	3	3	3
1000	3	3	3	3	3
1050	3	3	3	3	3
รวมจำนวน หินปูน	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>

ตารางที่ 3.2 แสดงจำนวนหินปูนที่ต้องเก็บมาทดลองของ ส่วนการทดลองที่2

อุณหภูมิ (°C)	หินปูน(ก้อน)				
	2 นิ้ว	3 นิ้ว	4 นิ้ว	5 นิ้ว	6 นิ้ว
1000	6	6	6	6	6
1010	6	6	6	6	6
1020	6	6	6	6	6
1030	6	6	6	6	6
1040	6	6	6	6	6
1050	6	6	6	6	6
รวมจำนวน หินปูน	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>

ตารางที่3.3 แสดงแผนการ วิเคราะห์ตัวแปรของการทดลองส่วนที่ 1

พารามิเตอร์	ตัวอย่างการทดลอง		
	ก่อนทำการ เผา	หลังทำการ เผา	ความถี่ในการวิเคราะห์
1.%CaO	x	x	ทุกตัวอย่างการทดลอง
2.%MgO	x	x	ทุกตัวอย่างการทดลอง
3 % <i>CaCO</i> <sub>3</sub>	x	x	ทุกตัวอย่างการทดลอง

ตารางที่3.4 แสดงแผนการ วิเคราะห์ตัวแปรของการทดลองส่วนที่ 2

พารามิเตอร์	ตัวอย่างการทดลอง		
	ก่อนทำการ เผา	หลังทำการ เผา	ความถี่ในการ วิเคราะห์
1.%CaO	x	x	ทุกตัวอย่างการ ทดลอง
2.%MgO	x	x	ทุกตัวอย่างการ ทดลอง
3. % <i>CaCO</i> <sub>3</sub>	x	x	ทุกตัวอย่างการ ทดลอง
4.%Colour B		x	ทุกตัวอย่างการ ทดลอง
5.% Colour Y		x	ทุกตัวอย่างการ ทดลอง
6.%grit		x	ทุกตัวอย่างการ ทดลอง

## บทที่ 4

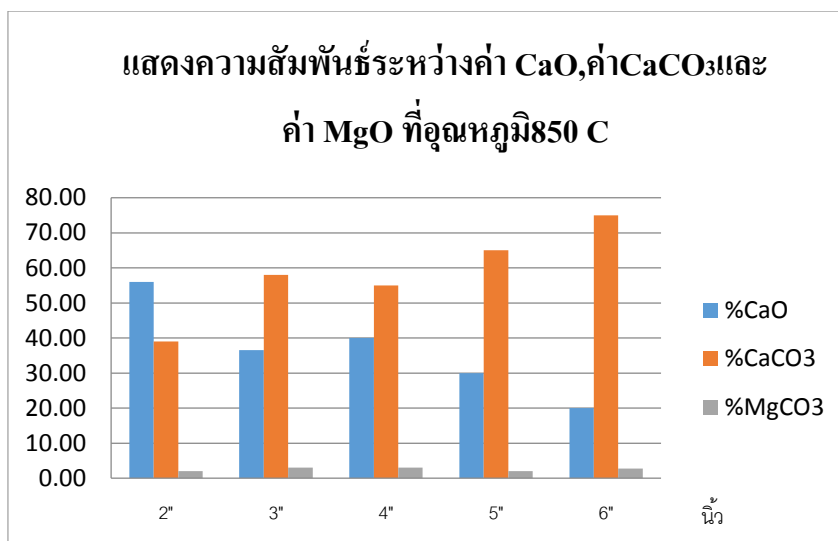
### ผลการทดลอง

เนื่องจากงานวิจัยดังกล่าวแบ่งส่วนการทดลองออกเป็น 2 ส่วนการทดลองโดยส่วนการทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาหาผลของอุณหภูมิที่อุณหภูมิที่  $850^{\circ}\text{C}$ ,  $900^{\circ}\text{C}$ ,  $950^{\circ}\text{C}$ ,  $1,000^{\circ}\text{C}$ ,  $1,050^{\circ}\text{C}$  เพื่อพิจารณาถึงช่วงของอุณหภูมิที่ผลต่อการผลิตปูนขาวให้ได้ค่า CaO ตั้งแต่ร้อยละ 90 ขึ้นไป โดยวิเคราะห์ตัวแปรขั้นต้นคือค่าของร้อยละของ CaO (% CaO), ค่าร้อยละ  $\text{CaCO}_3$  (%  $\text{CaCO}_3$ ), และค่าร้อยละ LOI (% LOI) และส่วนการทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาอุณหภูมิในการเผาหินปูนที่อุณหภูมิ  $1,010^{\circ}\text{C}$ ,  $1,020^{\circ}\text{C}$ ,  $1,030^{\circ}\text{C}$ ,  $1,040^{\circ}\text{C}$ ,  $1,050^{\circ}\text{C}$  เพื่อพิจารณาหาอุณหภูมิเฉลี่ยที่ส่งผลต่อการผลิตปูนขาว โดยผลที่พิจารณาประกอบด้วย %CaO, %  $\text{MgO}$ , %  $\text{CaCO}_3$ , % LOI, % Colour B, %Colour Y, %grit

#### 4.1 ผลการทดลองส่วนที่ 1

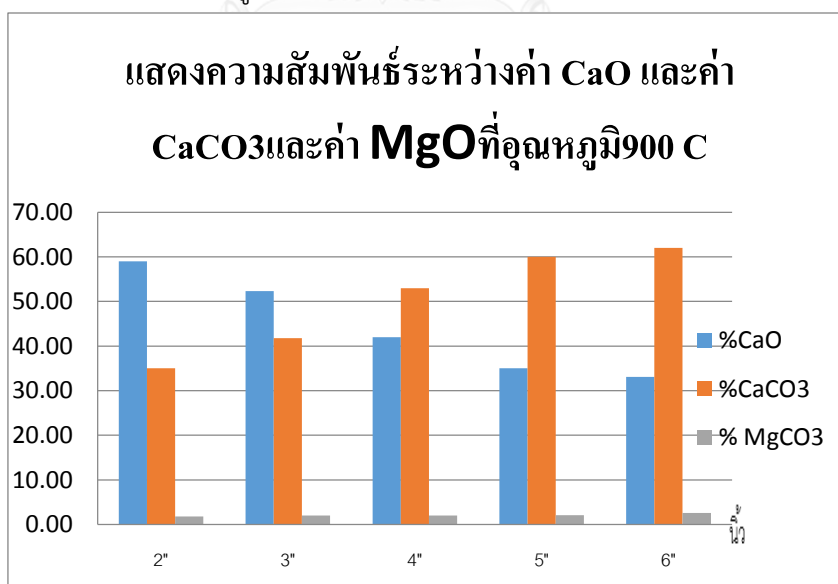
##### 4.1.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่า CaO และค่า $\text{CaCO}_3$

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อนำหินปูนรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมผืนผ้ามาทำการเผาที่อุณหภูมิ ตั้งแต่  $850^{\circ}\text{C}$ ,  $900^{\circ}\text{C}$ ,  $950^{\circ}\text{C}$ ,  $1,000^{\circ}\text{C}$ ,  $1,050^{\circ}\text{C}$  ได้ผลการทดลองดังกราฟแสดงผลการทดลอง จากรูปที่ 1 พบว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้นศึกษาที่อุณหภูมิ  $850^{\circ}\text{C}$  หินปูนขนาดตั้งแต่ 2 - 6 นิ้ว เริ่มเกิดการแตกตัวเปลี่ยนแปลงสภาพจากสารประกอบ  $\text{CaCO}_3$  ไปเป็นสารประกอบ CaO โดยหินปูนขนาด 2 นิ้ว เกิดสภาพการแตกตัวเปลี่ยนแปลงสภาพสารประกอบจากค่า  $\text{CaCO}_3$  ไปเป็นสารประกอบ CaO มากที่สุดที่ร้อยละ 56 ของ CaO ดังรูปที่ 5 แต่เป็นที่น่าสังเกตที่อุณหภูมิ  $850^{\circ}\text{C}$  ไม่พบหินปูนทุกขนาดที่ศึกษาสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบ CaO ได้ร้อยละ 90 และนอกจากนี้ยังพบอีกว่าที่อุณหภูมิดังกล่าวหินปูนขนาด 6 นิ้ว มีสภาพการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของหินปูนจากสารประกอบ  $\text{CaCO}_3$  ไปเป็นสารประกอบ CaO ต่ำที่สุดที่ค่าร้อยละ 20 ของ CaO



รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO,ค่าCaCO<sub>3</sub> และค่า MgOที่อุณหภูมิ 850 °C

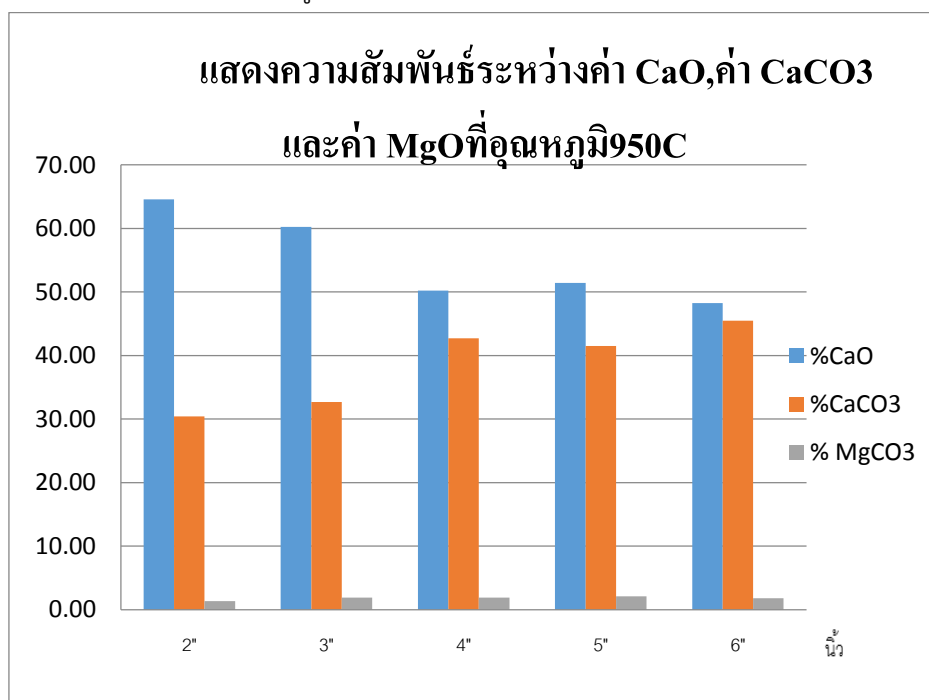
และที่การทดลองเผาหินปูนขนาดตั้งแต่ 2 – 6 นิ้ว ที่อุณหภูมิ 900 °C พบว่าหินปูนที่นำมาศึกษา เกิดการแตกตัวเปลี่ยนสภาพจากสารประกอบ CaCO<sub>3</sub> ไปเป็นสารประกอบ CaO โดยหินปูนทุกขนาดมีอัตราการแตกตัวเป็นสารประกอบ CaO เพิ่มขึ้น โดยหินปูนขนาด 2 นิ้วมีอัตราการแตกตัวเป็น CaO เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 59 ของ CaO ขณะที่แนวโน้มการเกิดของสารประกอบ CaO ที่หินปูนขนาด 6 นิ้ว ก็มีอัตราการแตกตัวเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยพบว่าหินปูนขนาด 6 นิ้ว มีสารประกอบ CaO เกิดเพิ่มเป็นร้อยละ 33 ดังรูปที่ 2ด้านล่าง



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO และค่า CaCO<sub>3</sub> และค่า MgOที่อุณหภูมิ 900 °C

ที่การทดลองเผาหินปูนขนาดตั้งแต่ 2 - 6นิ้ว ที่อุณหภูมิ 950 °C พบว่าหินปูนที่นำมาศึกษา เกิดการแตกตัวเปลี่ยนสภาพจากสารประกอบ CaCO<sub>3</sub> ไปเป็นสารประกอบ CaO โดยหินปูนทุกขนาดมีอัตราการแตกตัวเป็นสารประกอบ CaO เพิ่มขึ้น โดยหินปูนขนาด 2 นิ้ว มีอัตราการแตกตัวเป็น

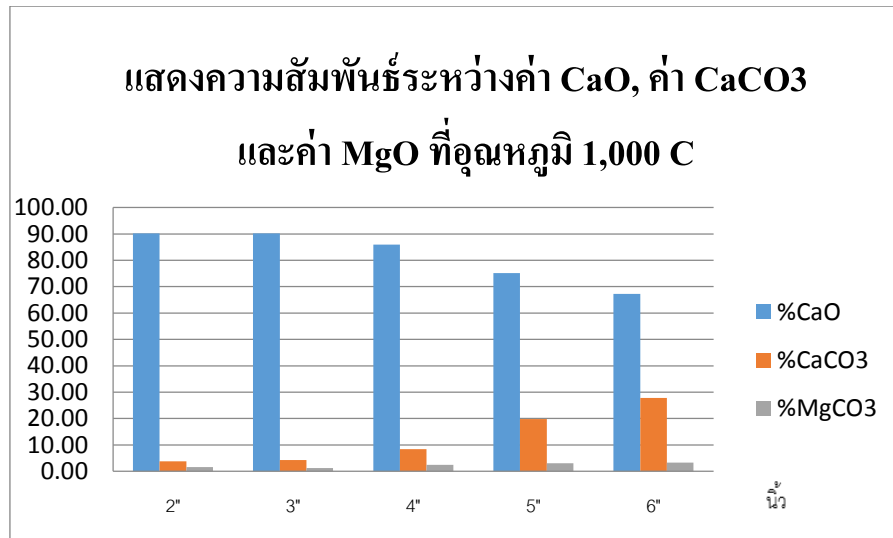
CaO เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 64.6 ของ CaO ขณะที่แนวโน้มการเกิดของสารประกอบ CaO ที่หินปูนขนาด 6 นิ้วก็มีอัตราการแตกตัวเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยพบว่าหินปูนขนาด 6 นิ้ว มีสารประกอบ CaO เกิดเพิ่มเป็นร้อยละ 48.5 ของ CaO ดังรูปที่ 3 ด้านล่าง



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO, ค่า CaCO<sub>3</sub> และค่า MgO ที่อุณหภูมิ 950 °C

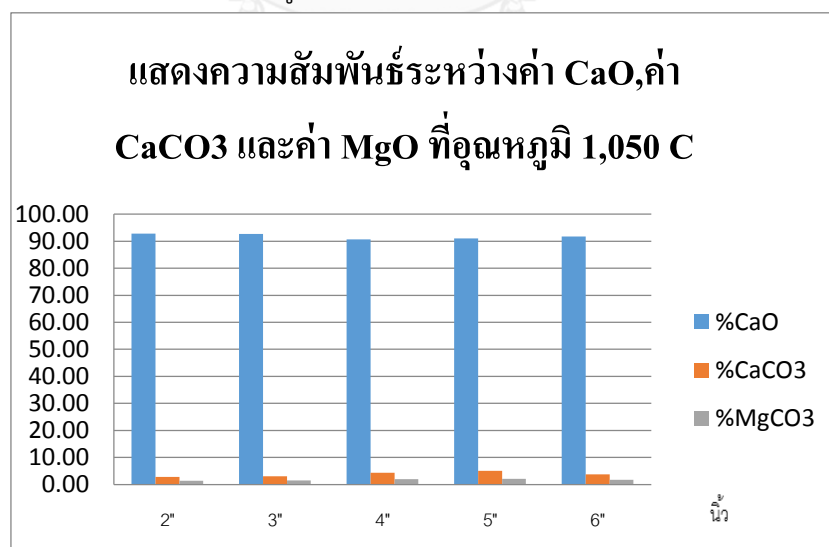
ที่การทดลองเผาหินปูนขนาดตั้งแต่ 2 - 6 นิ้ว ที่อุณหภูมิ 1,000 °C พบว่าหินปูนที่นำมาศึกษา เกิดการแตกตัวเปลี่ยนสภาพจากสารประกอบ CaCO<sub>3</sub> ไปเป็นสารประกอบ CaO โดยหินปูนทุกขนาดมีอัตราการแตกตัวเป็นสารประกอบ CaO เพิ่มขึ้น โดยหินปูนขนาด 2 นิ้ว มีอัตราการแตกตัวเป็น CaO เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 90.17 ของ CaO ซึ่งค่าการแตกตัวดังกล่าวเป็นค่าร้อยละ CaO ที่ทางผู้วิจัยให้ความสำคัญ ขณะที่แนวโน้มการเกิดของสารประกอบ CaO ที่หินปูนขนาด 6 นิ้ว ก็มีอัตราการแตกตัวเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยพบว่าหินปูนขนาด 6 นิ้ว มีสารประกอบ CaO เกิดเพิ่มเป็นร้อยละ 67.23 ของ CaO ดังรูปที่ 4 ด้านล่าง





รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO,ค่า  $CaCO_3$  และค่า MgO ที่อุณหภูมิ 1,000 °C

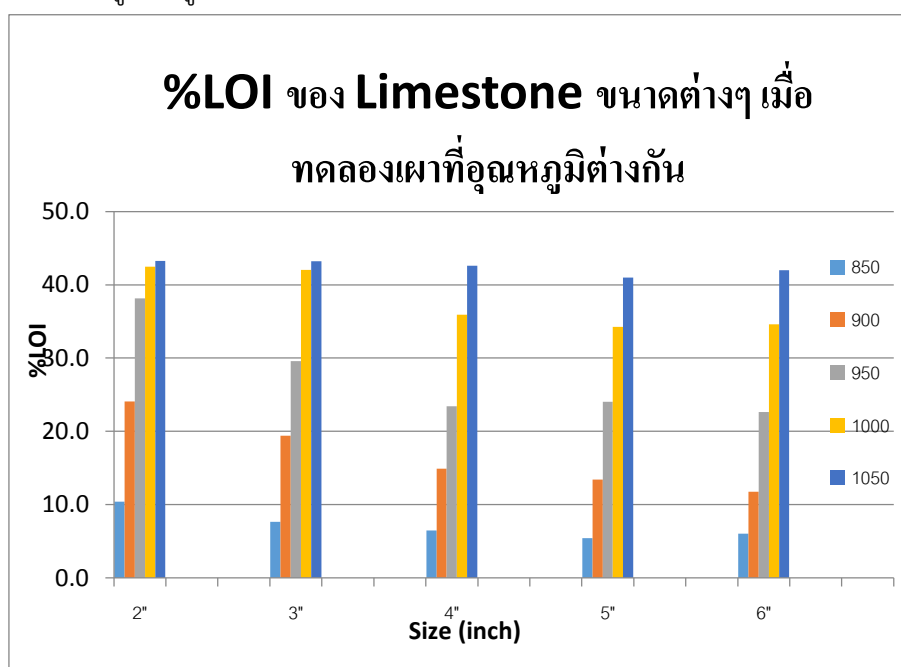
ที่การทดลองเผาหินปูนขนาดตั้งแต่ 2 – 6 นิ้ว ที่อุณหภูมิ 1,000 °C พบว่าหินปูนที่นำมาศึกษา เกิดการแตกตัวเปลี่ยนสภาพจากสารประกอบ  $CaCO_3$  ไปเป็นสารประกอบ CaO โดยหินปูนทุกขนาดมีอัตราการแตกตัวเป็นสารประกอบ CaO เพิ่มขึ้น โดยหินปูนขนาด 2 นิ้ว มีอัตราการแตกตัวเป็น CaO เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 92.85 ของ CaO ซึ่งค่าการแตกตัวดังกล่าวเป็นค่าร้อยละของ CaO ที่ทางผู้วิจัยให้ความสำคัญ ขณะที่แนวโน้มการเกิดของสารประกอบ CaO ที่หินปูนขนาด 6 นิ้ว ก็มีอัตราการแตกตัวเพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่ทางผู้วิจัยให้ความสำคัญ โดยพบว่าหินปูนขนาด 6 นิ้ว มีสารประกอบ CaO เกิดเพิ่มเป็นร้อยละ 91.17 ดังรูปที่ 5 ด้านล่าง



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO ,ค่า  $CaCO_3$  และค่า MgO ที่อุณหภูมิ 1,050 °C

#### 4.1.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่ากากตะกอนแข็ง(Grit)

จากการทดลองนี้พบว่าหากพิจารณาตามค่า LOI ที่อุณหภูมิต่างๆในการเผาหินปูนขนาดตั้งแต่ 2 - 6 นิ้ว พบว่าอัตราการเกิดค่า LOI ของหินปูนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการเพิ่มของอุณหภูมิดังกราฟที่ 6 ด้านล่าง ซึ่งจากงานวิจัยของ Oates,[15]พบว่า การทดลองให้ผลสอดคล้องที่อุณหภูมิที่หินปูนเริ่มเกิดการแตกตัวจะเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ  $850^{\circ}\text{C}$  และมีอัตราการเพิ่มขึ้นโดยพบว่าที่อุณหภูมิ  $1,050^{\circ}\text{C}$  พบว่าหินปูนทุกขนาดมีค่าร้อยละ LOI (% LOI) มากกว่าร้อยละ 35 ซึ่งก็ให้ผลสอดคล้องกับผลการพิจารณาค่าร้อยละ CaO (%CaO) ที่อุณหภูมิดังกล่าวเกิดเป็นร้อยละ 90 ของ CaO ทุกขนาดหินปูน ดังรูปที่ 6 ด้านล่าง



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %LOI ของหินขนาดตั้งแต่ 2-6 นิ้ว ที่อุณหภูมิตั้งแต่  $850^{\circ}\text{C}$ ,  $900^{\circ}\text{C}$ ,  $950^{\circ}\text{C}$ ,  $1,000^{\circ}\text{C}$ ,  $1,050^{\circ}\text{C}$

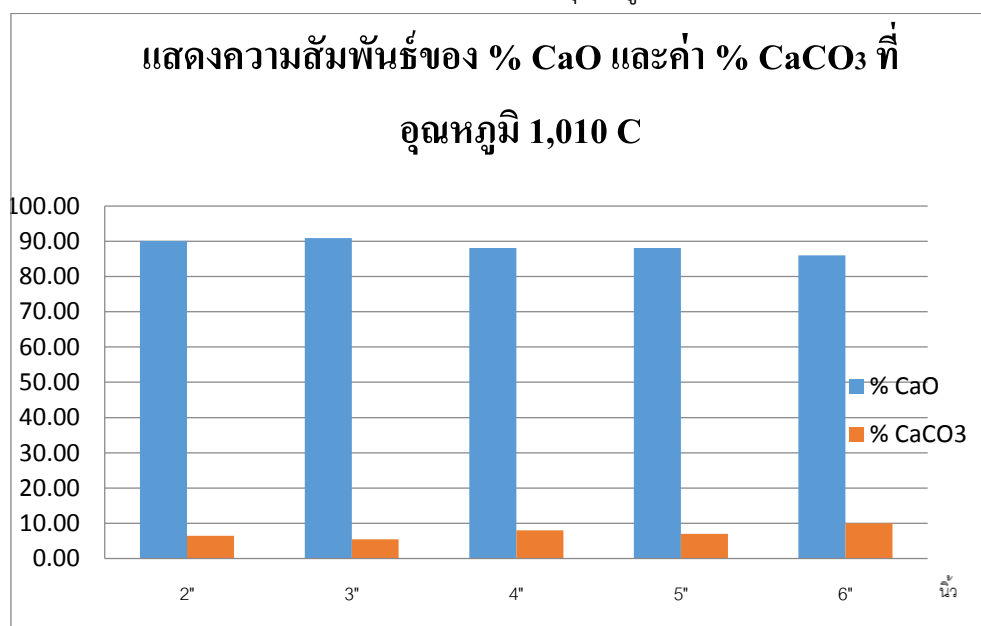
#### 4.2 ผลการทดลองส่วนที่ 2

##### 4.2.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่า CaO และค่า $\text{CaCO}_3$

จากผลการทดลองในส่วนที่ 1 ผู้ทำการวิจัยพบว่าอุณหภูมิที่คาดว่าจะส่งผลต่อการเกิดสารประกอบ CaO ให้มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 90 ของ CaO จะอยู่ในช่วงของอุณหภูมิ  $1,000^{\circ}\text{C}$  -  $1,050^{\circ}\text{C}$

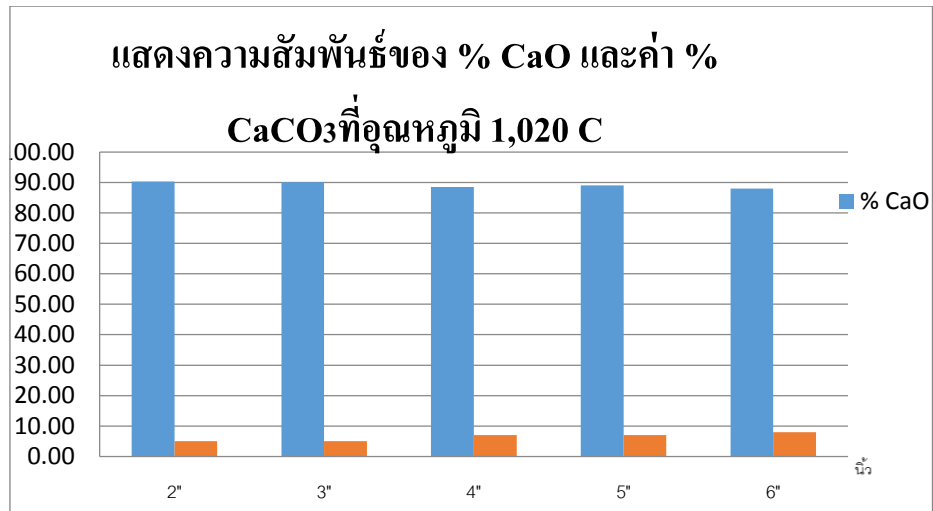
ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกช่วงอุณหภูมิ  $1,010^{\circ}\text{C}$  ,  $1,020^{\circ}\text{C}$  ,  $1,030^{\circ}\text{C}$  ,  $1,040^{\circ}\text{C}$  ,  $1,050^{\circ}\text{C}$  มาทำการศึกษาเพื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิที่แน่นอนเพื่อใช้ในการควบคุมการผลิตเพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบ  $\text{CaO}$  ตั้งแต่ร้อยละ 90 และมีคุณสมบัติทางเคมีอื่นๆ เช่น ค่า Colour Y และค่า Colour B ที่อาจมีผลกระทบจากผลของอุณหภูมิในการผลิตปูนขาว

โดยผู้ทำการวิจัยพบว่าที่อุณหภูมิ  $1,010^{\circ}\text{C}$  หินปูนขนาดตั้งแต่ 2 – 3 นิ้วมีอัตราการแตกตัวจากสารประกอบ  $\text{CaCO}_3$  ไปเป็นสารประกอบ  $\text{CaO}$  ที่ร้อยละ 90 ของ  $\text{CaO}$  ที่อุณหภูมิ  $1,010^{\circ}\text{C}$  ดังรูปที่ 7 ด้านล่าง และนอกจากนี้ที่อุณหภูมิดังกล่าวพบว่า หินปูนขนาด 6 นิ้วมีอัตราการแตกตัวจากสารประกอบ  $\text{CaCO}_3$  ไปเป็นสารประกอบ  $\text{CaO}$  ที่ร้อยละ 86 ของ  $\text{CaO}$  ที่อุณหภูมิดังกล่าวซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าการแตกตัวเป็นสารประกอบ  $\text{CaO}$  ที่อุณหภูมิ  $1,000^{\circ}\text{C}$  ในช่วงการทดลองเริ่มต้น

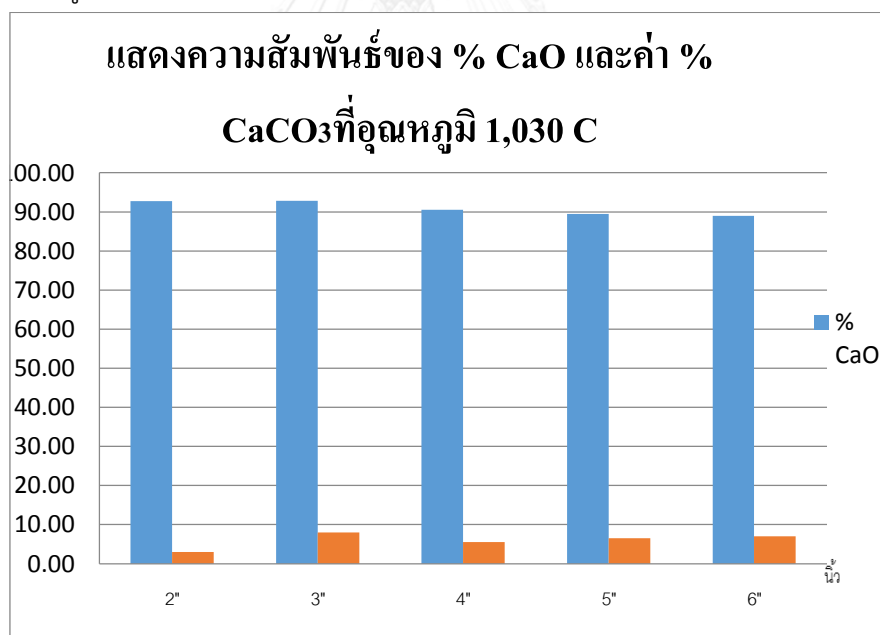


รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\text{CaO}$  ,ค่า  $\text{CaCO}_3$  ที่อุณหภูมิ  $1,010^{\circ}\text{C}$

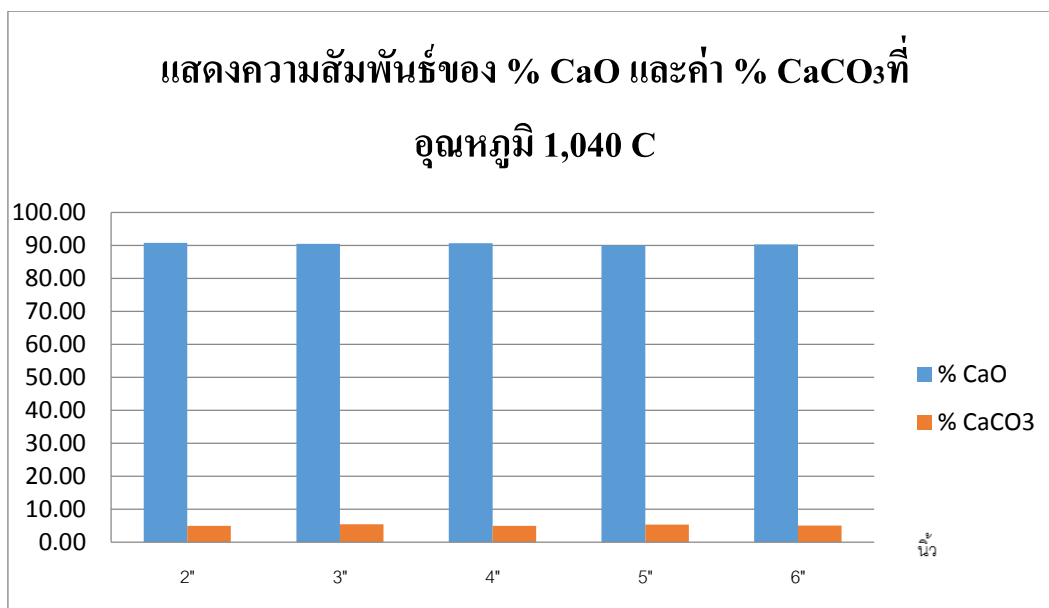
ที่อุณหภูมิ  $1,020^{\circ}\text{C}$  หินปูนขนาด 2 – 3 นิ้วมีค่าการแตกตัวจากสารประกอบ  $\text{CaCO}_3$  ไปเป็นสารประกอบ  $\text{CaO}$  ที่ร้อยละ 90 ของ  $\text{CaO}$  แต่มีแนวโน้มการแตกตัวเป็นสารประกอบ  $\\text{CaO}$  เพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ จาก  $1,010^{\circ}\text{C}$  เป็น  $1,020^{\circ}\text{C}$  ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO ,ค่า  $CaCO_3$  ที่อุณหภูมิ 1,020 °C ที่อุณหภูมิ 1,030 °C หินปูนขนาด 2 – 3 นิ้วมีค่าการแตกตัวจากสารประกอบ  $CaCO_3$  ไปเป็นสารประกอบ CaO ที่ค่า % CaO ตั้งแต่ร้อยละ 90 ของ CaO แต่หินปูนขนาด 5 – 6 นิ้ว ยังไม่สามารถมีค่าการแตกตัวเป็นสารประกอบ CaO ได้เกินร้อยละ 90 ของ CaO ที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 1,030 °C ดังรูปที่ 9

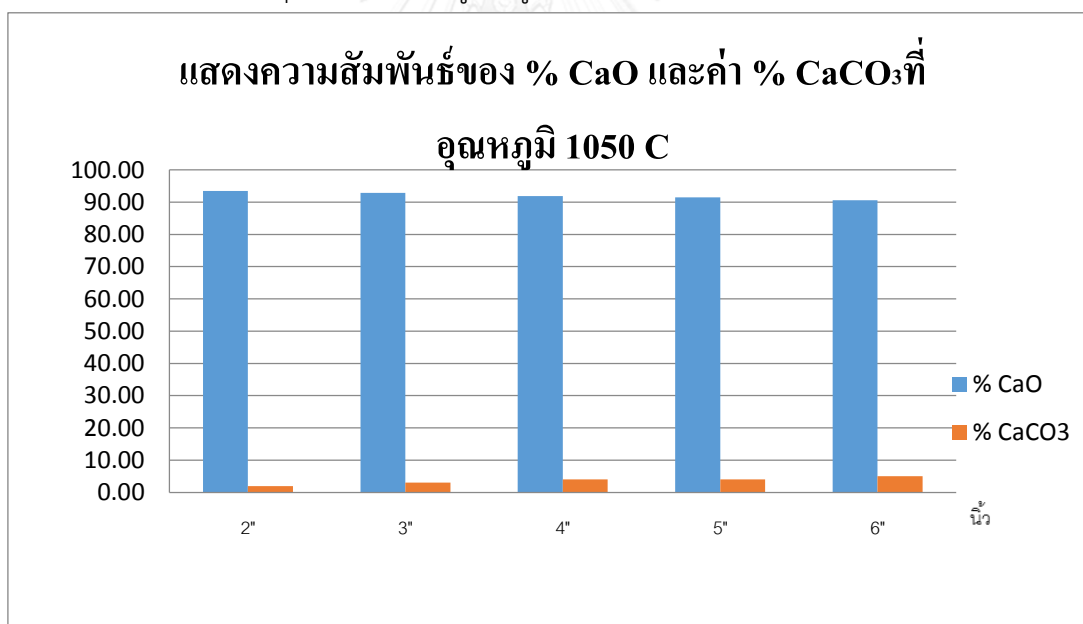


รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO ,ค่า  $CaCO_3$  ที่อุณหภูมิ 1,030 °C ที่อุณหภูมิ 1,040 °C หินปูนทุกขนาดสามารถแตกตัวเป็นสารประกอบ CaO ได้ค่าร้อยละ 90 ของ CaO ที่ทุกขนาดของหินปูนดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO ,ค่า  $CaCO_3$  ที่อุณหภูมิ 1,040 °C

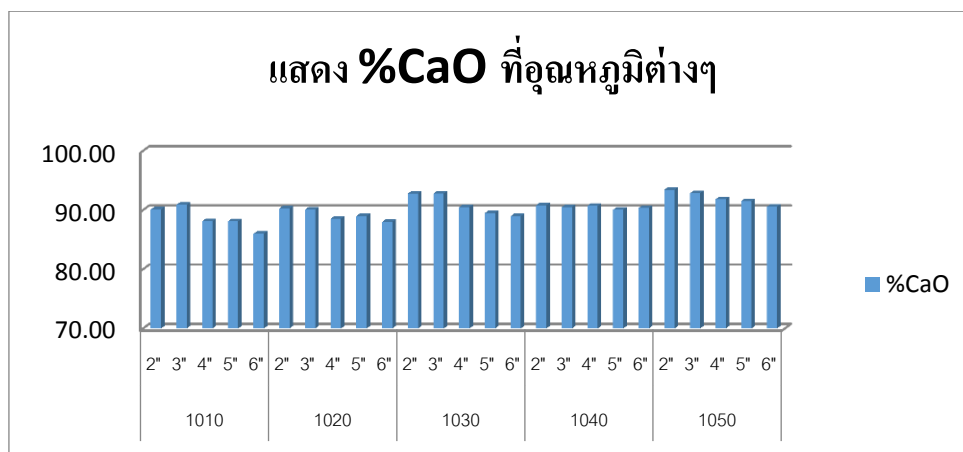
และที่อุณหภูมิ 1050 °C หินปูนทุกขนาดสามารถแตกตัวเป็นสารประกอบ CaO ได้ค่า ร้อยละ CaO ที่ร้อยละ 90 ของ CaO ที่ทุกขนาดของหินปูนดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO ,ค่า  $CaCO_3$  ที่อุณหภูมิ 1,050 °C

และจากกราฟการทดลองรูปที่ 7 - 11 พบว่าแนวโน้มการลดลงของสารประกอบ  $CaCO_3$  จากการเผาหินปูนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 1,010 °C - 1,050 °C พบว่ามีแนวโน้มลดลงของสารประกอบดังกล่าวเมื่อเกิดการเพิ่มของอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาหินปูนจะทำให้เกิดการลดลงของสารประกอบ  $CaCO_3$  แต่เป็นการเพิ่มขึ้นของสารประกอบ CaO โดยจะสามารถเกิดสารประกอบดังกล่าวเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 1,020 °C ซึ่งสามารถเกิดสารประกอบ CaO

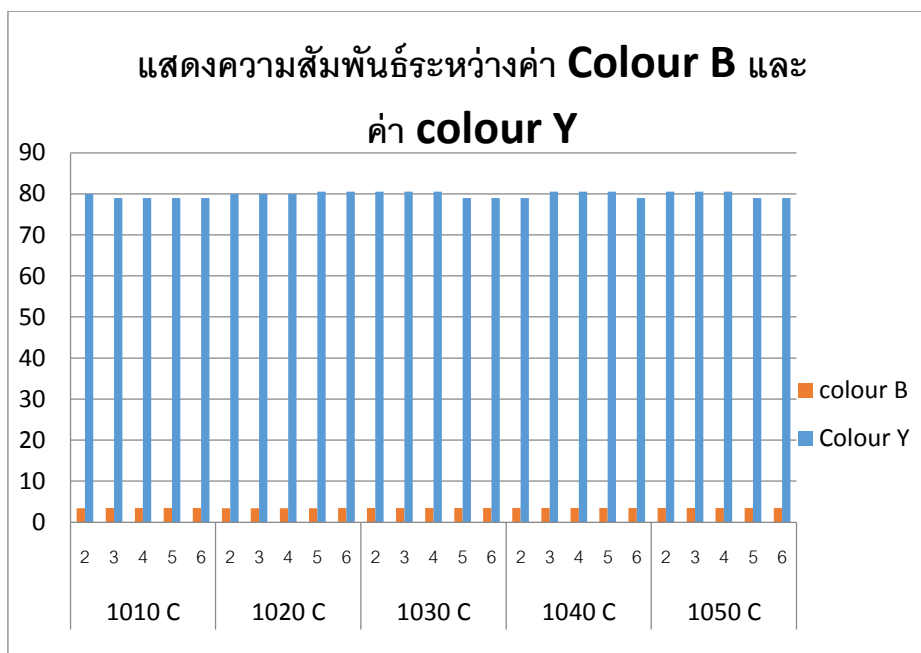
ได้มากกว่าร้อยละ 85 ของ CaO ที่หินปูนขนาดตั้งแต่ 2 - 6 นิ้ว และสามารถเกิดเป็นสารประกอบ CaO เฉลี่ยได้ร้อยละ 90 ของ CaO ที่หินปูนขนาด 2 - 6 นิ้ว ที่อุณหภูมิ 1,040 °C และที่อุณหภูมิ 1,050 °C สามารถเกิดการเผาหินปูนที่ขนาดหินปูน 2 - 6 นิ้ว ได้เป็นสารประกอบ CaO ได้ร้อยละ 90 ของ CaO ที่หินปูนทุกขนาด โดยพิจารณาได้รูปที่ 12



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO ,ค่า  $CaCO_3$  ที่ขนาดหินต่างๆ

#### 4.2.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่า Color B และค่า Color Y

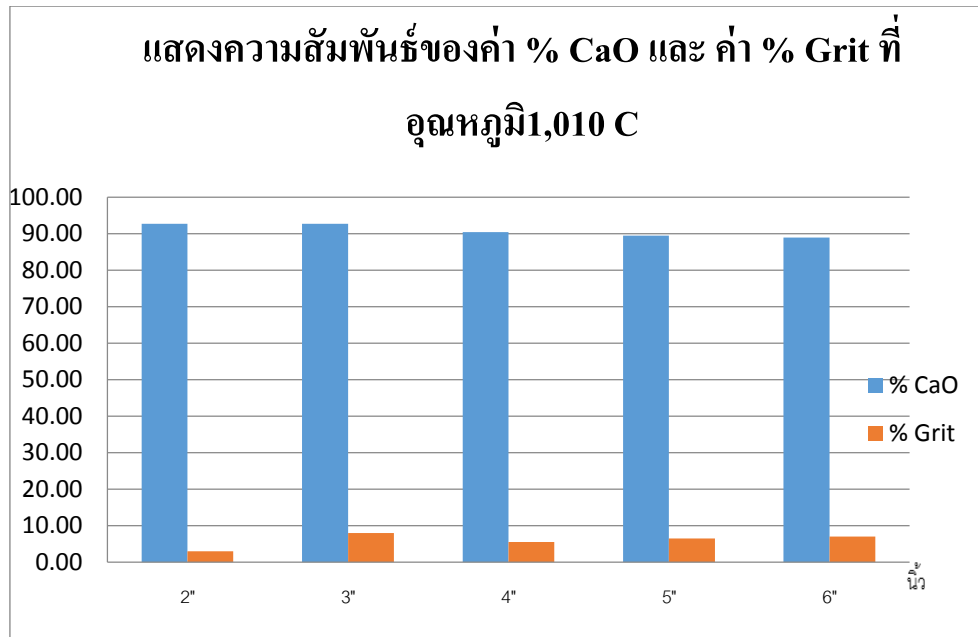
การศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพิจารณาถึงผลกระทบระหว่างผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่าทางเคมีที่ค่า Color B และ Color Y พบว่าจากกราฟที่หินทุกขนาดถึงแม้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากอุณหภูมิ 1,010 °C ไปจนถึงอุณหภูมิ 1,050 °C พบว่าค่า Color B มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงค่าน้อยมากโดยเฉลี่ย อยู่ในช่วงค่าร้อยละ 3.4 - 3.5 ดังรูปที่ 13 และเช่นเดียวกันกับค่า Color Y ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าน้อยมากโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 77 - 80 ที่ค่าดังกล่าวโดยการเพิ่มของอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อค่า Color B และ ค่า Color Y อย่างไม่มีนัยสำคัญดังรูปที่ 13



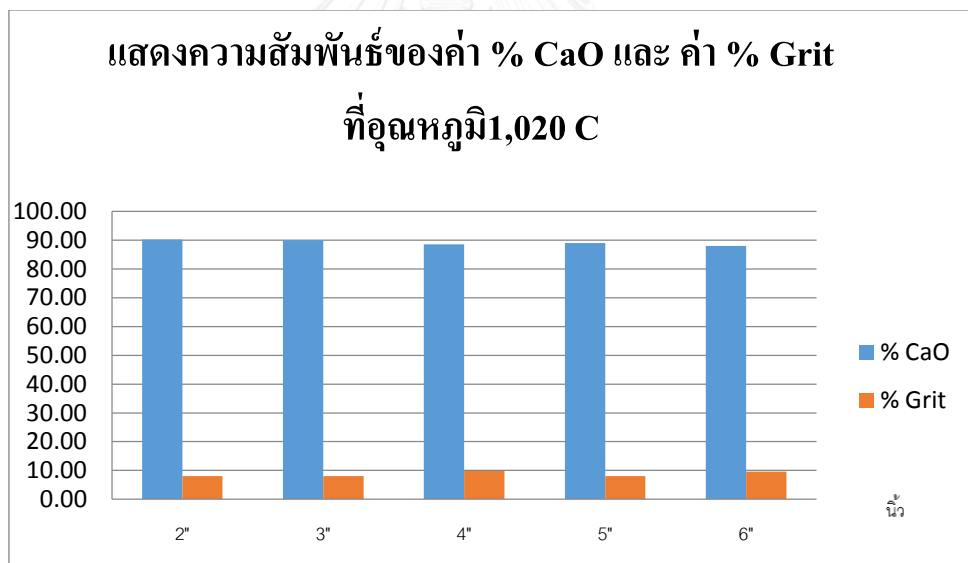
รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Color B และค่า Color Y ที่อุณหภูมิและขนาดของหินต่างๆ

#### 4.2.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ส่งต่อค่ากากตะกอนแข็ง(Grit)

จากการทดลองเพิ่มเติมในเรื่องของร้อยละการเกิดกากตะกอนแข็ง ( % Grit ) ที่อาจเกิดจากผลกระทบเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาหินปูนพบว่า จากรูปที่ 7 - 11 ที่ทำการทดลองเผาหินปูนที่อุณหภูมิ  $1,010^{\circ}\text{C}$  พบว่าแนวโน้มการเกิด ร้อยละของ Grit ของหินปูนแต่ละขนาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 14 - 18 เป็นการเปรียบเทียบค่าร้อยละของ Grit เทียบกับค่าร้อยละของ CaO พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละ CaO ในแต่ละขนาดหินปูนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นขณะที่ค่าร้อยละของ Grit มีแนวโน้มลดต่ำลง ดังรูปที่ 14 - 18

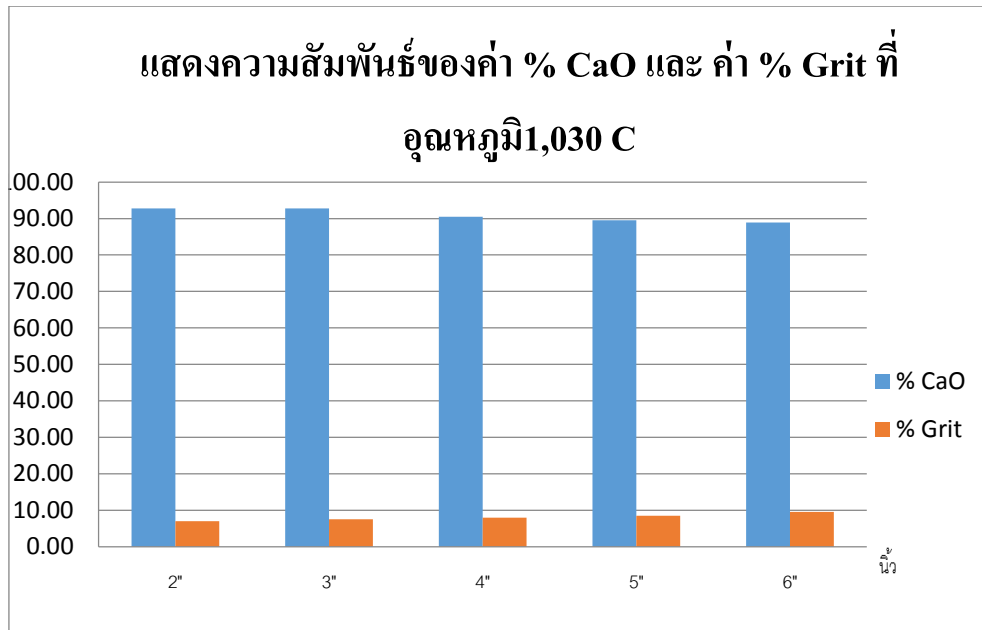


รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO และค่า Grit ที่อุณหภูมิ 1,010 °C

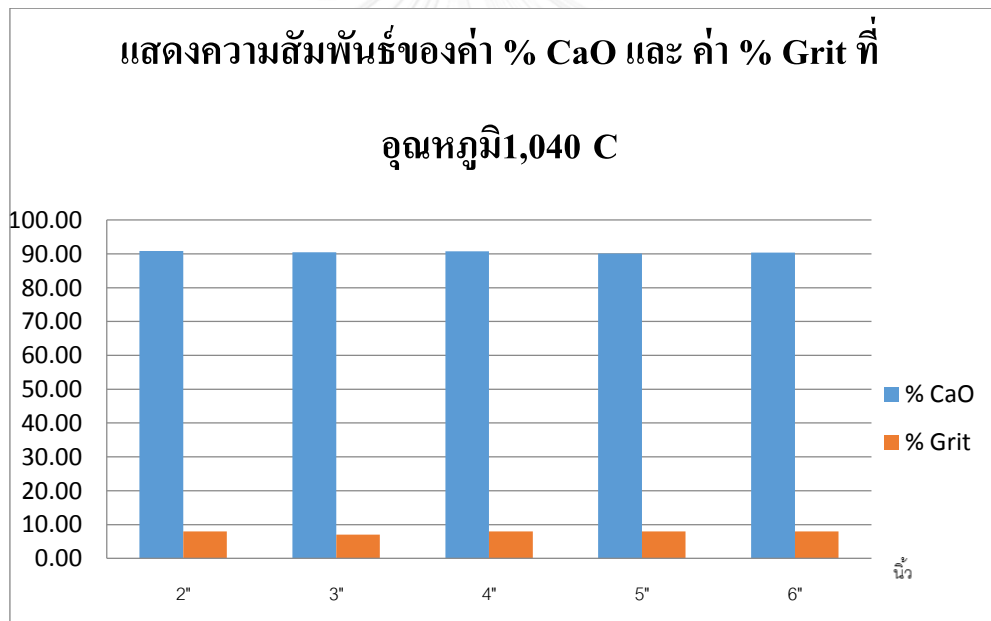


รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO และค่า Grit ที่อุณหภูมิ 1,020 °C

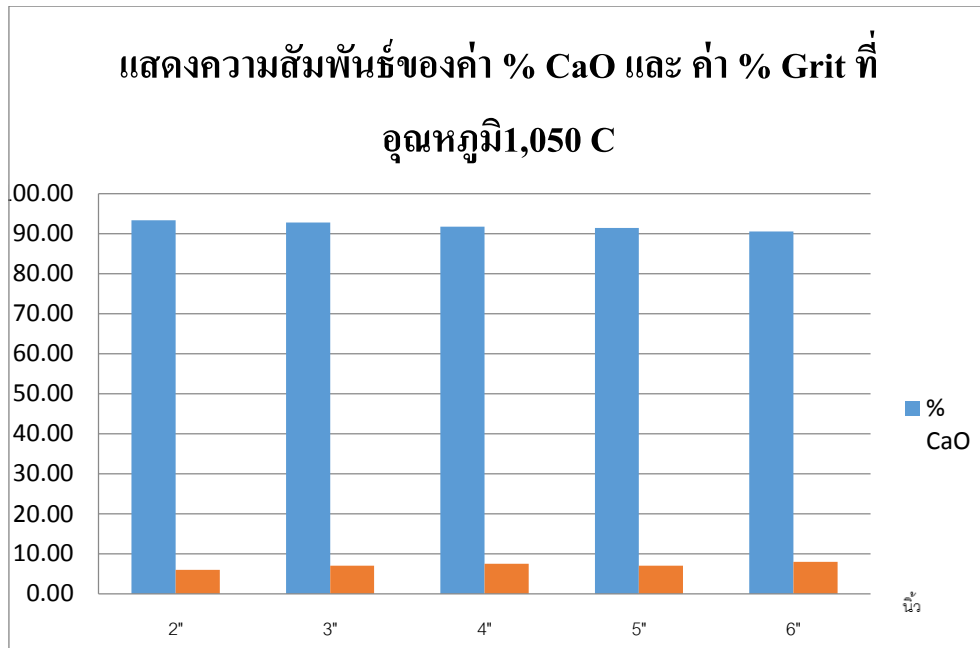




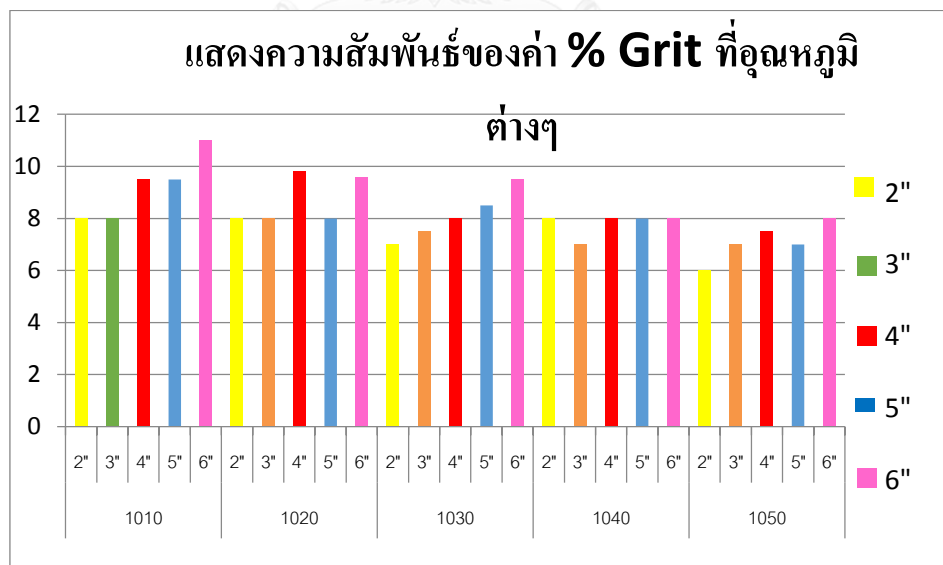
รูปที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaOและค่า Grit ที่อุณหภูมิ 1,030 °C



รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaOและค่า Grit ที่อุณหภูมิ 1,040 °C



รูปที่ 18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CaO และค่า Grit ที่อุณหภูมิ 1,050 °C  
 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ค่าร้อยละ Grit มีค่าลดต่ำลง ขณะที่ค่า ร้อยละ CaO มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ค่า % Grit ที่อุณหภูมิต่างๆ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้ต้องการศึกษาถึงอุณหภูมิเฉลี่ยที่เหมาะสมในการเผาหินปูนให้เกิดเป็นปูนขาวหรือเกิดเป็นสารประกอบ CaO โดยใช้หินปูนที่ควบคุมด้านกว้างและด้านหนาให้มีค่าเป็น 2 นิ้ว แต่แปรผันที่ความยาวของหินปูนในช่วง 2 - 6 นิ้ว โดยการนำหินปูนดังกล่าวมาเข้าเตาอบที่สามารถทำความร้อนได้สูงสุด  $1,200^{\circ}\text{C}$  โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนการทดลอง

โดยส่วนการทดลองแรกมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงช่วงอุณหภูมิที่หินปูนขนาดตั้งแต่ 2 - 6 นิ้ว สามารถเกิดเป็นสารประกอบ CaO ได้ร้อยละ 90 ของ CaO และส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาหาอุณหภูมิเฉลี่ยในการเผาหินปูนให้ได้สารประกอบ CaO ร้อยละ 90 ของ CaO และพิจารณาผลของอุณหภูมิเฉลี่ยดังกล่าวว่าส่งผลต่อสมบัติทางเคมีของปูนขาวที่ค่า Color B และ ค่า Color Y อย่างไร โดยได้สรุปผลการทดลองดังนี้

#### 5.1 ส่วนการทดลองที่ 1 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่อุณหภูมิที่ 850 องศาเซลเซียส, 900 องศาเซลเซียส, 950 องศาเซลเซียส, 1,000 องศาเซลเซียส, 1,050 องศาเซลเซียส

พบว่าที่อุณหภูมิ  $850^{\circ}\text{C}$  -  $950^{\circ}\text{C}$  พบว่าหินปูนทุกขนาดที่นำมาศึกษาไม่สามารถเกิดสารประกอบ CaO ได้ร้อยละ 90 แต่ที่อุณหภูมิ  $1,000^{\circ}\text{C}$  หินปูนที่ขนาด 2 - 3 นิ้วสามารถเกิดสารประกอบ CaO ได้ร้อยละ 90 ของ CaO และที่อุณหภูมิ  $1,050^{\circ}\text{C}$  หินปูนทุกขนาดที่นำมาศึกษาสามารถเกิดสารประกอบ CaO ได้ 90% CaO จึงสามารถสรุปจากส่วนการทดลองที่ 1 ได้ว่าอุณหภูมิ  $1,050^{\circ}\text{C}$  เป็นอุณหภูมิที่ทำให้หินปูนทุกขนาดสามารถเกิดสารประกอบ CaO ได้ร้อยละ 90 ของ CaO

#### 5.2 ส่วนการทดลองที่ 2 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ 1,010 องศาเซลเซียส 1,020 องศาเซลเซียส 1,030 องศาเซลเซียส, 1,040 องศาเซลเซียส, 1,050 องศาเซลเซียส

5.2.1 จากการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิ  $1010^{\circ}\text{C}$  -  $1030^{\circ}\text{C}$  หินปูนขนาด 2-5 นิ้วสามารถเกิดสารประกอบ CaO ได้ร้อยละ 90 ของ CaO แต่หินปูนขนาด 6 นิ้วยังไม่สามารถเกิดเป็นสารประกอบ CaO ได้ร้อยละ 90 ของ CaO ที่อุณหภูมิดังกล่าว และพบว่าที่อุณหภูมิ  $1,040^{\circ}\text{C}$  หินปูนทุกขนาดที่

นำมาศึกษาสามารถเกิดสารประกอบ CaO ได้ ร้อยละ 90 ของ CaO และที่อุณหภูมิ 1,050 °C หินปูนทุกขนาดที่นำมาศึกษาสามารถเกิดเป็นสารประกอบ CaO ได้ ร้อยละ 90 ของ CaO จึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ทำให้หินปูนทุกขนาดที่สามารถเปลี่ยนสภาพจากสารประกอบ CaCO<sub>3</sub> เป็นสารประกอบ CaO ได้ ร้อยละ 90 ของ CaO อยู่ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 1040 °C

5.2.2 จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิค่าร้อยละของ Grit มีค่าลดลง โดยพิจารณาได้จากหินขนาด 6 นิ้วที่มีค่าร้อยละของ Grit ลดลงอย่างต่อเนื่องจากที่อุณหภูมิ 1,010 °C มีค่า ร้อยละของ Grit ที่ 11 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 1,040 °C มีค่าร้อยละของ Grit ที่ 8 และที่อุณหภูมิ 1,050 °C มีค่าร้อยละของ Grit ต่ำกว่า 8 แสดงว่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ให้ค่าร้อยละของ Grit ตามวัตถุประสงค์การทดลองอยู่ที่อุณหภูมิ 1,040 °C และเมื่ออุณหภูมิ เพิ่มสูงขึ้นค่าร้อยละของ Grit จะมีค่าลดต่ำลง

#### ข้อเสนอแนะ

1. หินปูนที่นำมาทดลองเป็นหินปูนในภาคอุตสาหกรรมที่มีสารมลทินประกอบอยู่ จึงเป็นสาเหตุส่วนหนึ่งที่ทำให้ผลการทดลองที่อุณหภูมิในการเผาหินปูน 900 °C ไม่สามารถทำให้เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ได้มากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไปตามการศึกษาของ Azbe V.J.(1953)
2. เนื่องจากเตาเผาที่ทำการศึกษามีค่าความปลอดภัยของอุปกรณ์ในการทำงานอยู่ที่ 1,050 °C จึงทำการศึกษาดังกล่าวเลือกอุณหภูมิในการทดลองสุดท้ายอยู่ที่ 1,050 °C



รายการอ้างอิง



### รายการอ้างอิง

1. Baehr, H.D., Stephan, K., 2006. Wärme- und Stoffübertragung, fifth ed. Springer, Berlin.
- Bes, A., 2006. Dynamic Process Simulation of Limestone Calcination in Normal Shaft Kiln, Ph.D. Thesis, Magdeburg.
2. Boynton, R.S., 1980. Chemistry and Technology of Lime & Limestone. Wiley, New York.
3. Cheng, C., Specht, E., Kehse, G., 2007. Einfluss der Herkunft und Stoffwerte von Kalksteinen auf ihr Zersetzungsverhalten in Schachtöfen. ZKG International 60, 51–61.
4. Chorin, A.J., 1968. Numerical solution of Navier–Stokes equations. Mathematics of Computation 22, 745–762.
5. Cundall, P.A., Strack, O.D.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique 29, 47–65.
6. Cussler, E.L., 1984. Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems. Cambridge University Press, Cambridge.
7. Ergun, S., 1952. Fluid flow through packed columns. Chem. Eng. Prog. 48, 89–94.
- Fluent 2006. FLUENT 6.3 User's Guide, Fluent Inc., Lebanon NH.
8. Gnielinski, 1980. Wärme- und Stoffübertragung in Festbetten. Chem. Eng. Technol. 52, 228–236.
9. Hills, A.W.D., 1968. The mechanism of the thermal decomposition of calcium carbonate. Chem. Eng. Sci. 23, 297–320.
10. Kruggel-Emden, H., 2007. Analysis and Improvement of the Time-driven Discrete Element Method, Ph.D. Thesis, Bochum 2007.
- Kruggel-Emden, H., Simsek, E., Wirtz, S., Scherer, V., 2007a. A comparative numerical study of particle mixing on different grate designs through the discrete element method. J. Pressure Vess. Technol. 129, 593–600.
11. Kruggel-Emden, H., Simsek, E., Rickelt, S., Wirtz, S., Scherer, V., 2007b. Review and extension of normal force models for the discrete element method. Powder Technol., 171–173.
12. Kruggel-Emden, H., Simsek, E., Wirtz, S., Scherer, V., 2007c. A comparison and validation of tangential force models for the use within discrete element

simulations, DEM07 Conference, Brisbane, 27–29 August.

13. Mohr, M., 2001. Numerische Simulation der simultanen Reaktion von Kalkstein und Kohle bei der Zementherstellung, Ph.D. Thesis, Bochum 2001.

14. Molerus, O., 1993. Principles of Flow in Disperse Systems. Chapman & Hall, London.

Moropoulou, A., Bakolas, A., Aggelakopoulou, E., 2001. The effects of limestone characteristics and calcination temperature to the reactivity of the quicklime. Cem. Concr. Res. 31, 633–639.

15. Oates, J.A.H., 1998. Lime and Limestone. Wiley-VCH, Weinheim.

Patankar, S.V., 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere, Washington, DC.

16. Rickelt, S., Kruggel-Emden, H., Wirtz, S., Scherer, V., 2009. Simulation of heat transfer in moving granular material by the discrete element method with special emphasis on inner particle heat transfer. In: Proceedings of the 2009 ASME Summer Heat Transfer Conference, San Francisco, 19–23 July

17. Antonia Moropoulou\*, Asterios Bakolas, The effect of limestone characteristics and calcination temperature to the reactivity of Quicklime, Cement and concrete research 31(2001)633-369

18. J.-M Commandr'e\*, S. Salvador and A. Nzihou, Reactivity of laboratory and industrial limes, Chemical engineering research and design, Trans IChemE, Part A, April 2007

19. Azbe V.J., "theory and practice of lime Manufacture," Part II, Rock Prod., 102-104(Mar.1953).

20. Wuhler J., "On reactivity of lime from Differrnct Kiln systems. " (Azbe Award No.5) Nat. Lime Assoc. Bull. (1965), 44pp.

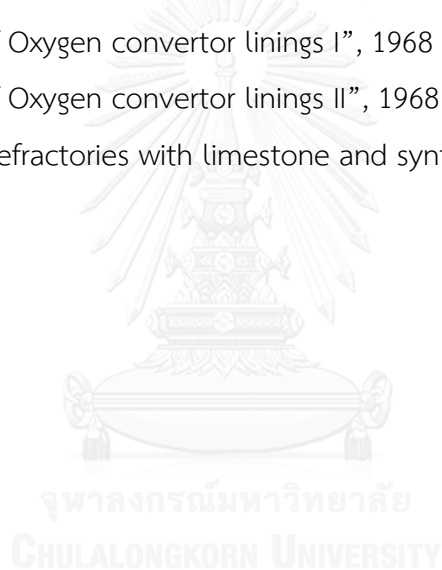
21. Mayer R. and Stowe R., " Physical Characterization of limestone and lime" (Azbe Award no.4A) National lime Association, 1964

22. Dash S., Nanocrytalline and metalstable ophase formation in vaccuum thermal decomposition of calcium carboanate, Thermochemica Acta 363(2000) 129-135

23. Murray, J.A. Summary of Fundamental Research on Lime, (n.p.): National Lime Assciation, 1956



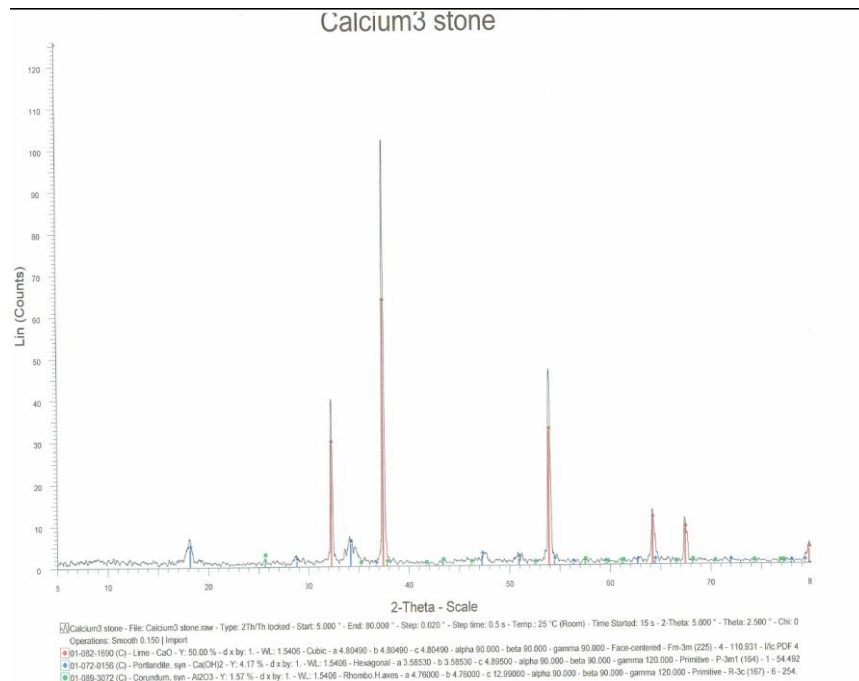
25. Mohamad Hassibi., “Factor Affecting the Quality of Quicklime (CaO): Mining to Manufacturing to Usage, 2009
26. Kamperl J., Macek J., “Precipitation of calcium carbonate from hydrated lime of variable reactivity, granulation and optical properties”, 2009
27. Ghosh A., “The effect of CuO addition on the sintering of lime”, 2000
28. Ghoneim N.M., “Sintering of lime doped with La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CeO<sub>2</sub>, Cerum” 1989
29. Hepworth M.A., “Fabrication of high density calcium oxide ceramics”, 1964
30. Schlitt W.J., “Preparation of lime specimen with closely controlled properties”, 1970
31. Nadachowski F., “Lime refractories, InterCerum”, 1975
32. Carr K., “Study of Oxygen convertor linings I”, 1968
33. Carr K., “Study of Oxygen convertor linings II”, 1968
34. Wong L.L., “Lime refractories with limestone and synthetic calcium hydroxide additions”, 1995



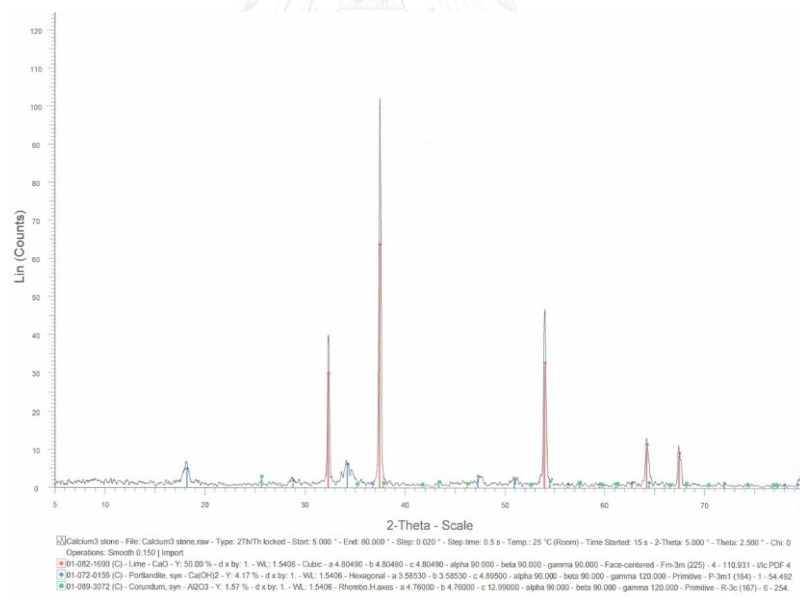


ตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์หินปูนด้วยวิธีการ XRF ก่อนทำการทดลอง

Formula	Z	Concentration	Status	Line 1	Net int.	Calc. concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO <sub>2</sub>	14	35.10%	XRF 1	Si KA1- HS-Min	383.6	35.14	0.21%	293.4 PPM	13.2 um
CaO	20	12.60%	XRF 1	Ca KA1- HS-Min	453.3	12.62	0.19%	158.2 PPM	58 um
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13	11.20%	XRF 1	Al KA1- HS-Min	170.1	11.19	0.31%	132.1 PPM	10.6 um
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26	4.28%	XRF 1	Fe KA1- HS-Min	536.6	4.283	0.17%	79.0 PPM	172 um
MgO	12	3.74%	XRF 1	Mg KA1- HS-Min	97.08	3.742	0.30%	155.4 PPM	7.3 um
Na <sub>2</sub> O	11	2.38%	XRF 1	Na KA1- HS-Min	27.28	2.385	0.56%	165.4 PPM	4.7 um
SO <sub>3</sub>	16	1.08%	XRF 1	S KA1- HS-Min	13.95	1.08	1.09%	67.2 PPM	16.3 um
K <sub>2</sub> O	19	0.43%	XRF 1	K KA1- HS-Min	18.92	0.428	0.94%	31.4 PPM	44 um
TiO <sub>2</sub>	22	0.42%	XRF 1	Ti KA1- HS-Min	13.57	0.419	1.13%	48.9 PPM	66 um
P	15	0 < LLD	XRF 1	P KA1- HS-Min	0.9223	0.111	4.81%	91.0 PPM	11.6 um



รูปที่ 20 แสดงผลการวิเคราะห์หินปูนโดยวิธีการ XRF ก่อนทำการทดลอง



รูปที่ 21 แสดงผลการวิเคราะห์หินปูนโดยวิธีการ XRF ก่อนทำการทดลอง



ตารางที่ 5 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส, 900 องศาเซลเซียส, 950 องศาเซลเซียส, 1,000 องศาเซลเซียส, 1,050 องศาเซลเซียส

Temp	Size	%CaO	%MgO
850 C	2"	56.00	41.50
	3"	36.55	60.95
	4"	40	57.50
	5"	30	67.50
	6"	20	77.50
900 C	2"	53.42	44.08
	3"	52.35	45.15
	4"	42	55.50
	5"	36	61.50
	6"	33.05	64.45
950 C	2"	64.60	32.90
	3"	60.23	37.27
	4"	50.23	47.27
	5"	51.42	46.08
	6"	48.25	49.25
1000 C	2"	90.17	7.33
	3"	90.14	7.36
	4"	86.00	11.50
	5"	75.19	22.31
	6"	67.23	30.27
1050 C	2"	92.85	4.65
	3"	92.67	4.83
	4"	90.62	6.88
	5"	90.65	6.85
	6"	91.71	5.79

ตารางที่ 6 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิ 1,010 องศาเซลเซียส, 1,020 องศาเซลเซียส, 1,030 องศาเซลเซียส, 1,040 องศาเซลเซียส, 1,050 องศาเซลเซียส

temp	size	LOI	CaO	%CaCO <sub>3</sub>	MgO	colour B	colour Y	grit
1010	2"	41.23	90.10	6.5	1.40	3.4	79	8
	3"	41.40	90.89	5.5	1.61	3.5	79	8
	4"	38.88	88.10	8	1.90	3.5	79	9.5
	5"	38.68	88.09	7	2.91	3.5	79	9.5
	6"	37.56	86.00	10	2.00	3.5	79	11
1020	2"	42.93	90.28	5	2.72	3.42	80	8
	3"	43.04	90.07	5	2.94	3.4	80	8
	4"	41.26	88.54	7	2.46	3.4	80	9.8
	5"	39.94	89.00	7	2.00	3.43	80.5	8
	6"	38.55	88.00	8	2.00	3.48	80.5	9.58
1030	2"	42.93	92.78	3	2.22	3.45	80.5	7
	3"	43.04	92.79	8	-2.79	3.48	80.5	7.5
	4"	41.26	90.50	5.5	2.00	3.47	80.5	8
	5"	39.94	89.50	6.5	2.00	3.5	79	8.5
	6"	38.55	88.94	7	2.06	3.5	79	9.5
1040	2"	40.99	90.80	5	2.20	3.5	79	8
	3"	41.29	90.50	5.5	2.00	3.47	80.5	7
	4"	40.85	90.70	5	2.30	3.46	80.5	8
	5"	40.63	90.05	5.4	2.55	3.48	80.5	8
	6"	40.83	90.36	5.1	2.55	3.5	79	8
1050	2"	44.06	93.43	2	2.58	3.48	80.5	6
	3"	43.52	92.84	3	2.16	3.45	80.5	7
	4"	43.47	91.83	4	2.18	3.45	80.5	7.5
	5"	42.00	91.50	4	2.50	3.5	79	7
	6"	41.47	90.55	5	2.45	3.5	79	8

ภาคผนวก ค.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY





รูปที่4.1แสดงภาพถ่ายหินปูนขนาด 2 นิ้ว ที่ใช้ทำการทดลอง



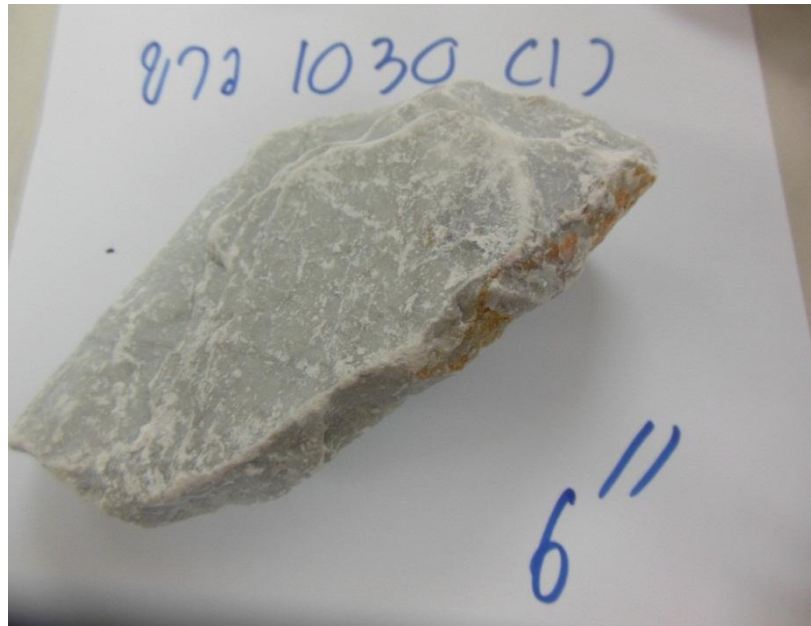
รูปที่4.2แสดงภาพถ่ายหินปูนขนาด 3 นิ้ว ที่ใช้ทำการทดลอง



รูปที่4.3แสดงภาพถ่ายหินปูนขนาด 4 นิ้ว ที่ใช้ทำการทดลอง



รูปที่4.4 แสดงภาพถ่ายหินปูนขนาด 5 นิ้ว ที่ใช้ทำการทดลอง



รูปที่4.5แสดงภาพถ่ายหินปูนขนาด 6 นิ้ว ที่ใช้ทำการทดลอง



รูปที่4.6 แสดงภาพถ่ายการสุมหินปูนอุตสาหกรรมจากกองเพื่อทำการทดลอง



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกัญญาภัทร สืบสาย เกิดเมื่อวันที่ 16 ตุลาคม พ.ศ.2531 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนอัสสัมชัญระยองในปีพ.ศ.2547 ในปีพ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และได้ทำการศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



