# การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตปูนขาวโดยใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง

นาย นนทชัย อึ้งชัยพาณิชย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546
ISBN 974-17-4376-9
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# FEASIBILITY STUDY OF LIME PRODUCTION USING SMALL-SCALE CONTINUOUS VERTICAL SHAFT KILN

Mr. Nondhachai Ungchaipanit

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Mining Engineering

Department of Mining and Petroleum Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4376-9

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตปูนขาวโดยใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง |
| โดย | นาย นนทชัย อึ้งชัยพาณิชย์ |
| สาขา | วิศวกรรมเหมืองแร่ |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีชำนะ |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…… ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีชำนะ)

……กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดาวัลย์ วิวรรธนะเดช)

……กรรมการ
(อาจารย์ สมศักดิ์ สายสินธุ์ชัย)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นาย นนทชัย อึ้งชัยพาณิชย์ : การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตปูนขาวโดยใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง. (FEASIBILITY STUDY OF LIME PRODUCTION USING SMALL-SCALE CONTINUOUS VERTICAL SHAFT KILN) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ภิญโญ มีชำนะ, จำนวนหน้า 151 หน้า. ISBN 974-17-4376-9.

อุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กถึงกลางที่มีกำลังการผลิตผลิตปูนสุกไม่เกิน 10,000 ตันต่อปี ซึ่งใช้เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบทั้งทางด้านวิศวกรรม และการเงินของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย พบว่าประสิทธิภาพของเตาแบบเผาทีละครั้งมีค่าต่ำมาก เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนมาก ทำให้สิ้นเปลืองการใช้เชื้อเพลิง ส่งผลทำให้ต้นทุนในการผลิตนั้นสูง ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่สำหรับผู้ประกอบการ เพื่อแก้ปัญหานี้จึงน่าจะมีความเป็นไปได้ในการสร้างประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน และอัตราการใช้เชื้อเพลิงให้ดีขึ้น โดยทำการเปลี่ยนมาใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Continuous Vertical Shaft Kiln) ทดแทนเตาแบบเผาทีละครั้งที่ใช้อยู่ ซึ่งเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง เป็นเทคโนโลยีเตาปูนขาวที่ยังไม่มีผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทยนำมาใช้ ซึ่งน่าจะเหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่มีกำลังการผลิตที่ไม่สูงนัก โดยลักษณะเป็นเตาแบบเผาต่อเนื่อง (Continuous Kiln) ที่มีการป้อนหินปูนสลับชั้นกันระหว่างถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง (Mixed Feed) เข้าไปในเตาปูนขาว ทำให้ถ่านหินเผาไหม้แล้วให้ความร้อนกับหินปูนในแต่ละชั้นโดยตรงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีขึ้น และคาดว่าจะทำให้ประหยัดพลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนขาว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2546

## 4470357021 : MAJOR MINING ENGINEERING

KEY WORD : / FEASIBILITY STUDY/ LIME / KILN

MR. NONDHACHAI UNGCHAIPANIT. THESIS TITLE: FEASIBILITY STUDY OF LIME PRODUCTION USING SMALL-SCALE CONTINUOUS VERTICAL SHAFT KILN. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. PINYO MEECHUMNA, Ph.D. 151 pp. ISBN 974-17-4376-9.

Most of lime plants using batch kilns in Thailand are of small to medium size having production capacity of less than 10,000 tons per annum. It has been found from the engineering and economical analysis that efficiencies of these batch kilns are extremely low due to the high heat loss during lime production process. Consequently, fuel is consumed excessively resulting high operating cost which is the main problem for entrepreneurs.

To accomplish these issues, it would be possible to improve thermal efficiency to reduce fuel consumption in lime production by using Small-Scale Continuous Vertical Shaft Kiln in substitution to the batch kiln. The continuous mixed feed kiln in which coal is mixed with limestone before feeding into the kiln has been designed for this purpose. This newly designed kiln which has never been used in Thailand before is expected to improve combustion efficiency due to the association of mixed feeding. Coal can be burnt and heat generated be transferred directly to each level of mixed feed resulting in energy saving of the lime production.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department of Mining and Petroleum Engineering Student's signature.....

Field of study in Mining Engineering Advisor's signature.....

Academic year 2003

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีชำนะ ซึ่งท่านได้ให้คำปรึกษา และคำแนะนำแนวทางในการวิจัย อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินการ ตลอดจนได้รับความกรุณาเป็นอย่างดีจากบริษัท แอล. เอส. เอ็ม. (1999) จำกัด บริษัท ปูนคุณภาพ จำกัด และบริษัท อโศกเคมีคอล จำกัด ที่อนุเคราะห์ให้ข้อมูล และอนุญาตให้เข้าไปถ่ายรูปเกี่ยวกับเตาปูนขาวที่ใช้ในการผลิต อีกทั้งขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้เสียสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

**บทคัดย่อภาษาไทย**……ง

**บทคัดย่อภาษาอังกฤษ**……...จ

**กิตติกรรมประกาศ**……...…ฉ

**สารบัญ**……..ช

**สารบัญตาราง**…….. ฎ

**สารบัญรูป**……ฐ

**บทที่ 1 บทนำ**……...……1

1.1 หลักการและเหตุผลที่ทำการวิจัย……..……1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย……...…….3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย……3

1.4 วิธีการและขั้นตอนการดำเนินการวิจัย……..4

1.4.1 การรวบรวมข้อมูล……..……4

1.4.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบ……..……4

1.4.3 สรุปผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบ……..……5

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ…....……..……. 5

**บทที่ 2 กระบวนการผลิตปูนขาว**……..6

2.1 การผลิตปูนสุก (Quicklime)……...……6

2.1.1 ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในการเผาหินปูน (Calcination)…….……...……..6

2.1.2 อุณหภูมิในการแยกตัว (Dissociation Temperature)……..……..……9

2.1.3 อัตราของการแยกตัว (Rate of Dissociation)...…....…….……...10

2.1.4 น้ำหนักที่หายไป (Loss On Ignition : LOI)……...……12

2.1.5 การหดตัว (Shrinkage)…….……...…...……13

2.1.6 ความพรุน (Porosity) และความหนาแน่น (Density)……14

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2 การผลิตปูนขาว (Hydrated Lime หรือ Slaked Lime)……16
2.2.1 ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นใน Hydration……16
2.2.2 ปริมาณของน้ำที่ใช้ในการผลิต……16
2.2.3 อัตราในการเกิด Hydration……18
2.3 คุณสมบัติของปูนสุกและปูนขาว……20
2.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนสุกและปูนขาว……20
2.3.2 คุณสมบัติทางเคมีของปูนสุกและปูนขาว……22
2.4 การนำปูนขาวไปใช้ประโยชน์……25
2.4.1 การนำปูนขาวไปใช้ในอุตสาหกรรม……25
2.4.2 การนำปูนขาวไปใช้ในเกษตรกรรม……27
2.4.3 การนำปูนขาวไปใช้ในการก่อสร้าง……28

**บทที่ 3 เทคโนโลยีเตาปูนขาว**……29
3.1 เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)……29
3.2 เตาแบบเผาต่อเนื่อง (Continuous Kiln)……31
3.2.1 เตาตั้ง (Vertical Shaft Kiln)……31
3.2.2 เตาแบบหมุน (Rotary Kiln)……37
3.3 การเปรียบเทียบด้านเทคนิคของเทคโนโลยีเตาปูนขาวแต่ละประเภท……38

**บทที่ 4 เตาปูนขาวที่ใช้ในประเทศไทย**……39
4.1 ประเภทของเตาปูนขาวที่ใช้ในประเทศไทย……39
4.1.1 เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)……39
4.1.2 เตาตั้งแบบ Parallel Flow……42
4.1.3 เตาตั้งแบบ Mixed Feed……44
4.1.4 เตาแบบหมุน (Rotary Kiln)……46
4.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย……48
4.2.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบทางวิศวกรรม……48
4.2.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบทางการเงิน……53
4.3 สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นกับอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทย……72

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

**บทที่ 5 เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง**……..74
5.1 การออกแบบเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง……75
5.1.1 กำลังการผลิตที่ต้องการ……75
5.1.2 ความสูงของเตาตั้ง……75
5.1.3 รูปร่างของเตาตั้ง……...76
5.1.4 การไหลของอากาศ……...78
5.2 การก่อสร้างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง……..79
5.2.1 วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง……...79
5.2.2 รายละเอียดของการก่อสร้าง……80
5.2.3 จำนวนและราคาของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง……..84
5.3 การผลิตปูนขาวโดยใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง……..85
5.3.1 การตรวจสอบการทำงาน……85
5.3.2 ขั้นตอนในการผลิต……...87

**บทที่ 6 ความเป็นไปได้ในการใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องสำหรับอุตสาหกรรมปูนขาว ในประเทศไทย…….89**
6.1 เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องสำหรับอุตสาหกรมมปูนขาวในประเทศไทย.....…….89
6.2 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง…..……91
6.2.1 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางวิศวกรรม.....……91
6.2.2 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงิน.....……98

**บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ**……113
7.1 สรุปผลการวิจัย……113
7.2 ข้อเสนอแนะ……116

**รายการอ้างอิง**……...117

**ภาคผนวก ก รายชื่อของโรงงานปูนขาวในประเทศไทย**……...120

**ภาคผนวก ข ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาปูนขาวแต่ละแบบในประเทศไทย**.....127

**ภาคผนวก ค ต้นทุนการผลิตปูนขาวของเตาปูนขาวแต่ละแบบในประเทศไทย**.....130

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

**ภาคผนวก ง ต้นทุนการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง**.....137

**ภาคผนวก จ การทดสอบคุณภาพของปูนขาว**……...…….……..139

**ภาคผนวก ฉ พลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนสุก**……..145

**ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์**...…….151

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า


2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนสุกและปูนขาว……..……..20

2.2 ส่วนประกอบโดยทั่วไปของปูนสุก……..……..23

2.3 คุณลักษณะของปูนสุกและปูนขาวเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม……..……...23

3.1 ข้อมูลทางเทคนิคของเทคโนโลยีเตาปูนขาวแต่ละประเภท……..……...38

4.1 พลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนสุก และประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาปูนขาว แต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย……..……..……..49

4.2 ข้อมูลทางเทคนิคของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย…..……...52

4.3 ต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย……..…...54

4.4 กระแสเงินเข้าและออกของการผลิตปูนขาวที่ใช้เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)…...63

4.5 กระแสเงินเข้าและออกของการผลิตปูนขาวที่ใช้เตาตั้งแบบ Parallel Flow…….……65

4.6 กระแสเงินเข้าและออกของการผลิตปูนขาวที่ใช้เตาตั้งแบบ Mixed Feed……...67

4.7 กระแสเงินเข้าและออกของการผลิตปูนขาวที่ใช้เตาแบบหมุน (Rotary Kiln)…….69

4.8 การเปรียบเทียบเกณฑ์ในการตัดสินใจของเตาปูนขาวแต่ละแบบในประเทศไทย.....71

5.1 ระยะเวลาในการก่อสร้างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง……...83

5.2 รายละเอียดของจำนวนและราคาของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง…….…...84

6.1 การเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้และสูญเสียไปในกระบวนการผลิตปูนสุกระหว่าง เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง……..94

6.2 การเปรียบเทียบอัตราการใช้เชื้อเพลิง และประสิทธิภาพในการใช้พลังงานระหว่าง เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง……...……96

6.3 การเปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิคระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบ เผาทีละครั้ง……97

6.4 การเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตปูนสุกระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับ เตาแบบเผาทีละครั้ง……..100

6.5 กระแสเงินเข้าและออกของการผลิตปูนขาวที่ใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Vertical Shaft Kiln)……104

6.6 การเปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับ เตาแบบเผาทีละครั้ง……..……106

# สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

6.7 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของราคาขายปูนขาวและต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง……...……109
6.8 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของราคาขายปูนขาวและต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้ง……..……111

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญรูป

รูปที่ หน้า


2.1 ตัวอย่างของกระบวนการผลิตปูนขาว……..7

2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผากับความดันที่เกิดขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ในกระบวนการเผาหินปูน (Calcination)……..8

2.3 กราฟแสดงอิทธิพลของความเข้มข้นและความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ที่มีต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการแยกตัวของแร่แคลไซต์ (Calcite : $CaCO_3$)……...10

2.4 กราฟแสดงอัตราของการแยกตัวที่เปลี่ยนไปในตัวอย่างที่เป็นหินปูนแต่ละชนิด……..11

2.5 กราฟแสดง Loss On Ignition (LOI) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิในการแยกตัว……..12

2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของปูนสุกกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา…….15

2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของปูนสุกกับระยะเวลาที่ใช้ในการเผา……...15

2.8 กราฟแสดงอัตราในการเกิด Hydration เมื่อใช้ปูนสุกที่มีชนิดแตกต่างกัน……18

2.9 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของน้ำที่ใช้ใน Hydration ที่มีผลต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้น……19

2.10 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide)…… 21

2.11 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide)……22

2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ……24

2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ pH ของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) และความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปที่อุณหภูมิ 25°C……..25

3.1 ตัวอย่างของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)……..30

3.2 โซนการทำงานของเตาตั้ง (Vertical Shaft Kiln)……31

3.3 แผนภาพแสดงการทำงานของเตาตั้งแบบ Mixed Feed……33

3.4 แผนภาพแสดงการทำงานของเตาตั้งแบบ Annular……...34

3.5 แผนภาพแสดงการทำงานของ เตาตั้งแบบ Double-Inclined……..……..35

3.6 แผนภาพแสดงการทำงานของเตาตั้งแบบ Parallel Flow……...36

3.7 แผนภาพแสดงการทำงานของเตาแบบหมุน (Rotary Kiln)……...37

4.1 เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)……..40

4.2 แผนภาพการทำงานของเตาเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)…….....41

4.3 เตาตั้งแบบ Parallel Flow……...43

4.4 กระเช้า (Skip) ลำเลียงหินปูนเข้าสู่เตาตั้งแบบ Parallel Flow……..……..43

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.5 เตาตั้งแบบ Mixed Feed…….45
4.6 สายพานที่ทำการลำเลียงถ่านหินแอนทราไซต์เข้าสู่เตาตั้ง Mixed Feed……45
4.7 เตาแบบหมุน (Rotary Kiln)……...47
4.8 Gear Box ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนความเร็วในการหมุนของเตาแบบหมุน……47
4.9 แผนภูมิแท่งแสดงต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ ในประเทศไทย……...55
4.10 สัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง……..…….. 56
4.11 สัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งแบบ Parallel Flow ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง…….... 57
4.12 สัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งแบบ Mixed Feedใช้ถ่านหินแอนทราไซต์เป็นเชื้อเพลิง……...……..58
4.13 สัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบหมุน (Rotary Kiln) ใช้ถ่านหินบิทูมินัสเป็นเชื้อเพลิง……...…….……59
4.14 แผนภูมิแท่งแสดง Cumulative Net Cash Flow ของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)….64
4.15 แผนภูมิแท่งแสดง Cumulative Net Cash Flow ของเตาตั้งแบบ Parallel Flow……..66
4.16 แผนภูมิแท่งแสดง Cumulative Net Cash Flow ของเตาตั้งแบบ Mixed Feed……68
4.17 แผนภูมิแท่งแสดง Cumulative Net Cash Flow ของเตาแบบหมุน (Rotary Kiln)……..70
5.1 เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Continuous Vertical Shaft Kiln) ที่ประเทศซิมบับเว……74
5.2 ผนังภายนอกของเตาตั้งที่มีลักษณะกางออกมาตรงด้านล่าง……..77
5.3 รายละเอียดโครงสร้างของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง……...81
5.4 ตัวอย่างข้อมูลของอุณหภูมิภายในเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องที่ประเทศซิมบับเว……..86
6.1 เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องสำหรับอุตสาหกรรมปูนขาวในประเทศไทย (กำลังการผลิตปูนสุก 3 ตันต่อวัน).....90
6.2 สัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Continuous Vertical Shaft Kiln)……..101
6.3 แผนภูมิแท่งแสดงต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง……102

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.4 แผนภูมิแท่งแสดง Cumulative Net Cash Flow ของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง……...105
6.5 กราฟวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของรายได้จากการขายปูนขาวและ ต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง……110
6.6 กราฟวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของรายได้จากการขายปูนขาวและ ต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้ง……112

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 หลักการและเหตุผลที่ทำการวิจัย

ปูนขาว เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมถลุงเหล็ก และอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น ซึ่งวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตปูนขาวคือ หินปูน (Limestone) ที่มีส่วนประกอบของแร่แคลไซต์ (Calcite : $CaCO_3$) หรืออาจจะรวมอยู่กับแร่โดโลไมต์ (Dolomite : $CaCO_3.MgCO_3$) ในปริมาณมากกว่าร้อยละ 50 ของส่วนประกอบทั้งหมด คือจะต้องมีแร่แคลไซต์มากกว่าแร่โดโลไมต์ ซึ่งหินปูนที่นำมาเป็นวัตถุดิบมีอยู่กระจัดกระจายทั่วทุกภาคของประเทศไทย ดังนั้นจึงพบอุตสาหกรรมปูนขาวทั่วไปในทุกภาคของประเทศไทย และจะพบมากในเขตจังหวัดภาคกลาง เช่น จังหวัดสระบุรีและราชบุรี (รายชื่อโรงงานปูนขาวในประเทศไทย แสดงไว้ในภาคผนวก ก)

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนขาว จะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ คือ ส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบจะต้องมีส่วนประกอบทางเคมีที่เหมาะสมกับประเภทอุตสาหกรรมที่นำปูนขาวไปใช้ เช่น ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็กและอุตสาหกรรมเคมี จะใช้ปูนขาวที่มีปริมาณของแคลเซียมที่สูง ดังนั้นต้องใช้หินปูนที่มีปริมาณของแคลเซียมสูงเป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนขาว เพื่อให้ตรงกับความต้องการของอุตสาหกรรมที่จะนำไปใช้ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกประการคือ ขนาดของวัตถุดิบที่ใช้ จะมีผลต่อเวลาในการเผาหินปูน (Calcination) โดยหินปูนที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะต้องใช้ระยะเวลานานมากในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงจุดที่ทำให้เกิด Calcination แต่ถ้ามีขนาดเล็กเกินไปจะมีพื้นที่ที่ทำให้อากาศไหลผ่านได้น้อย ทำให้อากาศในเตาปูนขาวผ่านสู่วัตถุดิบได้ไม่ทั่วถึง ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเผาไม่สมบูรณ์ ดังนั้นขนาดของวัตถุดิบต้องเลือกให้เหมาะสมกับประเภทของเตาปูนขาวที่นำมาใช้ เช่น เตาตั้ง (Vertical Shaft Kiln) จะพบว่าขนาดของหินปูนที่เหมาะสมจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 50 –100 มิลลิเมตร เป็นต้น

กระบวนการที่มีความสำคัญมากในการผลิตปูนขาวคือ Calcination เพราะเป็นกระบวนการที่มีอิทธิพลต่อปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและพลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนขาว รวมทั้งยังส่งผลต่อคุณภาพของปูนขาวที่ได้ และเกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตปูนขาว ซึ่งเทคโนโลยีเตาปูนขาวนับว่าเป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อ Calcination นอกจากนี้พบว่าเงินลงทุนเริ่มแรกส่วนใหญ่จะเป็นเงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาอย่างละเอียดในเรื่องของเทคโนโลยีเตาปูนขาวเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน และคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่นำพิจารณาในการเลือกประเภทของเทคโนโลยีเตาปูนขาว

การเลือกประเภทของเทคโนโลยีเตาปูนขาวให้เหมาะสมกับการผลิตปูนขาว โดยพิจารณาถึงข้อมูลทางเทคนิคของเทคโนโลยีเตาปูนขาวแต่ละประเภท เช่น กำลังการผลิตปูนขาวที่ต้องการ ประเภทของเชื้อเพลิงที่ใช้ อัตราการใช้พลังงาน เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว และการควบคุมเตาปูนขาว แต่ยังมีสิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาอีก คือ ชนิดและขนาดของหินปูนที่ใช้เป็นวัตถุดิบ คุณภาพของปูนขาวที่ได้ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกระบวนการผลิต ซึ่งเทคโนโลยีเตาปูนขาวแต่ละประเภทจะมีข้อจำกัด และข้อได้เปรียบทางเทคนิคที่แตกต่างกันไป (รายละเอียดของเทคโนโลยีเตาปูนขาว แสดงไว้ในบทที่ 3)

การผลิตปูนขาวของประเทศไทย จะพบว่าส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมปูนขาวขนาดเล็กและขนาดกลาง โดยมากเทคโนโลยีเตาปูนขาวที่ใช้ในการผลิตจะเป็นเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) เนื่องจากเงินลงทุนเริ่มแรกในการก่อสร้างที่ไม่สูงนัก และเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนทำให้ง่ายในการก่อสร้างเตาปูนขาว อีกทั้งการควบคุมเตาปูนขาวไม่จำเป็นต้องใช้คนงานที่มีทักษะสูงนัก ส่วนในอุตสาหกรรมปูนขาวขนาดใหญ่ ซึ่งพบไม่มากในประเทศไทย เทคโนโลยีเตาปูนขาวที่ใช้ในการผลิตจะเป็นเตาแบบเผาต่อเนื่อง (Continuous Kiln) โดยใช้เทคโนโลยีเตาปูนขาวจากต่างประเทศ คือ เตาตั้งแบบ Parallel Flow เตาตั้งแบบ Mixed Feed และเตาแบบหมุน (Rotary Kiln) ซึ่งมีอัตราในการใช้พลังงาน และประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาปูนขาวที่ดี แต่พบว่าเงินลงทุนในการก่อสร้างที่สูงมากอีกทั้งเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างซับซ้อน ทำให้ยากในการออกแบบและก่อสร้างเตาปูนขาว รวมถึงการควบคุมเตาปูนขาวจำเป็นต้องใช้คนงานที่มีทักษะสูง (รายละเอียดของเตาปูนขาวแต่ละแบบในประเทศไทยแสดงไว้ในบทที่ 4)

การวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปยังอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทยที่มีขนาดเล็กถึงขนาดกลาง ซึ่งมีกำลังการผลิตไม่สูงนัก (ผลิตปูนสุกไม่เกิน 10,000 ตันต่อปี) โดยมากเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตจะเป็นเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) จะพบว่ามีปัญหาในเรื่องประสิทธิภาพของเตาปูนขาวที่มีค่าต่ำ ทำให้สิ้นเปลืองในการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งกระบวนการผลิตปูนขาวจะพบว่ามากกว่าร้อยละ 50 ของต้นทุนในการผลิตจะเป็นค่าใช้จ่ายในด้านเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตนั้นสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่สำหรับผู้ประกอบการ อีกทั้งพบปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อมที่ไม่มีมาตรการที่จัดการเรื่องนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมากมักจะเป็นปัญหามลภาวะฝุ่นและควันดำที่เกิดจากกระบวนการผลิต

เพื่อแก้ปัญหาที่กล่าวมาจึงน่าจะมีความเป็นไปได้ในการสร้างประสิทธิภาพการใช้พลังงานและอัตราการใช้เชื้อเพลิงให้ดีขึ้น โดยการเปลี่ยนมาใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Continuous Vertical Shaft Kiln) ทดแทนเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีเตาปูนขาวที่ยังไม่มีผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทยนำมาใช้ ซึ่งน่าจะเหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่มีกำลังการผลิตที่ไม่สูงนัก โดยลักษณะการทำงานเป็นเตาแบบเผาต่อเนื่อง (Continuous Kiln) ที่มีการป้อนหินปูนสลับชั้นกันระหว่างถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง

(Mixed Feed) เข้าไปในเตาปูนขาว ทำให้ถ่านหินเผาไหม้แล้วให้ความร้อนกับหินปูนในแต่ละชั้นโดยตรง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น ทั้งยังลดปัญหาเรื่องมลภาวะทางอากาศ เช่น ลดปัญหาของก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์ ($SO_x$) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากปริมาณการใช้ถ่านหินที่น้อยลง และลดปัญหาของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตปูนขาวโดยใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Continuous Vertical Shaft Kiln) มีดังนี้คือ

1) เพื่อศึกษาถึงขั้นตอนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตปูนขาว โดยเฉพาะเทคโนโลยีเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทย

2) เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่มีต่อกระบวนการผลิตปูนขาวในเรื่องของพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต ประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน และต้นทุนในการผลิตของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทย โดยมุ่งเน้นวิจัยไปยังอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทยที่มีขนาดเล็กถึงกลางที่ใช้เตาแบบเผาทีละครั้งในการผลิต

3) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตปูนขาวโดยการเปลี่ยนมาใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องทดแทนเตาแบบเผาทีละครั้ง

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตปูนขาวโดยใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Continuous Vertical Shaft Kiln) ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยจะดำเนินการสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นและเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตปูนขาวในประเทศไทย โดยเฉพาะเทคโนโลยีของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทย และทำการศึกษา ค้นคว้า รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการผลิตปูนขาวที่ใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง แล้วจึงทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนขาว ประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน ข้อจำกัดและข้อได้เปรียบทางเทคนิค มลภาวะที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตปูนขาว รวมถึงต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาปูนขาวในแต่ละแบบให้ครบถ้วนสมบูรณ์ โดยมุ่งเน้นวิจัยความเป็นไปได้ที่จะเปลี่ยนมาใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องทดแทนเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมปูนขาวที่มีขนาดเล็กและกลางของประเทศไทย

## 1.4 วิธีการและขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตปูนขาวโดยใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง จะมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้ คือ

### 1.4.1 การรวบรวมข้อมูล

ทำการศึกษา และรวบรวมข้อมูลของกระบวนการผลิตปูนขาว เทคโนโลยีเตาปูนขาว ประเภทของเตาปูนขาวที่ใช้ในประเทศไทย และเทคโนโลยีเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง ซึ่งได้ข้อมูลจาก 2 แหล่ง ดังนี้คือ

1) ข้อมูลปฐมภูมิ โดยรวบรวมข้อมูลจากการสัมภาษณ์จากผู้ประกอบการ และใช้วิธีศึกษาดูงานจากการปฏิบัติงานจริงของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย

2) ข้อมูลทุติยภูมิ ทำการรวบรวมจากเอกสารทางวิชาการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง และจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม และ Website ที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น

### 1.4.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบ

นำข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ การสัมภาษณ์ และเอกสารทางวิชาการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย เพื่อนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกัน ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องทางวิศวกรรม และทางการเงิน

1) การวิเคราะห์และเปรียบเทียบทางวิศวกรรม สามารถที่จะแบ่งออกเป็น

(1) การวิเคราะห์และเปรียบเทียบด้านพลังงานที่ใช้ในการผลิต โดยนำข้อมูลที่เกี่ยวกับปริมาณเชื้อเพลิงและพลังงานที่ใช้ในการผลิตที่ได้รวบรวม มาทำการคำนวณและเปรียบเทียบอัตราการใช้เชื้อเพลิง พลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนขาว 1 กิโลกรัม และประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทยและเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง

(2) การวิเคราะห์และเปรียบเทียบด้านเทคนิค โดยนำข้อมูลของกระบวนการผลิตและเทคโนโลยีเตาปูนขาวที่ได้รวบรวม ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบถึงข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทยและเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นอัตราการผลิตปูนขาว ประเภทของเชื้อเพลิงที่ใช้ การควบคุมเตาปูนขาว เงินทุนในการก่อสร้างระบบในการผลิต และลักษณะของปูนสุกที่ได้ เป็นต้น

2) การวิเคราะห์และเปรียบเทียบทางการเงิน โดยนำข้อมูลเกี่ยวกับต้นทุนในการผลิต ไม่ว่าจะเป็นเงินทุนในก่อสร้าง ต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว และค่าแรงงาน เป็นต้น รวมถึงรายได้จากการขายปูนขาว นำข้อมูลทั้งหมดนี้มาคำนวณเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบทางการเงิน โดยทำการวิเคราะห์กระแสเงิน (Cash Flow Analysis) แล้วนำวิเคราะห์และเปรียบเทียบที่มีเกณฑ์ในการเปรียบเทียบเพื่อการตัดสินใจ คือ

- ค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV)
- อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return : IRR)
- ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

ผลการศึกษาของการวิเคราะห์กระแสเงิน (Cash Flow Analysis) ทำให้ได้เกณฑ์ในการตัดสินใจ ถึงกระนั้นก็ตามข้อมูลยังมีความไม่แน่นอน การเปลี่ยนแปลงของข้อมูล ย่อมจะมีผลกระทบต่อเกณฑ์การตัดสินใจ ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาความเป็นไปได้ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะวิเคราะห์โดยการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)

**1.4.3 สรุปผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบ**

นำข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบในทางวิศวกรรม และทางการเงิน เพื่อหาข้อสรุปว่า เทคโนโลยีเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทยมีปัญหาที่เกิดขึ้นในด้านใด รวมทั้งข้อเสนอแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่พบ และประเมินความเป็นไปได้ของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องว่าเป็นไปได้และคุ้มค่าพอที่จะนำมาทดแทนเตาปูนขาวที่ใช้ในประเทศไทยหรือไม่

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตปูนขาวโดยใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องมีดังนี้คือ

1) สามารถนำข้อมูลที่ได้จาการศึกษามาเป็นเครื่องมือใช้ในการพิจารณาและตัดสินใจให้แก่ผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมปูนขาวในประเทศไทย ในการเลือกประเภทของเตาปูนขาวแต่ละแบบให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2) สามารถนำข้อมูลที่ทำการศึกษาไปเป็นแนวทางการเสริมสร้างศักยภาพให้แก่ผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทย

3) เป็นแนวทางที่จะผลิตปูนขาวโดยใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องเพื่อใช้ได้จริงในอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 2

# กระบวนการผลิตปูนขาว

กระบวนการผลิตปูนขาว จะเริ่มจากการเตรียมหินปูนที่นำใช้เป็นวัตถุดิบให้เหมาะสำหรับการเผา เช่น การทำเหมืองหินปูน การเก็บสำรองหินปูน การย่อยหินปูน การคัดขนาดของหินปูน เป็นต้น จากนั้นทำการเผาหินปูน (Calcination) เพื่อให้ได้ปูนสุก (Quicklime) ก่อน แล้วจึงนำเอาปูนสุกที่ได้มาทำปฏิกิริยากับน้ำ (Hydration) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยานี้ คือ ปูนขาว (Hydrated Lime หรือ Slaked Lime) รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของกระบวนการผลิตปูนขาว

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า กระบวนการผลิตปูนขาวจะประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ การผลิตปูนสุก (Quicklime) และการผลิตปูนขาว (Hydrated Lime หรือ Slaked Lime)

## 2.1 การผลิตปูนสุก (Quicklime)

การผลิตปูนสุก จะมีกระบวนการที่สำคัญคือ การเผาหินปูน (Calcination) เพื่อให้ได้ปูนสุก ซึ่งในการเกิด Calcination มีสิ่งที่จะต้องพิจารณาถึง ดังนี้คือ

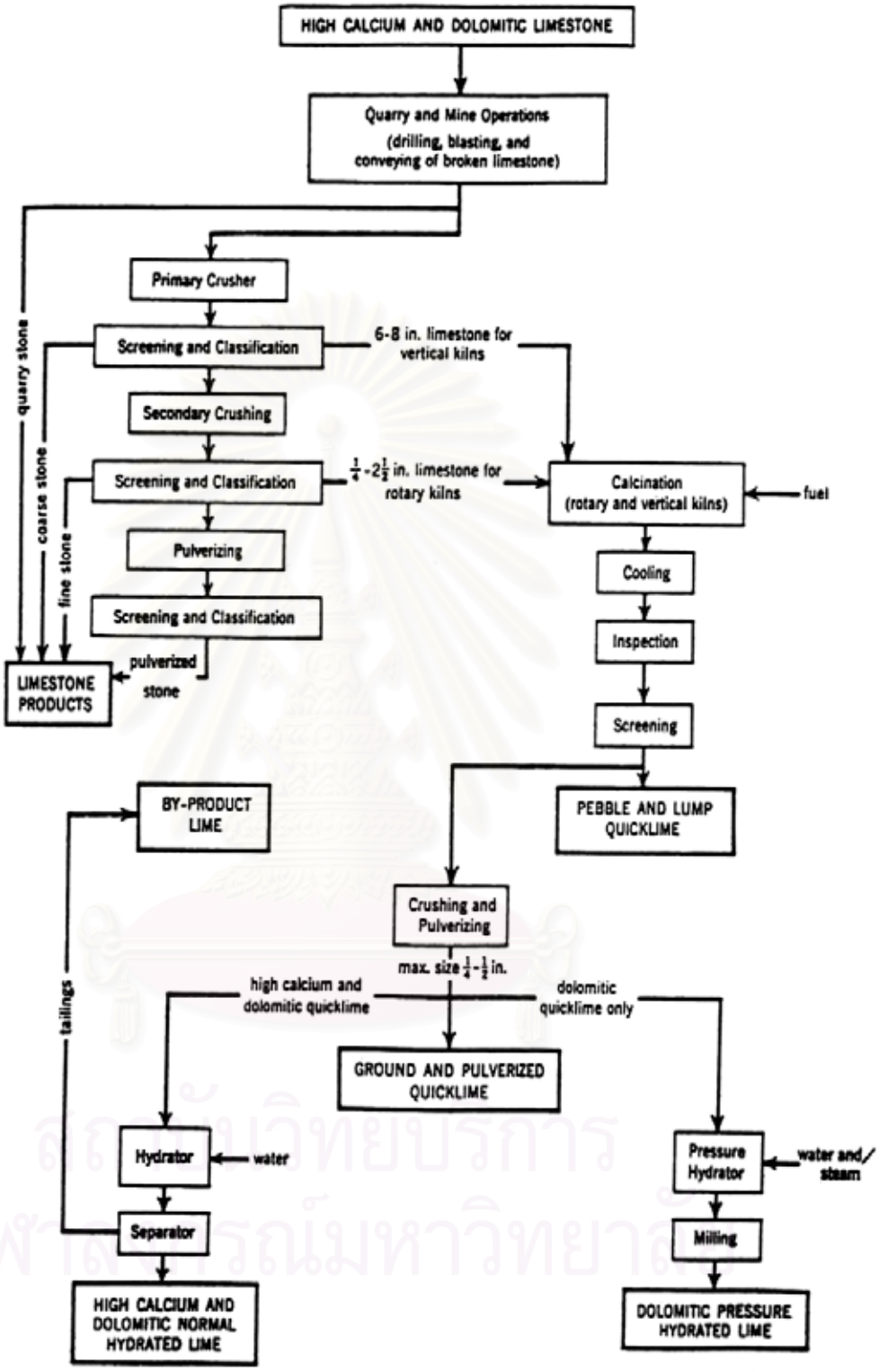
### 2.1.1 ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในการเผาหินปูน (Calcination)

ขั้นตอนที่สำคัญในการผลิตปูนสุก คือ Calcination เป็นการเผาหินปูนเพื่อให้ได้ปูนสุก สามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้ คือ

$$CaCO_3 + \text{ความร้อน} \leftrightarrow CaO + CO_2$$

$$CaCO_3.MgCO_3 + \text{ความร้อน} \leftrightarrow CaO.MgO + 2CO_2$$

จากสมการเคมีข้างต้น จะเห็นได้ว่า ปูนสุก (Quicklime) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก Calcination วัตถุดิบที่เป็นหินปูนที่มีส่วนประกอบของแร่แคลไซต์ (Calcite : $CaCO_3$) หรืออาจจะมีแร่โดโลไมต์ (Dolomite : $CaCO_3.MgCO_3$) โดยปฏิกิริยาจะเริ่มจากผิวด้านนอกของหินปูนแล้วผ่านเข้าไปยังแกนกลางของหินปูน ขณะที่เกิด Calcination จะพบว่ามีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) เกิดขึ้นในปฏิกิริยา ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้จะประกอบไปด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นส่วนใหญ่ อาจจะเป็นปูนสุกแคลเซียมออกไซด์ (CaO) หรือเรียกว่า High Calcium Quicklime ที่ได้จากการเผา High Calcium Limestone คือ หินปูนที่ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยแร่แคลไซต์มากกว่าร้อยละ 95 หรืออาจจะเป็นปูนสุกแคลเซียมแมกนีเซียมออกไซด์ (CaO.MgO) หรือเรียกว่า Dolomitic Quicklime ที่ได้จากการเผา Dolomitic Limestone คือ หินปูนที่มีส่วนประกอบของแร่โดโลไมต์

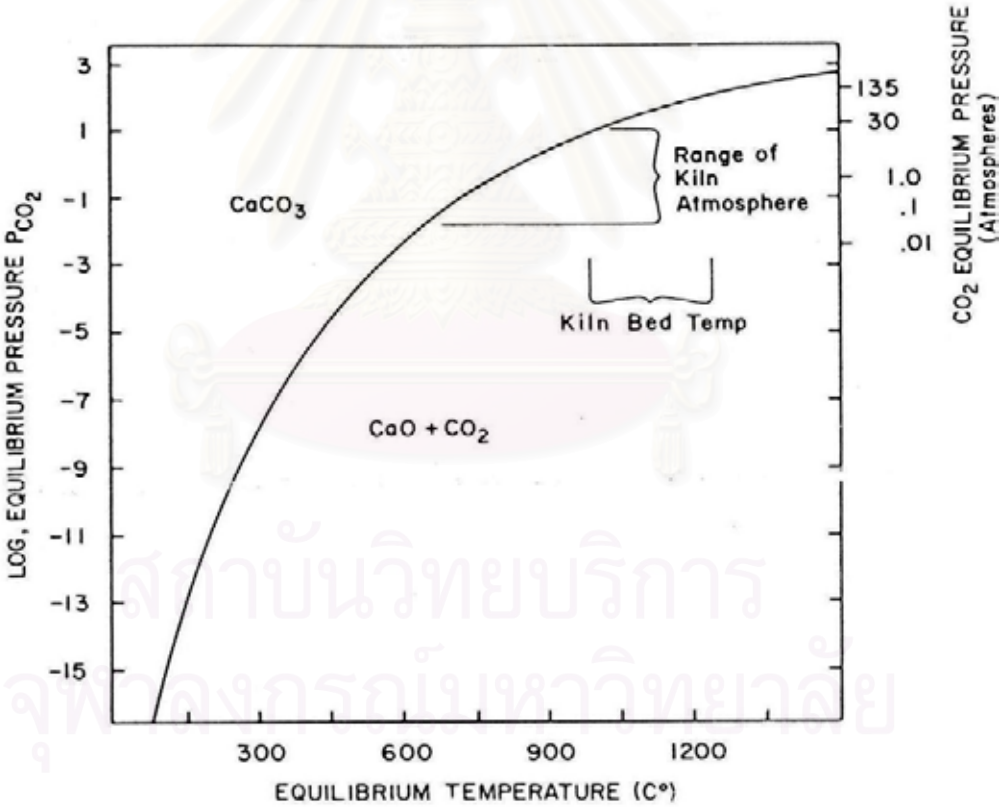



ที่มา : R. S. Boynton, 1980

**รูปที่ 2.1 ตัวอย่างของกระบวนการผลิตปูนขาว**

การเผาหินปูนเพื่อให้ได้ปูนสุก จะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) เกิดขึ้น ซึ่งมีผลทำให้น้ำหนักของหินปูนหายไป โดยเรียกร้อยละของน้ำหนักที่หายไปนี้ว่า Loss On Ignition (LOI) ซึ่งการเผาหินปูนหรือแร่โดโลไมต์ให้เป็นปูนสุกจะมีน้ำหนักหายไปประมาณร้อยละ 44 – 48 (ในการผลิตปูนสุก 1 ตัน จะต้องใช้หินปูนหนักระหว่าง 1.8 – 1.9 ตัน เพื่อนำมาเผา หรืออาจคิดง่าย ๆ คือ ใช้หินปูนประมาณ 2 ตัน) ปูนสุกที่เผาได้นั้นมีลักษณะเป็นก้อน บางทีจึงเรียกว่า ปูนก้อน (Lump Lime หรือ Lump Quicklime)

รูปที่ 2.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผากับความดันที่เกิดขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ในบรรยากาศ ซึ่งพบว่า ถ้าปฏิกิริยาเกิด Calcination ขึ้นตรงส่วนล่างของกราฟนี้ แล้วปฏิกิริยาจะเกิดไปข้างหน้าคือ หินปูนถูกเผากลายเป็นปูนสุก (Quicklime) ในขณะเกิดตรงส่วนบนของกราฟนี้ ปฏิกิริยาที่เกิดจะผันกลับกลายเป็นแร่แคลไซต์ โดยมีเพียงที่อยู่บนกราฟ จึงจะเกิดภาวะสมดุลคือ ไม่เกิดปฏิกิริยาทั้งไปข้างหน้าและผันกลับ ซึ่งเตาปูนขาวส่วนมากจะทำการผลิตที่อุณหภูมิ 1,000 – 1,500°C




ที่มา : R. S. Boynton, 1980

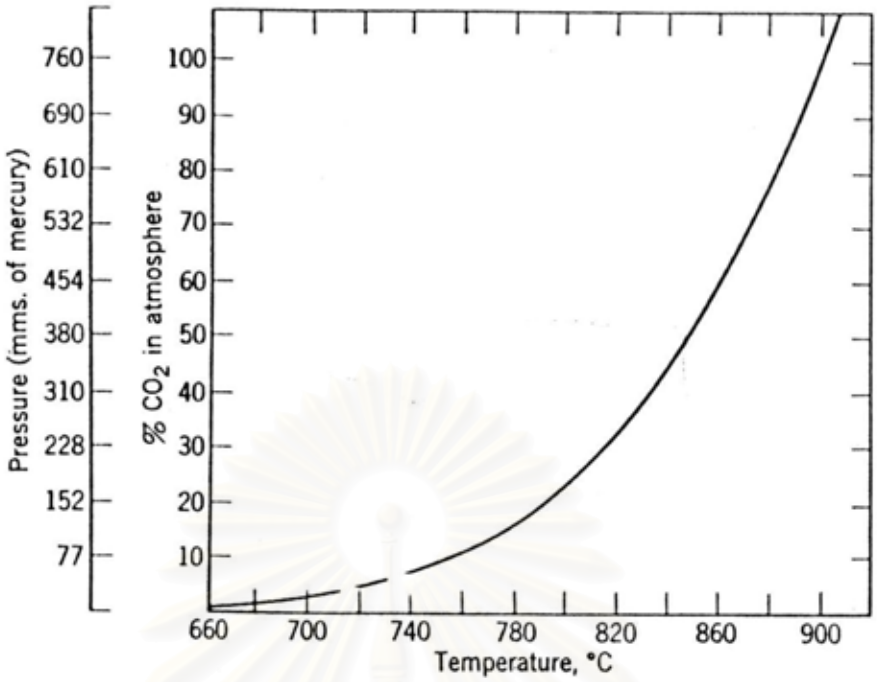
**รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผากับความดันที่เกิดขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ในกระบวนการเผาหินปูน (Calcination)**

**2.1.2 อุณหภูมิในการแยกตัว (Dissociation Temperature)**

การแยกตัว (Dissociation) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ออกจากหินปูนกลายเป็นปูนสุก (Quicklime) จะเริ่มต้นจากผิวนอกเข้าสู่แกนกลางของหินปูน ซึ่งพบว่าอุณหภูมิในการแยกตัวที่ผิวนอกของ High Calcium Limestone อยู่ที่ประมาณ 742°C (V. J. Azbe, 1939) แต่การแยกตัวเข้าสู่ด้านในของหินปูนจะต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าในการแยกตัว และใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นเพื่อทำให้เกิดการแยกตัวที่แกนกลางของหินปูน (ในทางปฏิบัติอุณหภูมิในการแยกตัวจะสูงกว่านี้) ซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมิในการแยกตัวที่บริเวณผิวนอก และแกนกลางของหินปูนอาจจะมีค่าประมาณ 150 – 370°C ขึ้นอยู่กับขนาดของหินปูนที่ใช้เป็นวัตถุดิบ และเมื่อพิจารณาถึงขนาดของหินปูนที่ใช้ จะพบว่าหินปูนที่มีขนาดใหญ่จะต้องใช้อุณหภูมิในการแยกตัวที่บริเวณแกนกลางของหินปูนให้มีค่าสูงเพียงพอที่จะเพิ่มความดันภายใน เพื่อให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) แยกตัวออกมา เมื่อเปรียบเทียบกับหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่าที่มีส่วนประกอบเหมือนกันจะใช้อุณหภูมิในการแยกตัวที่บริเวณแกนกลางของหินปูนมีค่าต่ำกว่า

อุณหภูมิและอัตราในการแยกตัวจะพบว่าไม่มีค่าตายตัวเสมอไป แต่มีค่าเปลี่ยนไปตามปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความดันและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ที่แยกตัวออกมา โดยจะพบว่า ถ้าอุณหภูมิและความดันอยู่ในภาวะสมดุล แล้วการแยกตัว (Dissociation) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ออกจากหินปูนจะคงที่ แต่ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงในปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความดันและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ลดลง หรืออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น จะส่งผลทำให้หินปูนเกิดการแยกตัว ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) พร้อมกันกับการรวมตัวเกิดเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รูปที่ 2.3 เป็นกราฟแสดงอิทธิพลของความเข้มข้นและความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ที่มีต่ออุณหภูมิในการแยกตัว (Dissociation Temperature) ของแร่แคลไซต์ (Calcite : $CaCO_3$)

อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาที่เกิด Calcination เป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ ซึ่งเรียกกระบวนการที่ผันกลับนี้ว่า Recarbonation โดยจะเกิดเมื่อทำการเผาหินปูนที่เป็นก้อนขนาดใหญ่ ความร้อนจากภายนอกที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะไหลผ่านแทรกเข้าไปในบริเวณใกล้แกนกลาง ทำให้เกิดการแยกตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ส่งผลให้ความดันเริ่มมากขึ้น ซึ่งอาจจะสูงกว่าความดันบรรยากาศถึง 100 psi และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความดันสูงขึ้นตามไปด้วย จนทำให้ผิวนอกของหินปูนเมื่อถูกเผาสุกเกินไป (Overburnt) ส่งผลให้หินปูนหดตัวลง และช่องว่างภายในที่ให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ไหลผ่านออกมาถูกปิดหรือทำให้แคบลง ถ้าปูนสุกถูกปล่อยออกมาจากเตาปูนขาวและถูกทำให้เย็นตัวก่อนที่แกนกลางทั้งหมดจะถูกเผา จะทำให้เกิดการแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) จากแกนกลางที่ยังร้อนอยู่ และจะถูกดูดซับที่บริเวณผิวนอกของปูนสุกที่เย็นตัวลง ดังนั้นความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) สูง ทำให้อุณหภูมิในการแยกตัวมีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ไหลผ่านออกมาสู่ภายนอกได้รวดเร็ว




ที่มา : V. J. Azbe, 1939

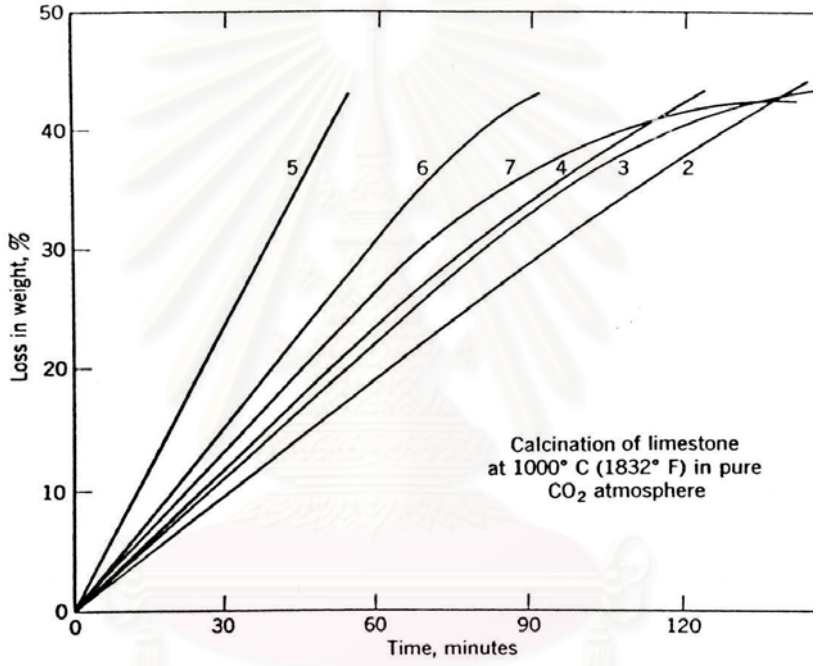
**รูปที่ 2.3 กราฟแสดงอิทธิพลของความเข้มข้นและความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ที่มีต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการแยกตัวของแร่แคลไซต์ (Calcite : $CaCO_3$)**

การเผาหินปูนต้องรักษาระดับอุณหภูมิการเผาให้คงที่ในระดับที่ต้องการ ทั้งยังต้องคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ในการเผารวมถึงสูญเสียไปในระหว่างการรับหินปูนและการจ่ายปูนสุกเมื่อเผาเสร็จแล้ว การควบคุมกระบวนการเผาจะต้องควบคุมไม่ให้เกิดภาวะยังไม่สุก (Underburnt) และภาวะสุกเกินไป (Overburnt) โดยภาวะยังไม่สุก (Underburnt) คือ ภาวะที่ให้พลังงานแก่หินปูนน้อยเกินไป อาจเกิดจากเวลาที่ใช้ในการเผาน้อยเกินไปหรืออุณหภูมิที่ใช้ในระหว่างการเผาต่ำไปหรือทั้งสองอย่าง ภาวะเช่นนี้หินปูนจะไม่ถูกเปลี่ยนเป็นปูนสุก และไม่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำเพื่อให้ได้ปูนขาว ส่วนภาวะสุกเกินไป (Overburnt) คือ ภาวะที่หินปูนถูกเผาที่อุณหภูมิสูงเกินไป ส่งผลกระทบให้หินปูนหดตัว และพื้นที่ผิว (Surface Area) ของอนุภาคไม่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำเพื่อให้ได้ปูนขาว

### 2.1.3 อัตราของการแยกตัว (Rate of Dissociation)

จะพบว่า ถ้ายิ่งใช้อุณหภูมิในการเผาที่สูง และระยะเวลาในการเผาที่นาน แล้วทำให้ปูนสุกที่ได้เป็นแบบสุกมาก (Hard Burn) คือ ปูนสุกจะมีการหดตัวมาก ความหนาแน่นที่สูง ช่องว่างภายในปูนสุกมีน้อยลง และมีความสามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีที่ต่ำ ในทางกลับกันถ้าใช้อุณหภูมิในการเผาที่ต่ำ และ/หรือระยะเวลาในการเผาที่สั้น แล้วทำให้ปูนสุกที่ได้เป็นแบบสุกพอดี (Soft Burn) คือ ปูนสุกจะมีการหดตัวน้อย ความหนาแน่นที่ต่ำ มีช่องว่างภายในปูนสุกมาก และมีความสามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีที่สูง

R. Hedin (1954) ได้ทำการทดลองเผาตัวอย่างที่เป็นหินปูนชนิดต่างกัน 7 ตัวอย่างมาย่อยให้มีขนาดเท่ากันในช่วง 15 ─ 20 มิลลิเมตร แล้วทำการเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิเท่ากันคือ 1,000°C ใน 100% $CO_2$ ของความดันบรรยากาศ จนกระทั่งเกิดการแยกตัว (Dissociation) อย่างสมบูรณ์ แล้ววัดค่า Loss On Ignition (LOI) ที่เกิดขึ้น ในรูปที่ 2.4 แสดงค่า Loss On Ignition (LOI) ในอัตราของการแยกตัวที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะพบว่าตัวอย่างที่ 2 และ 3 เป็นหินปูนที่มีความหนาแน่นสูงและผลึกที่หยาบ จะมีอัตราของการแยกตัวที่ช้ามาก และตัวอย่างที่ 6 และ 7 เป็นหินปูนที่มีผลึกละเอียด จะมีอัตราของการแยกตัวที่รวดเร็ว ส่วนตัวอย่างที่มีอัตราของการแยกตัวเร็วที่สุดคือตัวอย่างที่ 5 เป็นหินปูนที่แน่น มีผลึกละเอียดมาก และมีส่วนประกอบของอินทรีย์วัตถุปน




ที่มา : R. Hedin, 1954

**รูปที่ 2.4 กราฟแสดงอัตราของการแยกตัวที่เปลี่ยนไปในตัวอย่างที่เป็นหินปูนแต่ละชนิด**

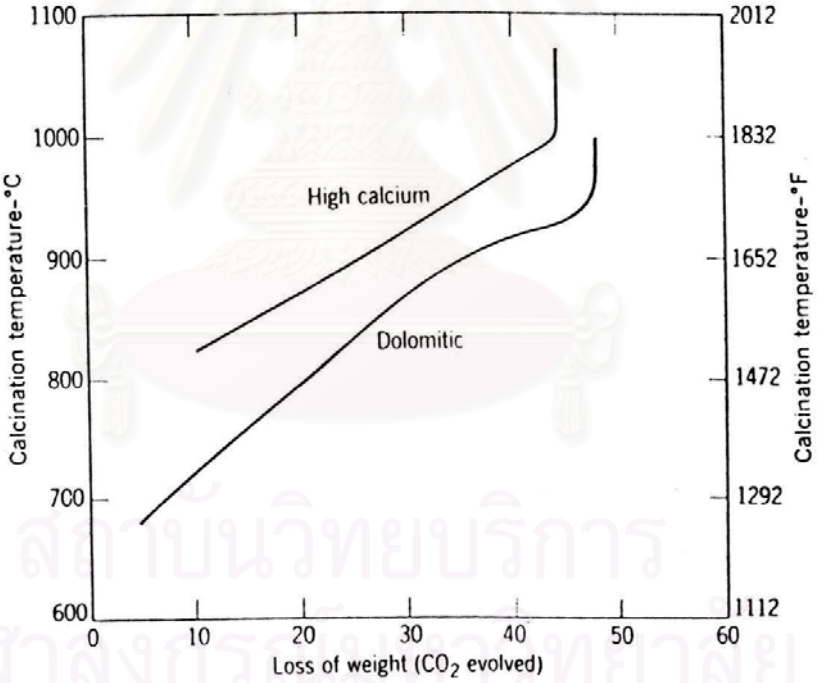
จากผลการทดลองนี้ R. Hedin ได้อธิบายว่า หินปูนที่มีผลึกหยาบ และมีโครงสร้างของอนุภาคที่แน่น จะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ถูกปล่อยออกมาได้ช้า เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่แน่นหนาทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ออกมาได้ยาก ซึ่งการที่จะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ออกมาได้ จะต้องทำให้ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ภายในผลึกมีค่าสูงกว่าความดันภายนอก อย่างไรก็ตาม จะพบว่าตัวอย่างที่ 2 ที่เป็นหินปูนที่มีความหนาแน่นมากไม่ได้ถูกเผาให้เป็นรอยแตกในเนื้อของหินปูนระหว่างช่วงของการอุ่นวัตถุดิบ แต่ตัวอย่างที่ 3 ถูกเผาให้เป็นรอยแตก ซึ่งรอยแตกนี้จะก่อให้เกิดการสลายตัวมากกว่าตัวอย่างที่ 2 เป็นผลทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ผ่านออกมาจากรอยแตกที่เกิดขึ้นได้ และอัตราของ

การแยกตัวที่เร็วที่สุดในตัวอย่างที่ 5 เนื่องจากเมื่อผลึกของหินปูนที่มีส่วนประกอบของอินทรีย์วัตถุปนอยู่ได้รับความร้อน จะทำให้เกิดโครงสร้างผลึกที่หลวม ๆ และมีรูพรุนสูง เป็นผลทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ผ่านออกมาได้ง่าย

ดังนั้นอัตราของการแยกตัวจะเกิดขึ้นได้เร็ว เมื่อหินปูนที่ใช้เป็นวัตถุดิบต้องมีรูพรุนสูง หรือรอยแตกในเนื้อของหินปูน สามารถที่จะเป็นช่องทางให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ผ่านออกมาได้ ซึ่งในทางตรงข้าม อัตราของการแยกตัวจะเกิดขึ้นได้ช้า เมื่อหินปูนที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีรูพรุนน้อย ทำให้ช่องทางที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ผ่านออกมาได้ยาก

**2.1.4 น้ำหนักที่หายไป (Loss On Ignition : LOI)**

เมื่อทำการเผาแร่แคลไซต์ (Calcite : $CaCO_3$) ที่บริสุทธิ์ จะพบว่า ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปหรือ Loss On Ignition (LOI) ประมาณร้อยละ 44 ซึ่งเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ที่แยกตัวออกมา ส่วนการเผาแร่โดโลไมต์ (Dolomite : $CaCO_3.MgCO_3$) จะมี Loss On Ignition (LOI) มากกว่านี้คือ ประมาณร้อยละ 52.2 โดยรูปที่ 2.5 แสดง Loss On Ignition (LOI) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิในการแยกตัว




ที่มา : R. S. Boynton, 1980

**รูปที่ 2.5 กราฟแสดงLoss On Ignition (LOI) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิในการแยกตัว**

H. K. Linzell et al. (1926) ได้กล่าวว่า แม้ว่าจะเกิด Calcination อย่างสมบูรณ์ แต่ก็จะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) อยู่ในเนื้อของปูนสุก แม้ว่าหินปูนถูกเผาจนปูนสุกที่ได้เป็นแบบสุกมาก (Hard Burn) จะไม่มีแกนกลางคงอยู่ภายในเนื้อของปูนสุก แต่อาจจะมีพื้นผิวบางส่วนที่ดูด

ซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ได้ เป็นเพราะเกิด Recarbonation จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) จากการเผาไหม้อยู่มากมายกระจายรอบ ๆ ปูนขาวภายในเตาปูนขาว ซึ่งถ้าทำการเผาให้มีประสิทธิภาพ จะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ที่เกิดจากการเผาไหม้นี้มีปริมาณลดลงและออกมาภายนอกได้รวดเร็ว ดังนั้น Recarbonation จากกระบวนการดังกล่าว จึงเกิดขึ้นน้อย ทำให้ลดปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ลงเหลือประมาณร้อยละ 0.1 – 0.2 ของส่วนประกอบทั้งหมดในเนื้อปูนสุกที่ได้

ปัจจัยที่ทำให้การเกิด Recarbonation ขึ้นมากในเตาปูนขาวคือ อุณหภูมิในการเผาที่สูงเกินไป การกระจายตัวที่ไม่แน่นอนของก๊าซที่เกิดจากเผาไหม้อยู่รอบ ๆ หินปูนในช่วงของการเผา ความแตกต่างในการแลกเปลี่ยนความร้อน การกระจายตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ในหม้อเย็น (Cooler) ที่ไม่มีประสิทธิภาพที่ดีพอในการระบายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ออกจากเตาปูนขาว และระยะเวลานานเกินไปในการทำให้ปูนสุกเย็นตัวลง เมื่อเกิด Recarbonation ขึ้นมากจะทำให้ปูนสุกที่ได้จากการเผามีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในส่วนประกอบน้อยลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ตรงตามความต้องการของอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น อุตสาหกรรมถลุงเหล็ก และอุตสาหกรรมเคมี ซึ่งต้องการปูนขาวที่มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่สูง

**2.1.5 การหดตัว (Shrinkage)**

ในเรื่องนี้ J. A. Murray (1954) ได้ทำการทดลองกับตัวอย่างที่เป็น High Calcium Limestone ที่มีความหนาแน่น และโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน 43 ตัวอย่าง นำมาเผาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 4 ช่วง (โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีค่าตั้งแต่ 954 – 1,354°C) ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดถูกเผาให้เกิด Calcination อย่างสมบูรณ์โดยใช้เตาเผาระบบไฟฟ้า (Electric Muffle Furnace) จะพบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีการหดตัวมากขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้น ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะและขนาดของผลึกกับการหดตัว โดยพบว่าตัวอย่างที่มีผลึกหยาบจะมีการหดตัวที่สูง ส่วนตัวอย่างที่มีผลึกละเอียดจะมีการหดตัวที่น้อยกว่า ซึ่งสามารถที่จะคำนวณหาค่าการหดตัวของปูนสุกจากสูตรดังต่อไปนี้คือ

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

โดยที่ S = Shrinkage

$D_S$ = Bulk Density of Limestone

$D_L$ = Bulk Density of Quicklime

L = Loss On Ignition (LOI)

การขยายและการหดตัวจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างในเรื่องของขนาดผลึกและอุณหภูมิในการแยกตัว (Dissociation Temperature) ของหินปูนที่นำมาใช้ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาจะเป็นปัจจัยสำคัญต่อหินปูนที่มีผลึกขนาดใหญ่ และความหนาแน่นสูง มากกว่าหินปูนที่มีผลึกขนาดเล็กและรูพรุนสูง เป็นเพราะการเกิดรอยแตกในหินปูนที่มีผลึกขนาดใหญ่เมื่อมีการขยายตัว ซึ่งเมื่อเสร็จสิ้นการเกิด Calcination รอยแตกนี้จะไม่ถูกปิด แต่ในหินปูนที่มีผลึกละเอียดจะไม่พบรอยแตกที่เกิดจากการขยายตัว

**2.1.6 ความพรุน (Porosity) และความหนาแน่น (Density)**

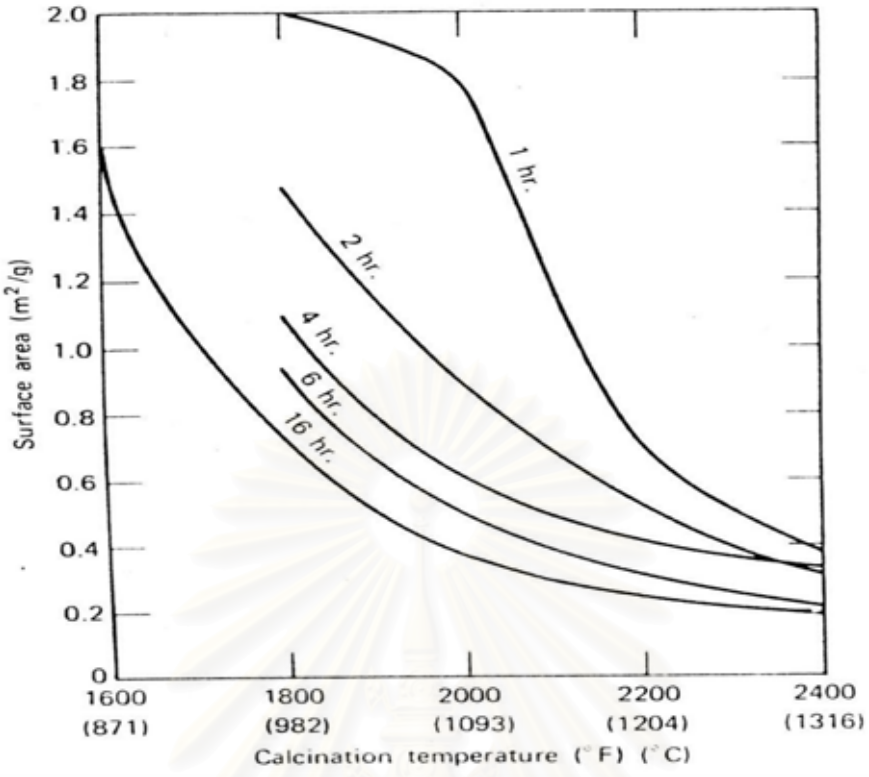
ปัจจัยของความพรุน ความหนาแน่น และการกระจายตัวของขนาดรูพรุน จะมีความสัมพันธ์กับความสามารถที่จะทำปฏิกิริยา (Reactivity) การกระจายตัวของขนาด และพื้นผิวของปูนขาว (Hydrated Lime) ซึ่งพบว่าปูนขาวที่มีรูพรุนจะมีการหดตัวน้อย ส่วนปูนขาวที่มีความหนาแน่นสูงและมีรูพรุนน้อย จะมีการหดตัวสูง

การทดลองของ J. A. Murray (1956) โดยนำตัวอย่างที่เป็นแร่แคลไซต์มาเผาที่อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเผาที่แตกต่างกัน พบว่าระยะเวลาในการเผาเพียง 1 ─ 4 ชั่วโมงจะมีผลน้อยมากหรือไม่มีผลกระทบกับค่าของความพรุน พื้นที่ผิว หรือความสามารถที่จะทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิในการเผา 954 ─ 1,066°C ซึ่งได้พบอีกว่า ถ้าปูนสุก 2 ชนิดที่มีค่าความพรุนที่เหมือนกัน แต่รูพรุนของปูนสุกชนิดแรกมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1,000 Å และปูนสุกอีกชนิดหนึ่งมีขนาดของรูพรุน 40 Å จะพบว่า พื้นที่ผิวภายในของปูนสุกชนิดแรกจะมีมากกว่าปูนสุกอีกชนิดหนึ่งเพียงร้อยละ 4

การหดตัวและความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อผลึกในโมเลกุลของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ขยายตัวใหญ่ขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกับการแยกตัว โดย R. Hedin (1961) ได้ทำการทดลองเผาแร่แคลไซต์ เมื่อถึงอุณหภูมิที่เริ่มการแยกตัวที่ 900°C พบว่ามีขนาดของผลึกประมาณ 0.1 μm และที่อุณหภูมิ 1,000°C ขนาดของผลึกเริ่มขยายเป็น 1 μm จะเริ่มเชื่อมต่อกัน จนถึงอุณหภูมิ 1,100°C ผลึกที่เชื่อมต่อกันรวมตัวกัน เนื่องจากเกิดพันธะที่แข็งแรงระหว่างผลึกเมื่อมีอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น

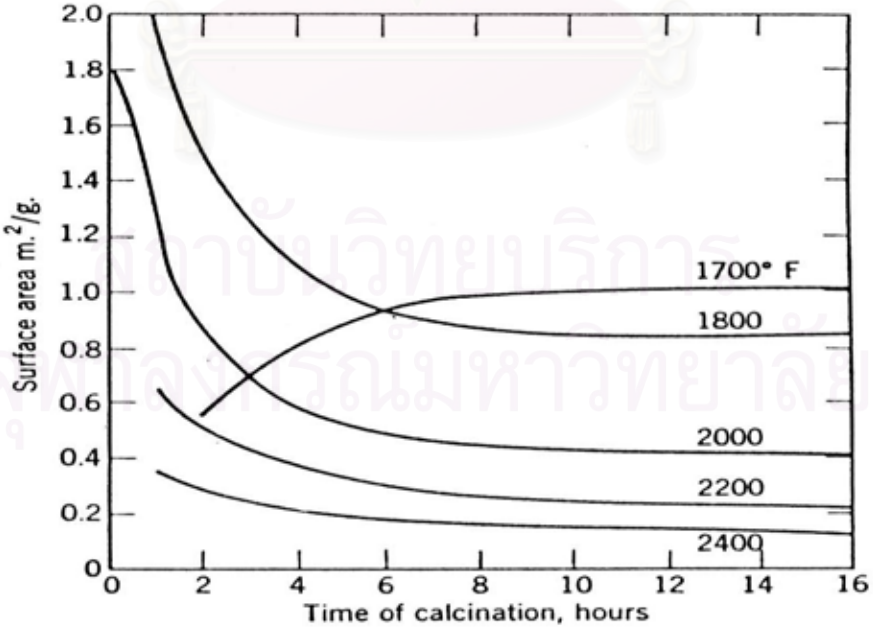
ความถ่วงจำเพาะที่แท้จริงของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีค่าเท่ากับ 3.34 ─ 3.40 ซึ่งเป็นค่าในทางทฤษฎีของปูนสุกที่บริสุทธิ์ที่ถูกเผาสมบูรณ์ มีการหดตัวที่พอเหมาะ และไม่มีความพรุนเกิดขึ้น ทำให้ปูนสุกที่ได้ไม่สามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ ซึ่งการเผาที่ดีนั้นต้องให้ปูนสุกที่ได้มีความพรุนสูงที่สามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ และความถ่วงจำเพาะจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.45 ─ 1.65 ทำให้มีความพรุนมากกว่าร้อยละ 50 (V. J. Azbe, 1939) ในทางปฏิบัตินั้นจะพบว่า เป็นการยากที่จะผลิตปูนขาวให้มีความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วงนี้ทั้งหมด

โดยรูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของปูนสุกที่ได้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาหินปูน และรูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของปูนสุกที่ได้กับระยะเวลาที่ใช้ในการเผาหินปูน




ที่มา : J. A. Murray , 1956

**รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของปูนสุกที่ได้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา**




ที่มา : J. A. Murray , 1956

**รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของปูนสุกที่ได้กับระยะเวลาที่ใช้ในการเผา**

## 2.2 การผลิตปูนขาว (Hydrated Lime หรือ Slaked Lime)

การผลิตปูนขาวจะมีกระบวนการที่สำคัญคือ การนำปูนสุก (Quicklime) ที่ได้จากการเผา (Calcination) มาทำปฏิกิริยากับน้ำ (Hydration) ซึ่งในการเกิด Hydration เพื่อให้ได้ปูนขาว (Hydrated Lime หรือ Slaked Lime) มีสิ่งที่จะต้องพิจารณาถึง ดังนี้คือ

### 2.2.1 ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นใน Hydration

เนื่องจาก Calcination เป็นกระบวนการที่ผันกลับได้จึงทำให้ปูนสุกค่อนข้างไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งปูนสุกจะไม่ค่อยเสถียรและเมื่อเติมน้ำเข้าไปในปริมาณที่เหมาะสม จะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับน้ำ (Hydration) ทำให้เกิดปูนขาว สามารถเขียนเป็นสมการทางเคมี คือ

$$CaO + H_2O \leftrightarrow Ca(OH)_2 + \text{ความร้อน}$$

$$CaO.MgO + 2H_2O \leftrightarrow Ca(OH)_2.MgO + \text{ความร้อน}$$

$$CaO.MgO + 2H_2O + \text{ความดัน} \leftrightarrow Ca(OH)_2.Mg(OH)_2 + \text{ความร้อน}$$

จะเห็นได้ว่า ปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวจะมีความร้อนเกิดขึ้น (Exothermic Reaction) ซึ่งความร้อนที่ออกมาอาจสูงถึง 123.5 kcal/kg ผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้จะเรียกว่า ปูนขาว หมายถึง ผงแห้งที่ได้จากการผสมปูนสุกกับน้ำพอที่จะรวมตัวกันเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่ง High Calcium Quicklime (CaO) จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้ง่ายกว่า Dolomitic Quicklime (CaO.MgO) เป็นเพราะใน Dolomitic Quicklime มีส่วนประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ที่ถูกเผาจนปูนสุกเป็นแบบสุกมาก (Hard Burn) ทำให้ต้องการความดันเพื่อให้เกิด Hydration อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามถ้านำ Dolomitic Quicklime (CaO.MgO) ที่ได้จากการเผาแร่โดโลไมต์ (Dolomite : $CaCO_3.MgCO_3$) บริสุทธิ์และมีขนาดเล็ก (ขนาดเล็กกว่า 25 มิลลิเมตร) ที่อุณหภูมิในการเผาที่ต่ำ สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดปูนขาวภายใต้ความดันบรรยากาศ

### 2.2.2 ปริมาณของน้ำที่ใช้ในการผลิต

จากกระบวนการผลิตปูนขาวที่ต้องใช้น้ำเป็นส่วนประกอบ ซึ่งในทางทฤษฎีจะพบว่าเมื่อเกิด Hydration อย่างสมบูรณ์ ถ้าใช้ High Calcium Quicklime (CaO) ปริมาณ 100 ส่วน จะใช้น้ำ 24.30 ส่วน และถ้าใช้ Dolomitic Quicklime (CaO.MgO) ปริมาณ 100 ส่วน จะใช้น้ำ 27.20 ส่วน

ในทางปฏิบัติจะใช้ปริมาณของน้ำมากกว่าทางทฤษฎี เพื่อทำให้เกิด Hydration อย่างสมบูรณ์ขึ้น เนื่องจากจะมีปริมาณของน้ำส่วนหนึ่งระเหยไปจากความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิด Hydration ซึ่งปริมาณของน้ำที่น้อยที่สุดในทางปฏิบัติที่ทำให้เกิด Hydration อย่างสมบูรณ์สำหรับ High Calcium Quicklime (CaO) คือ ร้อยละ 52 ของน้ำหนักปูนสุกที่ใช้ โดยปริมาณของน้ำที่ใช้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์และความสามารถในการปฏิกิริยาของปูนสุกที่ใช้

ความจริงแล้ว ปูนขาวจะมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำที่นำไปใช้ในการทำปฏิกิริยากับปูนสุก ซึ่งรูปแบบของปูนขาวอาจแบ่งออกได้เป็น

**1) Dry Hydrate** เป็นรูปแบบที่พบโดยทั่วไป มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ส่วนใหญ่จะมีส่วนประกอบของออกไซด์ประมาณร้อยละ 72 – 74 สำหรับ High Calcium Hydrated Lime ส่วน Dolomitic Hydrated Lime จะมีส่วนประกอบของออกไซด์ประมาณร้อยละ 69 – 71 โดยจะมีเพียง Normal Dolomitic Hydrated Lime เท่านั้นที่ใช้น้ำในปริมาณน้อยมากในการผลิตปูนขาว (คือประมาณร้อยละ 16) เนื่องจากเกิด Hydration เฉพาะองค์ประกอบที่เป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โดยปกติแล้วการผลิตปูนขาวจะใช้น้ำในปริมาณเกินพอคือ ในปูนสุก 1 ส่วน จะใช้น้ำ 0.5 – 0.75 ส่วน

**2) Lime Putty** เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผสมปูนสุกกับน้ำจนได้ความข้นเหลวตามต้องการ มีลักษณะข้นเปียก สามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีส่วนประกอบของน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 30 – 45 ซึ่งปริมาณของน้ำขึ้นอยู่กับความข้นเหลวที่ตามต้องการนำไปใช้ โดยมีส่วนประกอบของออกไซด์ร้อยละ 60 การผลิต Lime Putty จะใช้ปริมาณน้ำที่มากกว่า Dry Hydrate คือ ในปูนสุก 1 ส่วน จะใช้น้ำ 1 – 1.4 ส่วน

**3) Slurry** เป็นปูนขาวที่มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยกระจายตัวอยู่โดยรอบ และมีความเหลวที่ข้นน้อยกว่า Lime Putty โดยปูนขาวแบบนี้มีความสามารถในการไหลได้ดี ซึ่งมีส่วนประกอบของน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 60 – 73 เพื่อให้เกิดได้อย่างรวดเร็วแล้วจะผสมกับน้ำในปริมาณที่มากพอคือ ในปูนสุก 1 ส่วน จะใช้น้ำประมาณ 2 ส่วน

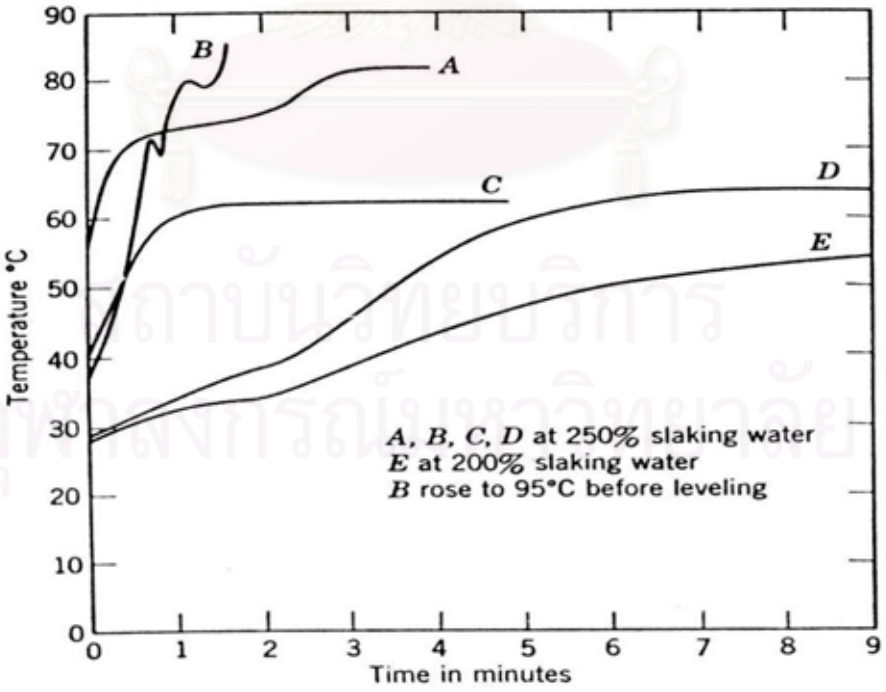
**4) Milk of Lime** เป็นสารแขวนลอยของปูนขาว (หรือปูนสุกที่ผสมกับน้ำแล้ว) ในน้ำ ซึ่งจะส่วนประกอบของออกไซด์ประมาณร้อยละ 1 – 20 โดยปริมาณของน้ำที่ใช้จะมากกว่า Lime Putty และ Slurry ซึ่งส่วนใหญ่จะทำการผลิตโดยการนำเอา Lime Putty หรือ Slurry มาทำให้เจือจางและผ่านกระบวนการกวน (Agitation) ถ้าทำการผลิตจากปูนสุกโดยตรงจะต้องใช้อัตราส่วนของปูนสุกต่อน้ำที่ใช้คือ 1:3 ถึง 1:4.5 ที่อุณหภูมิในการผลิต 65.5 – 82°C

**5) Air-slaked** เมื่อปูนสุกสัมผัสกับอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง จะทำให้ความชื้นที่มีอยู่ในอากาศทำปฏิกิริยากับปูนสุก ซึ่งจะทำให้เกิด Hydration อย่างช้า ๆ เนื่องจากมีความชื้นอยู่น้อย ความร้อนที่เกิดจาก Hydration มีน้อยมาก และใช้ระยะเวลานาน อาจจะหลายวันหรือสัปดาห์ที่ปูนสุกจะเกิด Hydration ขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ และความสามารถในการทำปฏิกิริยาของปูนสุก โดยปกติแล้วการเกิด Hydration จะมีการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) จากบรรยากาศ ดังนั้นปูนขาวแบบนี้จะประกอบไปด้วยสารประกอบจำพวกไฮดรอกไซด์ (Hydroxide) ออกไซด์ (Oxide) และคาร์บอเนต (Carbonate)

### 2.2.3 อัตราในการเกิด Hydration

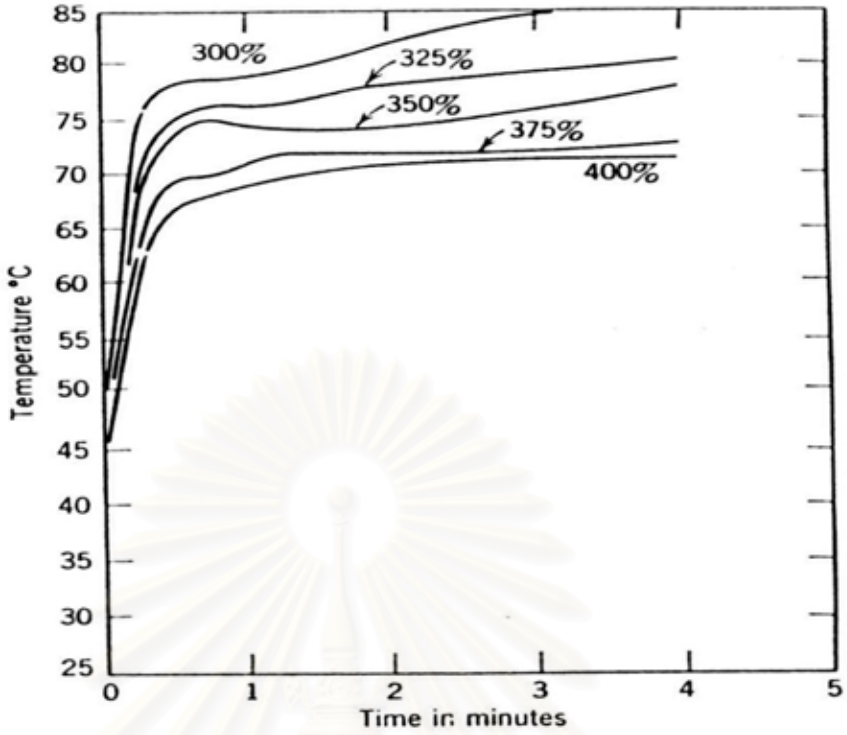
โดยทั่วไปสามารถที่จะสรุปว่า อัตราในการเกิด Hydration และคุณสมบัติของปูนขาวที่ได้มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของปูนสุกที่ใช้ ดังนั้นอัตราในการเกิด Hydration และค่าที่เหมาะสมในการเกิด Hydration จะมีค่าที่แตกต่างกันในปูนสุกแต่ละชนิดที่นำมาใช้ ซึ่งจะพบว่าอัตราในการเกิด Hydration จะต้องเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหรือช้า เพื่อให้ได้ปูนขาวที่มีคุณสมบัติที่เฉพาะให้ตรงกับความต้องการกับการนำไปใช้ประโยชน์

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดใน Hydration ซึ่งในเรื่องนี้ J. A. Murray (1954) ได้ทำการเปรียบเทียบอัตราในการเกิด Hydration โดยการทดลองกับตัวอย่างที่เป็นปูนสุก 5 ชนิดแตกต่างกัน (ทั้งที่เป็น High Calcium Quicklime และ Dolomitic Quicklime) เพื่อหาอัตราในการเกิด Hydration โดยเริ่มการทดลองที่อุณหภูมิเดียวกันคือ 25°C และมีปริมาณของน้ำและปูนสุกที่เท่ากัน ซึ่งผลการทดลองแสดงในรูปที่ 2.8 จะพบว่า อัตราในการเกิด Hydration ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของปูนสุกที่ใช้ โดยจะพบว่า ตัวอย่าง A B และ C เป็น High Calcium Quicklime โดยตัวอย่าง B มีความพรุนสูง มีอัตราในการเกิด Hydration รวดเร็วมาก ส่งผลให้เกิดความปั่นป่วน และอุณหภูมิที่มีสูง ส่วนตัวอย่าง D และ E เป็น Dolomitic Quicklime มีอัตราในการเกิด Hydration ที่ช้ากว่า รูปที่ 2.9 เป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของน้ำที่ใช้ใน Hydration ที่มีผลต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้น เมื่อเริ่มการทดลองที่อุณหภูมิเดียวกัน และมีปริมาณของปูนสุกที่ใช้เท่ากัน จะพบว่า อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นสูงที่สุด เมื่อใช้น้ำในปริมาณที่น้อยที่สุด




ที่มา : J. A. Murray , 1954

**รูปที่ 2.8 กราฟแสดงอัตราในการเกิด Hydration เมื่อใช้ปูนสุกที่มีชนิดแตกต่างกัน**




ที่มา : J. A. Murray , 1954

**รูปที่ 2.9 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของน้ำที่ใช้ใน Hydration ที่มีผลต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้น**

โดยจะพบว่า อัตราในการเกิด Hydration รวดเร็วมาก ส่งผลให้เกิดความปั่นป่วน และอุณหภูมิที่มีสูง ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วมาก เมื่อปูนสุกที่ใช้เป็นแบบสุกพอดี (Soft Burn) และมีความพรุนสูง เนื่องจากมีความสามารถที่จะให้น้ำซึมผ่านได้สูง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่ออัตราในการเกิด Hydration คือ

**1) ความบริสุทธิ์** จะพบว่า ปูนสุกที่ใช้มีความบริสุทธิ์สูง จะทำให้มีอัตราในการเกิด Hydration ที่รวดเร็ว ในทางตรงกันข้าม ปูนสุกที่ใช้มีมลทิน (Impurity) อยู่สูง เช่น ซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์ เป็นต้น จะทำให้มีอัตราในการเกิด Hydration ที่ช้ากว่า เนื่องจากรูพรุนจะถูกอุดตัน และพื้นที่ผิวจะถูกเคลือบด้วยมลทิน (Impurity) เหล่านี้ ทำให้ขัดขวางไม่ให้น้ำซึมผ่านได้

**2) ปริมาณของแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)** จะพบว่า มีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) อยู่มากในส่วนประกอบของปูนสุก จะทำให้อัตราในการเกิด Hydration ที่ช้า ถ้านำเอา Dolomitic Quicklime ที่มีมลทิน (Impurity) อยู่สูง จะเกิด Hydration ได้ช้าที่สุด หรืออาจจะไม่เกิดปฏิกิริยากับน้ำเลยก็ได้

**3) ขนาดของปูนสุก** จะพบว่า ปูนสุกที่ผ่านการบดให้มีขนาด 6.35 – 12.70 มิลลิเมตร จะเป็นขนาดที่เหมาะสมในการเกิด Hydration ที่เร็วกว่าปูนสุกที่เป็นก้อน ซึ่งยิ่งมีขนาดเป็นผง จะยิ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น

**4) อุณหภูมิ** จะพบว่า อัตราในการเกิด Hydration ได้รวดเร็วขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับปูนสุก และน้ำที่ใช้ ซึ่งปูนสุกที่นำมาใช้บางชนิดจะมีอัตราในการเกิด Hydration ที่เร็วขึ้นเป็น 2 เท่า เมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นทุก ๆ 10°C

**5) ปริมาณของน้ำที่ใช้** จะพบว่า ถ้าปริมาณของน้ำที่มากเพื่อทำปฏิกิริยา จะทำให้ขัดขวางให้อัตราในการเกิด Hydration ได้ช้าลง และทำให้ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยามีค่าน้อยลง

## 2.3 คุณสมบัติของปูนสุกและปูนขาว

### 2.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนสุกและปูนขาว

คุณสมบัติทางกายภาพของปูนสุกและปูนขาว (แสดงไว้ในตารางที่ 2.1) ซึ่งจะเป็นปัจจัยที่ช่วยให้เข้าใจถึงลักษณะต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของสี โครงสร้างผลึก เนื้อของผลึก ความถ่วงจำเพาะ และ Angle of Repose เป็นต้น เพื่อทำการพิจารณาถึงความเหมาะสมของขั้นตอนต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนขาว และการขนย้ายปูนขาว ให้ได้ตรงกับความต้องการของลูกค้าที่นำปูนขาวไปใช้ประโยชน์

**ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนสุกและปูนขาว**

| รายการ | ปูนสุก | | ปูนขาว | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **High Calcium** | **Dolomitic** | **High Calcium** | **Dolomitic** | **Pressure Dolomitic** |
| องค์ประกอบ | CaO | CaO.MgO | $Ca(OH)_2$ | $Ca(OH)_2$+MgO | $Ca(OH)_2$+$Mg(OH)_2$ |
| ความถ่วงจำเพาะ | 3.2 – 3.4 | 3.2 – 3.4 | 2.3 – 2.4 | 2.7 – 2.9 | 2.4 – 2.8 |
| Bulk Density ($g/cm^3$) | 0.88 – 0.96 | 0.88 – 0.96 | 0.40 – 0.56 | 0.40 – 0.56 | 0.48 – 0.64 |
| ค่าความร้อนจำเพาะที่ 38°C (kJ/kg) | 0.40 | 0.94 | 0.62 | 0.62 | 0.62 |
| Angle of Repose | 55° | 55° | 70° | 70° | 70° |

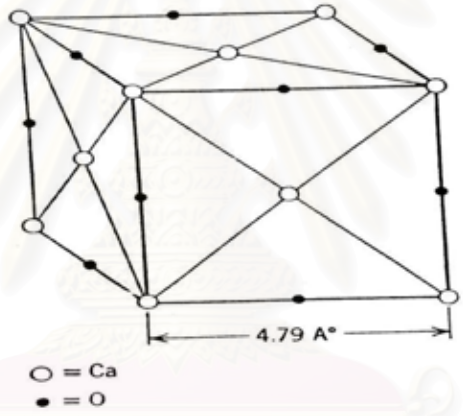
ที่มา : J. L. Stanley, 1983

**1) คุณสมบัติทางกายภาพของปูนสุก (Quicklime)**

**(1) สี** โดยทั่วไปจะพบว่า ปูนสุกจะมีสีขาว แต่จะมีสีขาวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีในปูนสุก โดยปูนสุกที่มีความบริสุทธิ์มากที่สุดจะมีสีขาวที่สุด และปูนสุกที่มีมลทิน (Impurity) อยู่สูงจะมีสีค่อนข้างเทา

**(2) เนื้อของผลึก** จะพบว่า ปูนสุกทุกชนิดจะประกอบไปด้วยผลึก แต่ผลึกจะมีความแตกต่างกันไปทั้งเรื่องของขนาด และระยะห่างของอะตอมที่อยู่ในองค์ประกอบ ซึ่งบางครั้งอาจจะพบผลึกที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous)

**(3) โครงสร้างผลึก** จากการวิเคราะห์ด้วย X-ray Diffraction จะพบว่า ปูนสุกที่เป็นแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) จะมีโครงสร้างผลึกที่เป็นรูปลูกบาศก์ (Cubic) โดยมีความยาวของผลึก 4.79 Å และมีอะตอมของแคลเซียม (Ca) อยู่ตรงกลางของโครงสร้างผลึก (ดูรูปที่ 2.10 ประกอบ)




ที่มา : R. S. Boynton, 1980

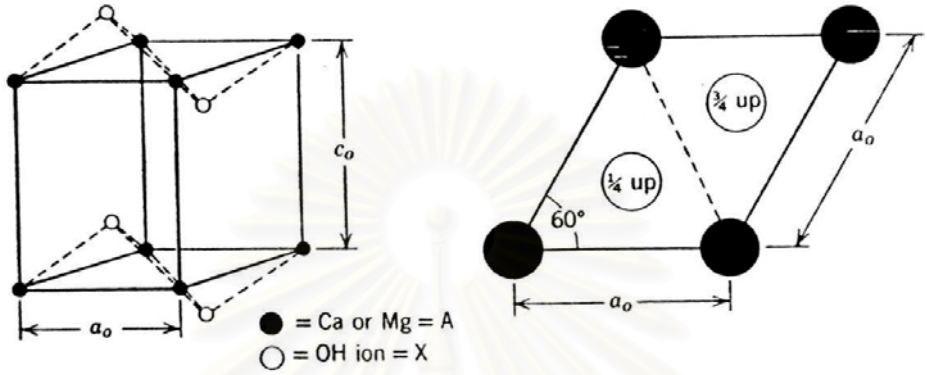
**รูปที่ 2.10 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide)**

**2) คุณสมบัติทางกายภาพของปูนขาว (Hydrated Lime)**

**(1) สี** จะพบว่าปูนขาวที่ได้จะมีสีขาว แต่จะมีสีขาวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีในปูนสุกที่ใช้ในการผลิต ถ้าปูนสุกที่นำมาใช้เป็นแบบสุกเกินไป (Overburnt) จะทำให้ปูนขาวที่ได้จะมีสีออกเหลือง ๆ ส่วนปูนขาวที่ได้มีจุดเล็ก ๆ สีดำปนอยู่ เนื่องจากปูนสุกที่ใช้มีส่วนประกอบของซิลิกา

**(2) ลักษณะของอนุภาค** จะพบว่า ปูนขาวมีเนื้อที่มีความละเอียดแตกต่างกัน แต่อนุภาคของปูนขาวจะเป็นขนาดเล็ก หรือเป็นสารแขวนลอย ซึ่งทำให้คนส่วนใหญ่เข้าใจผิดว่าเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่เมื่อวิเคราะห์ด้วย X-ray Diffraction จะพบว่าโครงสร้างผลึกมีรูปร่างที่แน่นอนไม่ว่าปูนขาวนั้นจะมีเนื้อละเอียดที่สุดก็ตาม

**(3) โครงสร้างผลึก** จะพบว่า โดยมากโครงสร้างผลึกของปูนขาวเป็นรูปทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal) หรือรูปทรงปริซึม (Prism) แต่ในเรื่องทางกายภาพของอนุภาคที่มีขนาดของอนุภาคแตกต่างกัน ทำให้อนุภาคเกาะกันในมุมที่ต่างกันไป โดยรูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide)




ที่มา : R. S. Boynton, 1980

**รูปที่ 2.11 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide)**

### 2.3.1 คุณสมบัติทางเคมีของปูนสุกและปูนขาว

**1) ส่วนประกอบทางเคมีของปูนสุกและปูนขาว**

จะพบว่าในทางปฏิบัติแล้ว ปูนสุกและปูนขาวที่ได้จะไม่บริสุทธิ์ เนื่องจากมีมลทิน (Impurity) อยู่ในส่วนประกอบของหินปูนที่นำมาใช้ในการผลิต ซึ่งในเรื่องคุณภาพของหินปูนที่นำมาใช้ พบว่ามีมลทิน (Impurity) อยู่ในหินปูนที่สำคัญ เช่น ซิลิกา อลูมินา เหล็กออกไซด์ และซัลเฟอร์ เป็นต้น ในระหว่างการเผาหินปูน (Calcination) จะพบว่า มลทิน (Impurity) เหล่านี้จะทำปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารประกอบซิลิเกต อลูมิเนต เฟอไรต์ และซัลเฟต เป็นต้น ทำให้ปริมาณปูนสุกที่ทำปฏิกิริยาได้ (Available CaO) ลดลงไปร้อยละ 3 –5 (หรือมากกว่า) นอกจากนั้นแล้วจะมีส่วนของหินปูนที่ยังเผาไม่สุก (Uncalcined Limestone) หรือไม่ถูกเผาไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ออกไป ซึ่งจะเป็นแกนในก้อนปูนสุก ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบโดยทั่วไปของปูนสุกที่เป็นแบบ High Calcium Quicklime และ Dolomitic Quicklime

อย่างไรก็ตาม มาตรฐานจากผลิตภัณฑ์ปูนขาวเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม (มอก. 202 เล่ม 1-2522) ซึ่งกำหนดประเภทและชั้นของปูนขาวเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ปูนสุก และปูนขาว โดยแต่ละประเภทยังแบ่งได้เป็น 3 ชั้นคือ ชั้นคุณภาพ 1 ชั้นคุณภาพ 2 และชั้นคุณภาพ 3 คุณลักษณะของปูนขาวที่ต้องการในอุตสาหกรรม จะต้องมีขี้เถ้า มลทิน และหินปูนที่ยังเผาไม่สุกน้อยที่สุด โดยคุณลักษณะอื่น ๆ ให้เป็นไปตามตารางที่ 2.3

**ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบโดยทั่วไปของปูนสุก**

| Component | Range (%) | |
|---|---|---|
| | **High Calcium Quicklime** | **Dolomitic Quicklime** |
| CaO | 93.5 - 98.00 | 55.50 - 57.50 |
| MgO | 0.30 - 2.50 | 37.60 - 40.80 |
| $SiO_2$ | 0.20 - 1.00 | 0.10 - 1.50 |
| $Fe_2O_3$ | 0.10 - 0.40 | 0.05 - 0.40 |
| $Al_2O_3$ | 0.10 - 0.50 | 0.05 - 1.50 |
| $H_2O$ | 0.10 - 0.90 | 0.10 - 0.90 |
| $CO_2$ | 0.40 - 1.50 | 0.40 - 1.50 |

ที่มา : J. L. Stanley, 1983

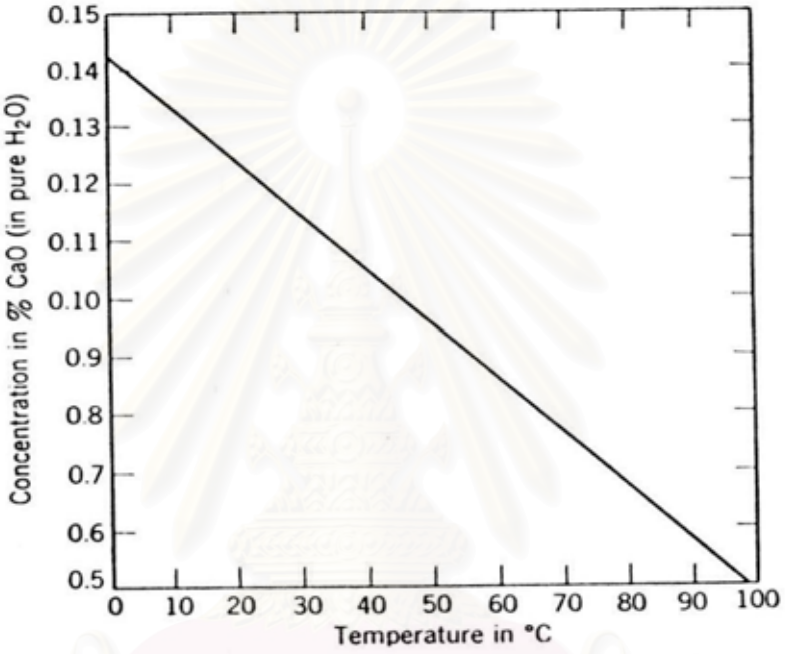
**ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะของปูนสุกและปูนขาวเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม**

| คุณลักษณะ | ปูนสุก | | | ปูนขาว | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ชั้นคุณภาพ 1 | ชั้นคุณภาพ 2 | ชั้นคุณภาพ 3 | ชั้นคุณภาพ 1 | ชั้นคุณภาพ 2 | ชั้นคุณภาพ 3 |
| ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ไม่น้อยกว่าร้อยละ | 93.0 | 90.0 | 80.0 | 72.5 | 70.0 | 65.0 |
| ปริมาณของสิ่งเจือปน ไม่เกินร้อยละ | | | | | | |
| - แมกนีเซียมออกไซด์ | – | – | – | 1.0 | – | – |
| - ซิลิกา อลูมินา และ เหล็ก (III) ออกไซด์ | 3.2 | – | – | 2.0 | – | – |
| ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่เกินร้อยละ | 2.0 | – | – | 1.5 | – | – |
| ปริมาณที่ค้างบนตะแกรง | | | | | | |
| - ขนาด 600 ไมครอน | – | – | – | ไม่มี | ไม่มี | ไม่มี |
| - ขนาด 150 ไมครอน | – | – | – | 5.0 | – | – |

ที่มา : มอก. 202 เล่ม 1-2522, 2522

**2) ความสามารถในการละลายของปูนขาว**

โดยความสามารถในการละลายของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) จะมีการละลายในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 10°C มากที่สุดคือ 1.33 g CaO/l และที่อุณหภูมิ 0°C จะมีความสามารถในการละลายมากที่สุดคือ 1.40 g CaO/l โดยรูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งความสามารถในการละลายจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ

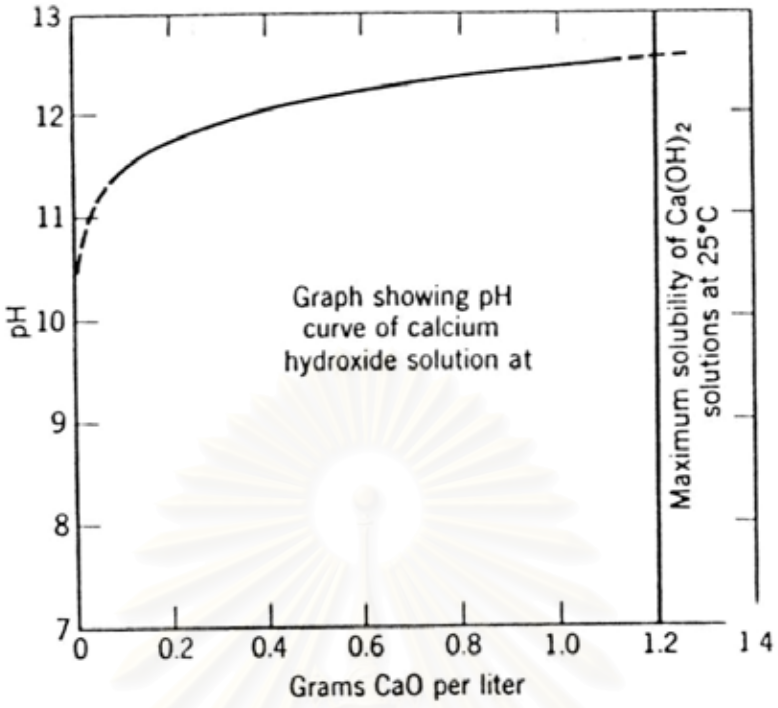



ที่มา : R. S. Boynton, 1980

**รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ**

**3) ปริมาณ pH ของปูนขาว**

ปริมาณ pH ของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) ที่อุณหภูมิ 25°C แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 โดยเติมเพียงแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) ลงในน้ำกลั่นที่บริสุทธิ์ จะพบว่า มีอัตราการเพิ่มที่รวดเร็วมากจาก pH 7 ถึง 11 ต่อจากนั้นอัตราการเพิ่มของค่า pH จะเกิดขึ้นทีละน้อย และเมื่อมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) ในสารละลายร้อยละ 50 จะพบว่าค่า pH เพิ่มขึ้นน้อยมาก ก่อนถึงถึงจุดอิ่มตัวของสารละลาย อีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือ อุณหภูมิ ดังนั้นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถในการละลายที่ลดลง และส่งผลให้ค่า pH ลดลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 0°C จะมีค่า pH เพิ่มขึ้นถึง 13




ที่มา : R. S. Boynton, 1980

**รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ pH ของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) และความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปที่อุณหภูมิ 25°C**

## 2.4 การนำปูนขาวไปใช้ประโยชน์

ปูนขาว เป็นส่วนประกอบที่สำคัญและปริมาณการใช้ที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในงานหลายประเภท ซึ่งสามารถที่จะนำไปใช้ได้หลากหลาย เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ใช้ในเกษตรกรรม และใช้ในการก่อสร้าง เป็นต้น โดยอาจจะพิจารณาจำแนกประเภทของของการนำไปใช้งาน ออกได้เป็นลักษณะต่าง ๆ ดังนี้คือ

### 2.4.1 การนำปูนขาวไปใช้ในอุตสาหกรรม

**1) อุตสาหกรรมถลุงเหล็กและเหล็กกล้า**

โดยใช้เป็นฟลักซ์ (Flux) ช่วยในการหลอม และแยกเหล็กออกจากแร่เหล็ก ซึ่งปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับซิลิกา ($SiO_2$) และอลูมินา ($Al_2O_3$) ที่เป็นสิ่งเจือปนในแร่เหล็ก และกลายเป็นกากแร่ที่หลอม (Slag) ลอยอยู่ที่ด้านบนของส่วนที่หลอมละลาย ปูนขาวที่ใช้ในอุตสาหกรรมประเภทนี้จะต้องมีความบริสุทธิ์สูงที่มีปริมาณของซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัสต่ำ

ปูนขาวยังใช้เป็นฟลักซ์ (Flux) ในอุตสาหกรรมเหล็กกล้า โดยใช้เพื่อแยกซิลิกาและฟอสฟอรัสออกจากเหล็กที่ได้ถลุงแล้ว (Pig Iron) ซึ่งมาตรฐานของปูนขาวที่นำมาใช้จะต้องมีความบริสุทธิ์สูงที่มีปริมาณซิลิกาไม่เกินร้อยละ 5 และมีซัลเฟอร์น้อยกว่าร้อยละ 0.1

**2) อุตสาหกรรมเคมี**

**(1) การผลิตโซดาแอช** โดยโซดาแอช (Sodium Carbonate : $Na_2CO_3$) เป็นวัตถุดิบอย่างหนึ่งสำหรับอุตสาหกรรมเคมี ซึ่งผลิตด้วยกระบวนการ Solvay มีขั้นตอนดังนี้คือ

$$2NH_4Cl + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCl_2 + 2NH_4 + 2H_2O$$
$$2NH_3 + H_2O + CO_2 \longrightarrow (NH_4)_2CO_3$$
$$(NH_4)_2CO_3 + H_2O + CO_2 \longrightarrow 2NH_4HCO_3$$
$$NH_4HCO_3 + NaCl \longrightarrow NaHCO_3 + NH_4Cl$$
$$2NaHCO_3 + Heat \longrightarrow Na_2CO_3 + CO_2 + H_2O$$

จะพบว่า การผลิตในกระบวนการ Solvay ใช้ปูนขาวประมาณ 610 กิโลกรัม เพื่อผลิตโซดาแอช (Sodium Carbonate : $Na_2CO_3$) 1 ตัน

**(2) การผลิตคาร์ไบด์ (Carbide)** โดยแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide : $CaC_2$) เป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตก๊าซอะเซทิลีน (Acetylene : $C_2H_2$) ซึ่งได้จากการผสมปูนสุกกับถ่านโค้ก (Coke) แล้วนำไปเผาในเตาเผาไฟฟ้า (Electric Furnace) ที่อุณหภูมิ 2,000°C โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดดังนี้คือ

$$CaO + 3C \longrightarrow CaC_2 + CO$$

เมื่อผ่านการเผาแล้ว จะนำแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide : $CaC_2$) ที่ได้มาบด เพื่อนำไปผลิตก๊าซอะเซทิลีน (Acetylene : $C_2H_2$) ต่อไป โดยในการผลิตจะใช้ปูนสุกประมาณ 1 ตัน เพื่อให้ได้แคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide : $CaC_2$) 1 ตัน ซึ่งมาตรฐานของปูนสุกที่นำมาใช้จะต้องมีปริมาณของฟอสฟอรัสไม่เกินร้อยละ 0.02

**(3) การผลิตแมกนีเซีย (Magnesia : MgO)** ในการผลิตนี้จะใช้ปูนขาวในการตกตะกอนแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) ในน้ำทะเลให้เป็นตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) เมื่อนำมาเผาจะได้แมกนีเซีย (Magnesia : MgO) ซึ่งใช้ในการผลิตวัสดุทนไฟ โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดดังนี้คือ

$$MgCl_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Mg(OH)_2 + CaCl_2$$
$$Mg(OH)_2 + Heat \longrightarrow MgO + H_2O$$

**3) อุตสาหกรรมน้ำตาล**

โดยใช้ปูนขาวในการผลิตน้ำตาล เพื่อทำให้น้ำตาลมีความบริสุทธิ์ ปรับค่าของ pH และช่วยในการตกตะกอนของสิ่งเจือปนที่เป็นสารประกอบจำพวกฟอสเฟต และอินทรีย์วัตถุ ซึ่งในการผลิตน้ำตาล 1 ตัน จะใช้ปูนขาวประมาณ 4.80 – 7.20 กิโลกรัม และจะใช้ปูนขาวที่มีปริมาณของแคลเซียม (Ca) ที่สูง

**4) อุตสาหกรรมกระดาษ**

โดยใช้ปูนขาวในการผลิตเยื่อกระดาษในการผลิตแคลเซียมไฮโปคลอไรด์ (Calcium Hypochloride : $Ca(OCl)_2$) ซึ่งเป็นสารฟอกสีเยื่อกระดาษ โดยการเติมก๊าซคลอรีน ($Cl_2$) ลงไปในปูนขาวที่เป็นแบบ Milk-of-lime ซึ่งมีปฏิกิริยาที่เกิดดังนี้คือ

$$Cl_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca(OCl)_2 + H_2$$

ปูนขาวที่ใช้จะต้องมีปริมาณของแคลเซียม (Ca) ที่สูง มาตรฐานของปูนขาวที่นำมาใช้จะต้องมีความบริสุทธิ์สูงที่มีปริมาณซิลิกาไม่เกินร้อยละ 5 และมีซัลเฟอร์น้อยกว่าร้อยละ 0.1

**5) อุตสาหกรรมแก้ว**

โดยปูนขาวที่ใช้ในการผลิต จะทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ (Flux) ช่วยให้ส่วนผสมหลอมละลายที่อุณหภูมิต่ำ และปูนขาวที่ใช้จะต้องมีปริมาณของสิ่งเจือปนที่จะทำให้แก้วมีสี เช่น ต้องมีปริมาณเหล็กไม่เกินร้อยละ 0.8

**2.4.2 การนำปูนขาวไปใช้ในเกษตรกรรม**

**1) ใช้ในการแก้ปัญหาดินเปรี้ยว และเสื่อมโทรม**

การแก้ปัญหาดินเปรี้ยว และเสื่อมโทรม จะใช้ปูนขาวนำมาคลุกเคล้ากับดินในบริเวณนั้น ปริมาณของการใช้ปูนขาวขึ้นอยู่กับสภาพของดิน แต่ไม่ควรใช้ปูนขาวเกิน 1 กิโลกรัมต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร ซึ่งการปรับสภาพต้องคำนึงถึงความเป็นกรดและด่างด้วย เช่น สภาพของดินที่เหมาะสมสำหรับการทำนาคือ pH 6.5 เป็นต้น

**2) ใช้เป็นอาหารสัตว์**

ปกติจะใช้เปลือกหอยเป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์ เพื่อเสริมธาตุแคลเซียม (Ca) ให้สัตว์แข็งแรง แต่ถ้าต้องการเสริมธาตุแคลเซียม (Ca) ให้รวดเร็ว สามารถที่จะใช้ปูนขาวใส่ผสมเข้าไปในอาหารสัตว์ เพื่อธาตุแคลเซียม (Ca) ในปูนขาวจะสลายตัวแล้วดูดซึมได้อย่างรวดเร็ว

**3) ใช้ในการบำบัดน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้ง**

เมื่อการเลี้ยงกุ้งไปนาน ๆ จะทำให้เกิดการหมักหมมของสารเคมีที่ใช้ในการเลี้ยงกุ้ง ซึ่งเป็นตัวการทำให้น้ำ และดินในบ่อเลี้ยงกุ้งเสีย การปรับปรุงคุณภาพของน้ำ และดิน จะทำโดยใช้ปูนขาวคลุกกับดิบให้ทั่วในอัตราส่วนปูนขาว 1 กิโลกรัมต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตรของบ่อเลี้ยงกุ้ง

แล้วปล่อยให้ตากแดดไว้จนดินแห้ง จากนั้นจึงปล่อยน้ำเข้าท่วมขังสูงประมาณ 15 เซนติเมตร และทิ้งไว้ประมาณ 3 วัน ทำการวัดค่า pH ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 6.5 – 8 แสดงว่าการบำบัดน้ำใช้ได้

**2.4.3 การนำปูนขาวไปใช้ในการก่อสร้าง**

**1) ใช้ในงานฐานราก**

ในงานฐานรากที่เป็นดินเหนียวมีลักษณะอุ้มน้ำ ทำให้เกิดความไม่เสถียร จะทำการแก้ไขโดยการใส่ปูนสุกลงในรูเจาะที่ทำไว้ในดินเหนียว เมื่อปูนสุกทำปฏิกิริยากับน้ำที่อยู่ภายในแล้วจะกลายเป็นปูนขาว น้ำที่อยู่ในดินจะถูกดูดเข้าไปเพื่อทำปฏิกิริยา ทำให้ฐานรากมีความเสถียรมากขึ้น โดยรูเจาะที่ใส่ปูนสุกในฐานรากจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 – 50 เซนติเมตร ความลึกจะไม่เกิน 30 เมตร และระยะห่างระหว่างรูเจาะประมาณ 0.75 – 1.50 เมตร

**2) ใช้เพื่อเพิ่มความเสถียรภาพของชั้นดินตื้น**

การเพิ่มความเสถียรภาพของชั้นดินโดยการเติมปูนขาว ซึ่งใช้ได้ดีกับดินเหนียว แต่ถ้าเป็นดินทรายจะใช้ปูนซีเมนต์จะทำให้มีคุณภาพที่ดีกว่า การใช้ปูนขาวจะต้องมีลักษณะเป็นผงหรือเม็ด ไม่ควรใช้ปูนขาวที่มีลักษณะเป็นของเหลว เช่น Lime Putty

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 3

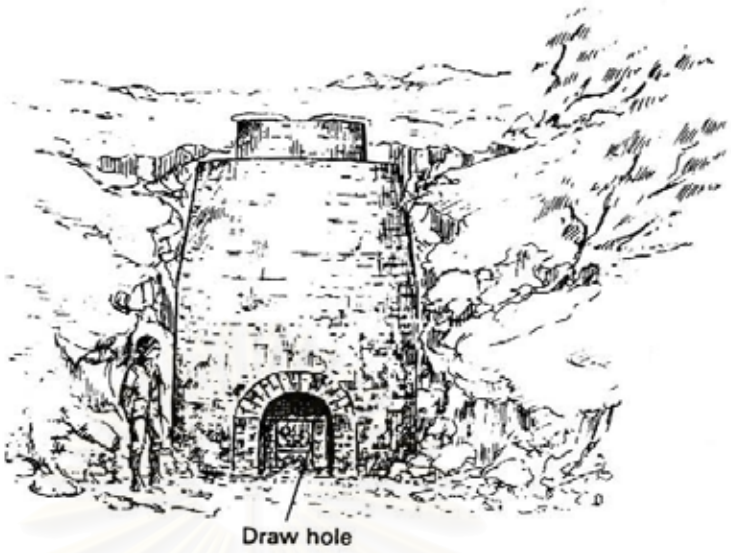
# เทคโนโลยีเตาปูนขาว

ขั้นตอนในการเผาหินปูน (Calcination) เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากในการผลิตปูนขาว เพราะมีอิทธิพลต่อปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้และพลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนขาว รวมทั้งยังส่งผลต่อคุณภาพของปูนขาวที่ได้และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนขาว ซึ่งเทคโนโลยีเตาปูนขาวนับว่าเป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อขั้นตอนในการเผาหินปูน อีกทั้งเงินลงทุนเริ่มแรกส่วนใหญ่จะเป็นเงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาอย่างละเอียดในเรื่องของเทคโนโลยีเตาปูนขาวให้เหมาะสมกับการนำมาใช้งาน

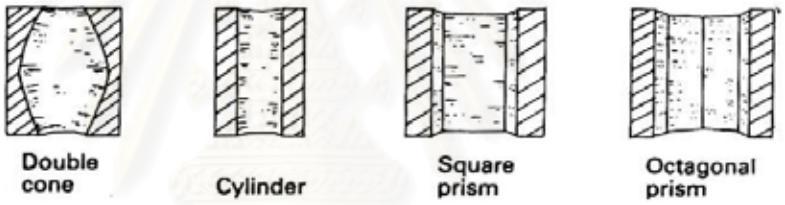
เทคโนโลยีเตาปูนขาวสามารถที่จะแบ่งตามลักษณะการทำงานของเตาปูนขาวออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) และเตาแบบเผาต่อเนื่อง (Continuous Kiln) ซึ่งเตาแบบเผาต่อเนื่องยังสามารถแบ่งตามรูปร่างของเตาปูนขาวออกเป็น เตาตั้ง (Vertical Shaft Kiln) และเตาแบบหมุน (Rotary Kiln)

## 3.1 เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)

อาจเรียกว่า Pot Kiln หรือ Flare Kiln เป็นเตาปูนขาวขนาดเล็ก สำหรับเผาหินปูนเป็นครั้ง ๆ ไม่ได้เผาแบบต่อเนื่อง การเผาเริ่มต้นด้วยนำหินปูนที่ต้องการเผาใส่เข้าทางด้านบนของเตาปูนขาว โดยใช้แรงงานคน หรือในกรณีมีกำลังการผลิตสูงจะใช้รถยก และสายพานลำเลียงในการยกหินปูนใส่ลงในเตาปูนขาว มีช่องว่างด้านล่างสำหรับใส่เชื้อเพลิงแล้วจุดไฟ การเผาเริ่มต้นอาจจะใช้ไม้เศษยาง หรือน้ำมันดีเซลก่อน จากนั้นจึงใช้ถ่านหินใส่ในช่องเชื้อเพลิง โดยค่อยทำการเริ่มเผาอย่างช้า ๆ ซึ่งถ่านหินที่ใช้ต้องเติมตลอดเวลา อากาศที่ใช้ในการเผาจะถูกส่งผ่านจากช่องด้านล่างของเตาปูนขาว อาจใช้พัดลม (Blower) ช่วยในการส่งอากาศผ่านเข้าไปในเตาปูนขาวอย่างช้า ๆ แล้วจึงปรับเปลี่ยนความเร็วซึ่งเริ่มต้นควรใช้แรงลมต่ำก่อน หลังจากนั้นพอหินปูนเริ่มดูดซับความร้อนไว้และเริ่มส่งผ่านความร้อนขึ้นไปสู่ชั้นบนแล้วจึงเร่งอากาศที่เป่าโดยพัดลม (Blower) เข้าไปในเตาปูนขาวให้แรงขึ้น โดยไฟจะลุกไหม้จากด้านล่างสู่ด้านบน ทำให้เกิดความร้อนทั่วทั้งเตาปูนขาว จนหินปูนกลายเป็นปูนสุก (Quicklime) จนหมดแล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวลง เตาปูนขาวประเภทนี้มีค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ ใช้แรงงานน้อย การเผาทำได้ง่ายไม่ซับซ้อน แต่มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ไม่ดีและสิ้นเปลืองปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมาก และคุณภาพของปูนสุกที่ได้ไม่ดี รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)




*A pot kiln.*




*Common veritical sections of pot kilns.*

*The rough dome.*

*Stones to control draught.*

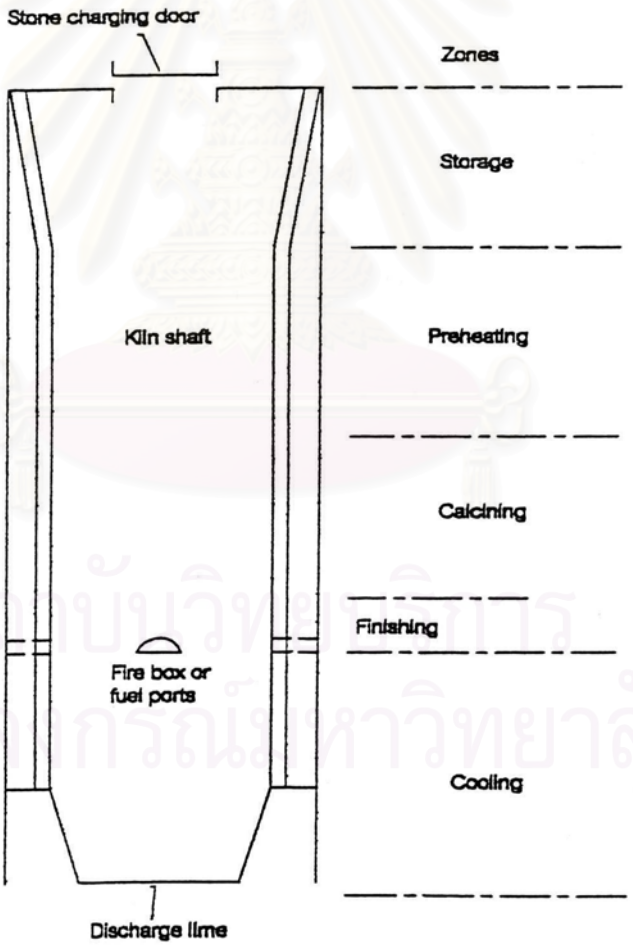
ที่มา : Michael Wingate, 1985

**รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)**

## 3.2 เตาแบบเผาต่อเนื่อง (Continuous Kiln)

### 3.2.1 เตาตั้ง (Vertical Shaft Kiln)

เป็นเตาปูนขาวแบบเผาต่อเนื่อง รูปร่างเป็นทรงกระบอกตั้งตรง มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต้องมีค่าอย่างน้อย 6 ต่อ 1 มีช่องสำหรับใส่หินปูนที่ต้องการเผาอยู่ทางด้านบนของเตาปูนขาว โดยหินปูนจะถูกปล่อยลงมาตามแรงโน้มถ่วง อากาศไหลเข้าสู่เตาปูนขาวอาจจะเข้าช่องทางด้านล่างไหลทิศทางสวนกับหินปูนที่ตกลงมา (Counter Flow) หรืออาจจะเข้าช่องทางด้านบนไหลทิศทางเดียวกับหินปูนที่ตกลงมา (Parallel Flow) การให้เชื้อเพลิงเข้าไปในช่องตอนล่างเหนือช่องอากาศ ดังนั้นหินปูนที่ถูกปล่อยลงมาจะได้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ จากนั้นผ่านช่วงของการให้เชื้อเพลิงที่เป็นช่วงของการเผา หลังจากนั้นหินปูนจะตกลงมา และมีอุณหภูมิลดลงเป็นผลให้ความร้อนจากหินปูนจะถูกถ่ายทอดให้กับอากาศที่เข้ามาทำให้อากาศร้อนขึ้นช่วยรักษาระดับอุณหภูมิและประหยัดพลังงาน




ที่มา : R. S. Boynton, 1980

**รูปที่ 3.2 โซนการทำงานของเตาตั้ง (Vertical Shaft Kiln)**

โดยสามารถแบ่งโซนการทำงานของเตาตั้งออกเป็น 4 โซน (ดูรูปที่ 3.2 ประกอบ) คือ Storage Zone, Preheating Zone, Calcining Zone และ Cooling Zone

**(1) Storage Zone** เป็นโซนที่สำรองหินปูนไว้ในกรณีที่หินปูนขาดตอน โดยจะสำรองหินปูนเผื่อไว้ประมาณ 2 ชั่วโมงหรือมากกว่า เพื่อให้เตาปูนขาวทำงานอย่างต่อเนื่อง การทำให้ด้านบนของเตาปูนขาวเปิดโล่งทำให้เกิดความชื้นในหินปูนจากฝนที่ตกลงมา และการควบคุมอากาศที่ไหลผ่านในเตาปูนขาวทำได้ยาก จึงต้องทำให้ด้านบนปิดและทำเป็นประตูพิเศษสามารถที่จะเปิดในการบรรจุหินปูน

**(2) Preheating Zone** เป็นโซนที่ถัดจาก Storage Zone ทำหน้าที่อุ่นหินปูนก่อนเข้าสู่ Calcining Zone โดยความร้อนที่ใช้ในการอุ่นหินปูนได้จากก๊าซที่ผ่านมาจากช่วงของ Calcining Zone ทางด้านล่าง เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาให้ดีขึ้น

**(3) Calcining Zone** อาจเรียกว่า Burning Zone เป็นโซนที่เกิดการเผาหินปูนให้กลายเป็นปูนสุก โดยใส่เชื้อเพลิงเพื่อเผาหินปูน ซึ่งเป็นโซนที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดของเตาปูนขาว และให้ได้อุณหภูมิเพียงพอที่ทำให้เกิด Calcination โดยต้องควบคุมอุณหภูมิ และระยะเวลาในการเผาให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้ปูนสุกที่ได้ออกมาจากเตาปูนขาวเป็นแบบภาวะยังไม่สุก (Underburnt) หรือภาวะสุกเกินไป (Overburnt) ซึ่งอุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาให้เหมาะสมขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของหินปูนที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบ

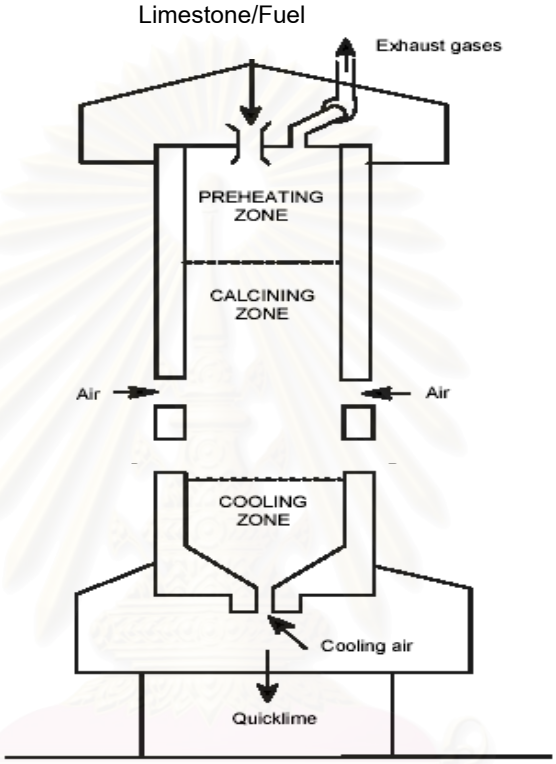
**(4) Cooling Zone** เป็นโซนที่หินปูนผ่านจากการเผากลายเป็นปูนสุกจะเย็นตัวลงและถูกนำออกจากเตาปูนขาว อุณหภูมิของปูนสุกที่ออกจากเตาปูนขาวไม่ควรเกิน 80°C เพื่อสะดวกต่อการลำเลียงออก โดยโซนนี้อาจมีการติดตั้งพัดลม (Blower) เพื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเข้าไปยังเตาปูนขาว ตรงส่วนปลายสุดจะทำเป็นประตูสามารถที่จะเปิดเพื่อลำเลียงปูนสุกที่เย็นตัวลงออกจากเตาปูนขาว

เนื่องจากความต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของเตาตั้ง (Vertical Shaft Kiln) ในการผลิตปูนขาว จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเตาปูนขาวเพื่อให้ใช้งานได้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น ทำให้มีการออกแบบและพัฒนาเตาตั้งแบบต่าง ๆ เช่น เตาตั้งแบบ Mixed Feed เตาตั้งแบบ Annular เตาตั้งแบบ Double-Inclined และเตาตั้งแบบ Parallel Flow เป็นต้น

**1) เตาตั้งแบบ Mixed Feed**

เป็นเตาตั้งที่ได้รับการออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยีเตาปูนขาวให้มีลักษณะการทำงานโดยการป้อนหินปูนและถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเป็นชั้นสลับกัน (Mixed Feed) ที่ด้านบนของเตาปูนขาวตกลงมาโดยแรงโน้มถ่วงลงสู่ด้านล่างผ่านกระบวนการอุ่นหินปูนให้ร้อน (Preheating) การเผา (Calcining) และปล่อยให้เย็นตัวลง (Cooling) ตามลำดับ โดยอากาศที่เผาไหม้จะไหลสวนทาง (Counter Flow) กับหินปูนที่ใส่ลงในช่องบนสุดของเตาปูนขาว โดยอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จะถูกส่งเข้าไปทางด้านล่างสุดของเตาปูนขาวและลอยขึ้นด้านบนสุดของเตาปูนขาว

ดังนั้นอากาศเสียก็จะเกิดที่ด้านบนสุดของเตาปูนขาว จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนใน 2 อย่างคือ หินปูนที่อยู่ด้านบนสุดของเตาปูนขาวจะถูกอุ่นให้ร้อน โดยความร้อนที่ได้จากอากาศที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตและอากาศที่เข้าสู่ด้านล่างของเตาปูนขาวได้รับความร้อนจาก Cooling Zone ก่อนเข้าสู่ Calcining Zone รูปที่ 3.3 เป็นแผนภาพแสดงการทำงานของเตาตั้งแบบ Mixed Feed




ที่มา : Environment Agency, 2001

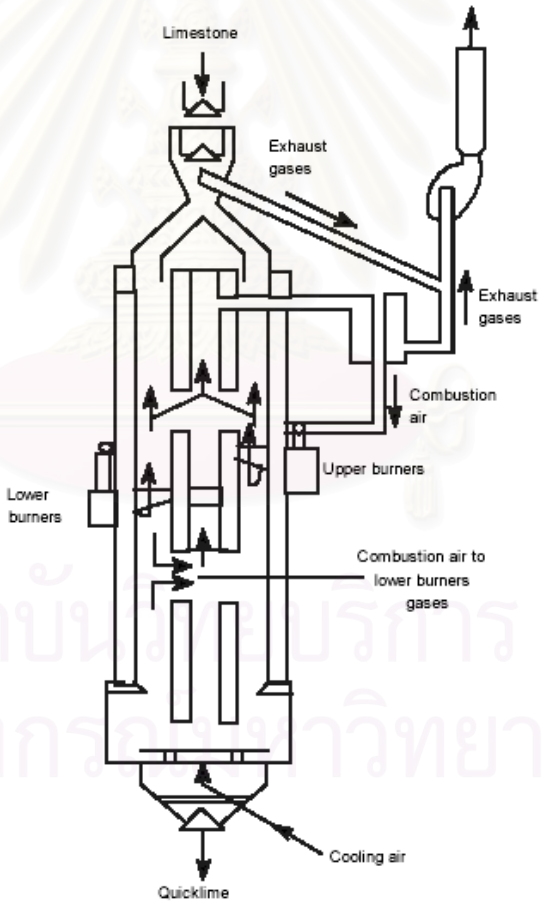
**รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการทำงานของเตาตั้งแบบ Mixed Feed**

**2) เตาตั้งแบบ Annular**

เป็นเตาตั้งที่ใช้น้ำมันเตา หรืออาจจะใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ลักษณะของเตาปูนขาวจะมีปล่องเป็นวงแหวนติดตั้งไว้ที่ภายในของกระบอกที่อยู่กึ่งกลาง โดยปล่องวงแหวนจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของวงแหวนด้านบน และส่วนของวงแหวนด้านล่าง ตรงส่วนที่ว่างระหว่างวงแหวนทั้งสองเป็นเส้นทางการไหลของอากาศภายในเตาปูนขาว โดยแต่ละส่วนจะมีห้องเผาไหม้อย่างน้อย 3 ห้อง (หรืออาจจะมากกว่าขึ้นอยู่กับกำลังการผลิต) ติดตั้งตามแนวรัศมีของปล่องวงแหวนด้านใน ห้องเผาไหม้จะวางเหลื่อมกันกันในช่วงของ Calcining Zone ด้านบนจะมีที่ว่างให้อากาศไหลถ่ายเทความร้อนได้ดีเพื่อให้หินปูนได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง โดยติดตั้งหัวฉีดเชื้อเพลิงไว้ 2 ระดับ คือ ช่วงบน และล่างของ Calcining Zone ส่วนการเผาไหม้จะแบ่งออกเป็น 2

ส่วน คือ ช่วงบนของ Calcining Zone อากาศที่เผาไหม้จะไหลสวนทาง (Counter Flow) กับการเคลื่อนที่ของหินปูนและช่วงล่างของ Calcining Zone อากาศจะไหลทิศทางเดียว (Parallel Flow) กับหินปูนที่เคลื่อนที่ลงมา

การป้อนหินปูนเข้าสู่ Preheating Zone อากาศที่เผาไหม้จะไหลสวนทาง (Counter Flow) กับหินปูนที่ตกลงมา จากนั้นหินปูนจะเคลื่อนเข้าสู่ช่วงบนของ Calcining Zone จะได้รับความร้อนจากการสันดาปของเชื้อเพลิงจากหัวฉีด และเมื่อเข้าสู่ช่วงล่างของ Calcining Zone อากาศจะไหลทิศทางเดียว (Parallel Flow) กับหินปูนที่ตกลงมา และจะมีหัวฉีดให้ความร้อนในส่วนนี้ เมื่อผ่านกระบวนการนี้จะเข้าสู่ Cooling Zone ในโซนนี้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จะรวมตัวกันส่งผ่านไปยังกระบอกภายในเตาปูนขาว จากนั้นอากาศจะถูกโดยผ่าน Recuperator นำอากาศมาใช้ในช่วงของ Preheating Zone อีกทีหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งจะปล่อยออกทางปล่องด้านบน โดยรูปที่ 3.4 เป็นแผนภาพแสดงการทำงานของเตาตั้งแบบ Annular



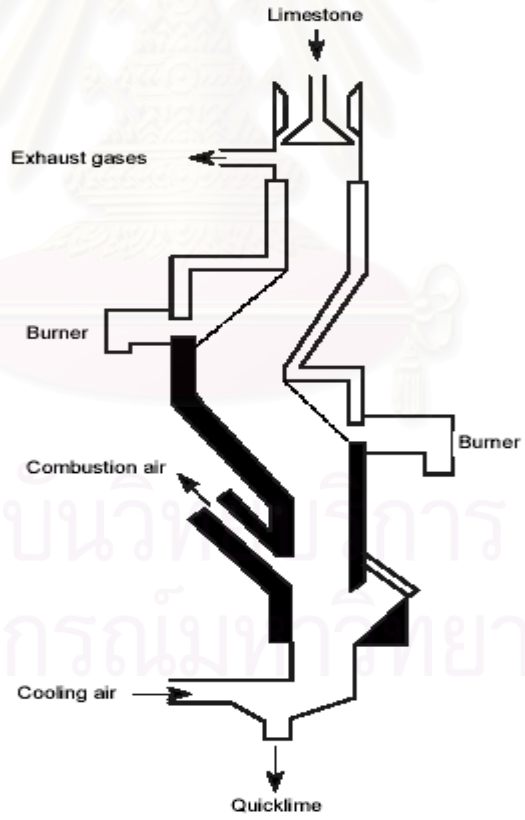

ที่มา : Environment Agency, 2001

**รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงการทำงานของเตาตั้งแบบ Annular**

**3) เตาตั้งแบบ Double-Inclined**

เป็นเตาตั้งที่มีกำลังการผลิต 100 – 150 ตันต่อวัน มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ประกอบไปด้วยปล่องมีที่ด้านเอียง 2 ด้านในทิศทางที่ตรงกันข้าม ด้านเอียงแต่ละด้านทำมุม 45° กับแนวระดับ โดยจะทำการออกแบบให้มีช่องว่างเหนือด้านเอียง ซึ่งช่องว่างของด้านเอียงทั้งสองด้านนี้จะติดตั้งหัวฉีดเพื่อใช้ในการเผาหินปูน ซึ่งที่ฝั่งตรงข้ามของด้านเอียงจะมีห้องเผาไหม้ 3 ห้อง และเหนือห้องเผาไหม้แต่ละห้องจะติดตั้งหลังคาโค้ง เพื่อช่วยรักษาระดับของอุณหภูมิในช่วง Calcining Zone

ที่ด้านบนของเตาปูนขาวจะติดตั้งระบบการป้อนอัตโนมัติ เพื่อป้อนหินปูนเข้าสู่ช่วง Preheating Zone เพื่อทำการอุ่นให้ร้อน จากนั้นหินปูนจะถูกลำเลียงผ่านระบบการเผาไหม้ที่ด้านเอียงทั้งสองด้าน โดยจะมีหัวฉีดที่ด้านเอียงแต่ละด้านให้ความร้อนแก่หินปูน เมื่อผ่านกระบวนการนี้จะเข้าสู่ Cooling Zone ในโซนนี้จะมีพัดลมเป่าอากาศเย็น (Cooling Air) เข้าสู่เตาปูนขาว เพื่อเป่าให้ปูนสุกเย็นตัวลงก่อนที่จะลำเลียงไปเก็บที่ไซโลโดยใช้สายพานลำเลียง รูปที่ 3.5 เป็นแผนภาพแสดงการทำงานของเตาตั้งแบบ Double-Inclined



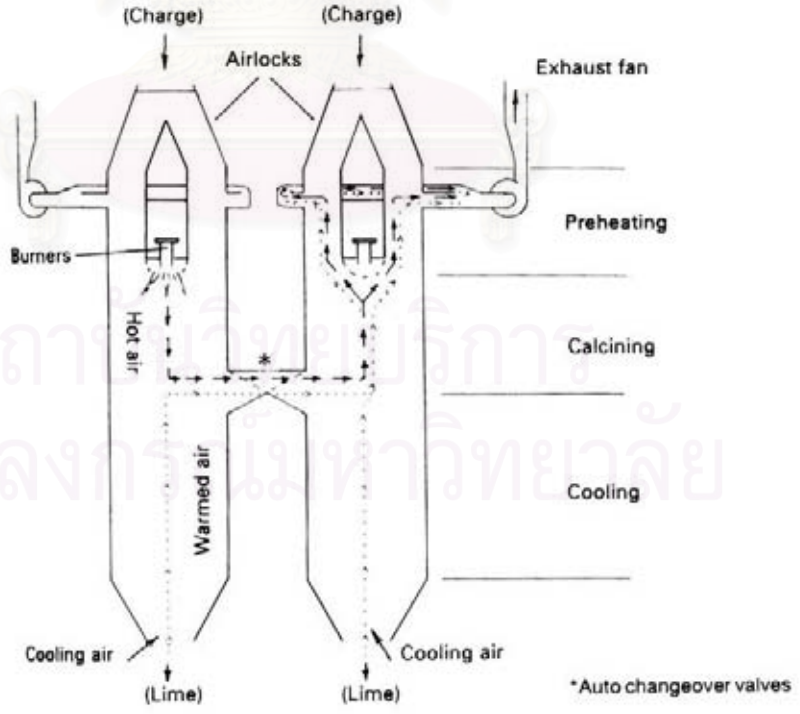

ที่มา : Environment Agency, 2001

**รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการทำงานของเตาตั้งแบบ Double-Inclined**

**4) เตาตั้งแบบ Parallel Flow**

เป็นเตาตั้งที่มีกำลังการผลิต 100 – 600 ตันต่อวัน จะประกอบด้วยปล่อง 2 ปล่อง (บางครั้งอาจจะมี 3 ปล่องขึ้นกำลังการผลิตที่ตั้งไว้) โดยระหว่างปล่อง 2 ปล่องนี้จะมีท่อเชื่อมที่ความสูง 1 ใน 3 ของความสูงของเตาปูนขาว และที่ความสูง 2 ใน 3 ของความสูงของเตาปูนขาวจะติดตั้งระบบการเผาไหม้โดยมีหัวฉีดเชื้อเพลิงติดตั้งอยู่รอบ ๆ ปล่อง

ลักษณะการเผานั้นจะเป็นแบบ Parallel Flow คือ หินปูนและอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันจากด้านบนสู่ด้านล่างของเตาปูนขาว ที่ด้านล่างของเตาปูนขาวจะมีพัดลม (Blower) สำหรับเป่าอากาศเย็น (Cooling Air) เพื่อเป่าให้ปูนสุกเย็นตัวลงก่อนที่จะลำเลียงไปเก็บที่ไซโลโดยใช้สายพานลำเลียง โดยหลักการทำงานของเตาปูนขาวนั้นจะทำการเผาทีละปล่อง อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จะปล่อยออกมาจากด้านบนของแต่ละปล่อง โดยขณะที่ปล่องแรกอยู่ในช่วง Calcining Zone ปล่องที่สองจะอยู่ในช่วง Preheating Zone โดยรับอากาศร้อนจากการเผาในปล่องแรกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ เมื่อผ่านช่วง Preheating Zone แล้วอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จะถูกปล่อยมาจากทางด้านบนของปล่องที่สอง จากนั้นจะมีการกลับกระบวนการเผามาที่ปล่องที่สอง ซึ่งในขณะเดียวกันก็จะทำการลำเลียงปูนสุกออกทางด้านล่างพร้อมกับใส่หินปูนใหม่ที่ด้านบนของปล่องแรกทำเช่นนี้สลับกันไป รูปที่ 3.6 เป็นแผนภาพแสดงการทำงานของของเตาตั้งแบบ Parallel Flow



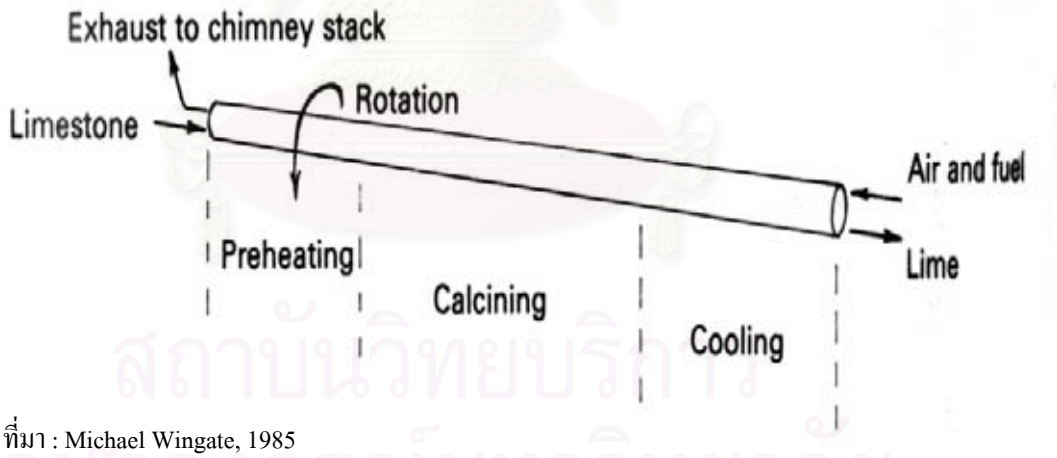

ที่มา : Michael Wingate, 1985

**รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการทำงานของเตาตั้งแบบ Parallel Flow**

**3.2.2 เตาแบบหมุน (Rotary Kiln)**

เป็นเตาปูนขาวแบบเผาต่อเนื่อง ลักษณะรูปร่างท่อยาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 3 เมตร ความยาวของท่อมีตั้งแต่ 20 ─ 200 เมตร โดยปกติอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาวของท่อมีค่าประมาณ 1 : 30 ถึง 1 : 40 วางนอนเอียงขึ้นเล็กน้อย (ทำมุมประมาณ 4° กับแนวระดับ) และมีการหมุนตลอดเวลา โดยจะหมุนอยู่ระหว่าง 35 ─ 80 รอบต่อชั่วโมง กำลังการผลิตสามารถผลิตได้ถึง 1,000 ตันต่อวัน

หินปูนจะถูกป้อนทางด้านหัว ซึ่งอยู่สูงกว่าทางด้านปลาย หินปูนจะค่อย ๆ ไถลไปตามท่อยาวภายใต้แรงโน้มถ่วง และแรงเหวี่ยงของท่อยาว ตรงส่วนปลายสุดของท่อยาวจะมีอุปกรณ์ติดตั้ง คือ หัวเผา (Burner) ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่เตาปูนขาว และพัดลม (Blower) ทำหน้าที่เป่าอากาศร้อนเข้าสู่หออุ่นวัตถุดิบ (Preheater) และอากาศร้อนจะเคลื่อนตัวสวนกับทิศทางการเคลื่อนที่ของหินปูน (Counter Flow) เมื่อหินปูนเกิด Calcination แล้ว จะถูกลำเลียงเข้าสู่หม้อเย็น (Cooler) และมีพัดลมอีกตัวคอยเป่า เพื่อทำให้ปูนสุกเย็นตัวลง แล้วอากาศร้อนนี้จะพัดเข้าสู่เครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitator : EP) เพื่อแยกฝุ่นออก โดยอากาศร้อนแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหนึ่งจะนำเข้าสู่เตาปูนขาวเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน อีกส่วนจะปล่อยสู่บรรยากาศ รูปที่ 3.7 เป็นแผนภาพแสดงการทำงานของเตาแบบหมุน (Rotary Kiln) ซึ่งมีโซนการทำงานที่คล้ายกับเตาตั้ง (Vertical Shaft Kiln)




ที่มา : Michael Wingate, 1985

**รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงการทำงานของเตาแบบหมุน (Rotary Kiln)**

จะเห็นได้ว่า เนื่องจากมีการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น หัวเผา (Burner) หออุ่นวัตถุดิบ (Preheater) หม้อเย็น (Cooler) เครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitator : EP) เป็นต้น ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาแบบหมุนมีค่าสูง แต่มีผลทำให้เงินลงทุนในการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาวมีค่าสูง จึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมปูนขาวที่มีขนาดเล็ก

## 3.3 การเปรียบเทียบด้านเทคนิคของเทคโนโลยีเตาปูนขาวแต่ละประเภท

ข้อมูลทางเทคนิคของเทคโนโลยีเตาปูนขาวแต่ละประเภท (ตารางที่ 3.1) แสดงข้อมูลที่นำมาพิจารณาเลือกเทคโนโลยีเตาปูนขาวให้เหมาะสมกับการผลิต คือ กำลังการผลิตปูนขาว ประเภทของเชื้อเพลิงที่ใช้ อัตราการใช้พลังงาน เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว และการควบคุมเตาปูนขาว แต่ยังมีสิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาอีก คือ ชนิดและขนาดของหินปูนที่ใช้เป็นวัตถุดิบ คุณภาพของปูนขาวที่ได้ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกระบวนการผลิต ซึ่งเทคโนโลยีเตาปูนขาวจะมีข้อจำกัดและข้อได้เปรียบทางเทคนิคแตกต่างกันไป เช่น เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) จะมีข้อได้เปรียบ คือ เงินทุนในการก่อสร้างอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำมาก แต่เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพของเตาปูนขาวต่ำ จึงมีผลทำให้เกิดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก อีกทั้งคุณภาพของปูนสุกที่ได้ไม่ดี และทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการผลิตเนื่องจากเป็นการเผาระบบเปิดไม่มีการควบคุมก๊าซที่เกิดขึ้นในการเผาหินปูนออกสู่บรรยากาศ

**ตารางที่ 3.1 ข้อมูลทางเทคนิคของเทคโนโลยีเตาปูนขาวแต่ละประเภท**

| ประเภทของเตาปูนขาว | กำลังการผลิต (ตันต่อวัน) | ประเภทของเชื้อเพลิงที่ใช้ | อัตราการใช้พลังงาน (kcal/kg Quicklime) | เงินลงทุนในการสร้างเตาปูนขาว | การควบคุมเตาปูนขาว |
|---|---|---|---|---|---|
| เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) | 1 – 3 | ไม้/ถ่านหิน | 2,380.95 | ต่ำมาก | ต่ำ |
| เตาตั้ง (Vertical Shaft Kiln) | | | | | |
| - Mixed Feed Shaft Kiln | 4 – 250 | ถ่านหิน | 1,345.23 | ต่ำ | ปานกลาง |
| - Annular Shaft Kiln | 100 – 350 | น้ำมันเตา | 1,085.71 | สูง | สูง |
| - Double-Inclined Kiln | 100 – 150 | ถ่านหิน | 1,080.95 | สูง | สูง |
| - Parallel Flow Kiln | 100 – 600 | น้ำมันเตา | 897.62 | สูง | สูง |
| เตาแบบหมุน (Rotary Kiln) | 400 – 1,000 | หลายชนิด | 1,395.24 | สูงมาก | สูง |

ที่มา : Robin Spence, 1985

# บทที่ 4

# เตาปูนขาวที่ใช้ในประเทศไทย

การผลิตปูนขาวทำได้โดยการนำเอาหินปูนมาผ่านกระบวนการเผา ซึ่งหินปูนที่ใช้ในการผลิตมีอยู่กระจัดกระจายทั่วทุกภาคของประเทศไทย ดังนั้นจึงพบอุตสาหกรรมปูนขาวทั่วไปในทุกภาคของประเทศไทย และจะพบมากในเขตจังหวัดภาคกลาง เช่น จังหวัดสระบุรีและราชบุรี (รายชื่อโรงงานปูนขาวในประเทศไทย แสดงไว้ในภาคผนวก ก) ซึ่งสามารถที่จะจำแนกอุตสาหกรรมปูนขาวออกตามกำลังการผลิต คือ

- อุตสาหกรรมปูนขาวขนาดเล็ก มีกำลังการผลิตปูนสุก น้อยกว่า 3,500 ตันต่อปี
- อุตสาหกรรมปูนขาวขนาดกลาง มีกำลังการผลิตปูนสุก ระหว่าง 3,500 ─ 10,000 ตันต่อปี
- อุตสาหกรรมปูนขาวขนาดใหญ่ มีกำลังการผลิตปูนสุก มากกว่า 10,000 ตันต่อปี

การผลิตปูนขาวของประเทศไทย จะพบว่าส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมปูนขาวขนาดเล็กและขนาดกลาง โดยมากเทคโนโลยีเตาปูนขาวที่ใช้ในการผลิตจะเป็นเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) เนื่องจากเงินลงทุนเริ่มแรกในการก่อสร้างที่ไม่สูงนัก และเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนทำให้ง่ายในการก่อสร้าง เตาปูนขาว อีกทั้งการควบคุมเตาปูนขาวไม่จำเป็นต้องใช้คนงานที่มีทักษะสูงนัก

ส่วนอุตสาหกรรมปูนขาวขนาดใหญ่ พบไม่มากในประเทศไทย เทคโนโลยีเตาปูนขาวที่ใช้ในการผลิตจะเป็นเตาแบบเผาต่อเนื่อง (Continuous Kiln) โดยใช้เทคโนโลยีเตาปูนขาวจากต่างประเทศ คือ เตาตั้งแบบ Parallel Flow เตาตั้งแบบ Mixed Feed และเตาแบบหมุน (Rotary Kiln) ซึ่งมีอัตราในการใช้พลังงานและประสิทธิภาพในการใช้พลังงานที่ดี แต่พบว่าเงินลงทุนในการก่อสร้างที่สูงมาก และเป็นเทคโนโลยีที่ซับซ้อน

## 4.1 ประเภทของเตาปูนขาวที่ใช้ในประเทศไทย

### 4.1.1 เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)

เป็นเตาปูนขาวขนาดเล็ก สำหรับเผาหินปูนเป็นครั้ง ๆ ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมกว้างและยาวประมาณ 7 เมตร ความสูงประมาณ 6 เมตร ก่อด้วยอิฐหนา 1.2 เมตร โดยมีขนาดกำลังการผลิตประมาณ 120 ตันต่อเตาต่อครั้ง รูปที่ 4.1 แสดงเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) และรูปที่ 4.2 แสดงแผนภาพการทำงานของเตาแบบเผาทีละครั้ง

ในการนำหินปูนใส่ลงในเตาปูนขาวอาจจะใช้คนงาน หรือในกรณีที่มีกำลังการผลิตสูงอาจจะใช้รถยกหรือสายพานลำเลียงในการยกหินปูนใส่ลงในเตาปูนขาว เมื่อทำการเผาต้องจะทำการคัดเลือกขนาดของหินปูน ให้เหมาะสมกับทางเข้าด้านหน้าของเตาปูนขาวให้อยู่ในระดับพื้นดิน

ที่มา : การศึกษาความเหมาะสมการใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดในโรงงานอุตสาหกรรม, 2547

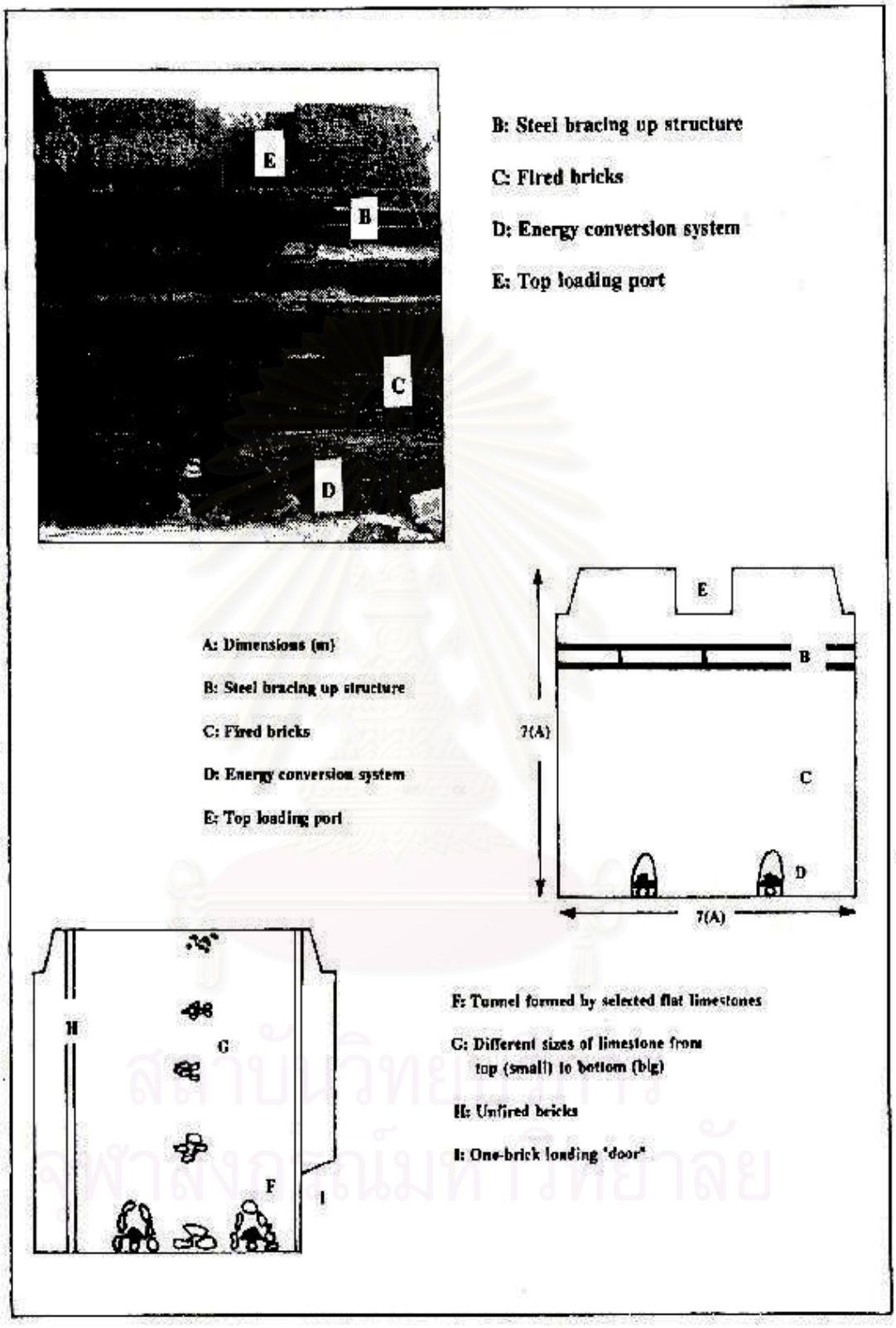
**รูปที่ 4.1 เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)**

ขณะเดียวกันหินปูนก็จะถูกใส่ลงในเตาปูนขาว โดยจัดเรียงหินปูนที่อยู่ในเตาปูนขาวตั้งแต่ด้านล่างที่ใช้หินปูนขนาดใหญ่ไปจนถึงด้านบนที่เป็นหินปูนขนาดเล็ก เมื่อได้จัดเรียงเสร็จสมบูรณ์แล้วจึงนำหินปูนขนาดเล็ก ๆ มาวางปิดที่ด้านบนของเตาปูนขาว

การเผาเป็นขั้นตอนที่สำคัญต่อการใช้พลังงานในการผลิตปูนขาว และมีผลกับคุณภาพของหินปูน ประสบการณ์ของคนงานเผาหินปูนเป็นสิ่งจำเป็น ถ้าคนงานเหล่านั้นได้รับการฝึกอบรมมาเป็นอย่างดีจะมีส่วนช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตได้ดีขึ้น หากคนงานเหล่านี้ขาดประสบการณ์หรือไม่มีความชำนาญจะทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตปูนขาวลดลง

การเผานั้นเริ่มต้นอาจจะใช้ไม้ เศษยาง หรือน้ำมันดีเซลก่อน จากนั้นจึงใช้ถ่านหินใส่ลงไปในช่องใส่เชื้อเพลิงและเริ่มเผาอย่างช้า ๆ โดยต้องคอยเติมถ่านหินตลอดเวลา อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอยู่ที่ 900 – 1,000°C (ปกติหินปูนเริ่ม Calcination ประมาณ 850°C) อากาศที่ใช้ในการเผานั้นควรเริ่มต้นส่งผ่านเข้าไปในเตาปูนขาวอย่างช้า ๆ แล้วจึงปรับเปลี่ยนความเร็วโดยการใช้พัดลม (Blower) ซึ่งเริ่มต้นควรใช้แรงลมต่ำก่อน หลังจากนั้นพอหินปูนเริ่มดูดซับความร้อนไว้และเริ่มส่งผ่านความร้อนขึ้นไปสู่ชั้นบนแล้วจึงเร่งอากาศที่เป่าโดยพัดลม (Blower) เข้าไปในเตาปูนขาวให้แรงขึ้น ต่อจากนั้น 6 ชั่วโมง ขี้เถ้าที่เกิดจากการเผาจะต้องถูกนำออกจากเตาปูนขาวเพื่อป้องกันการอุดตันที่เกิดขึ้นภายในเตาปูนขาว

ในช่วงก่อนที่จะทำการเผานั้น หินปูนที่ใช้มีลักษณะเป็นสีเทาอ่อน ๆ พอเริ่มทำการเผาหินปูนก็จะเปลี่ยนเป็นสีดำ ต่อมาหลังจากนั้น 1 – 2 วันหินปูนก็จะเปลี่ยนเป็นสีส้มเหลือง แล้วจึง




ที่มา : Ad Dankers, 1992

**รูปที่ 4.2 แผนภาพการทำงานของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)**

เปลี่ยนเป็นสีขาวในที่สุด เมื่อหินปูนเปลี่ยนเป็นสีขาวอย่างสมบูรณ์แล้วจึงหยุดทำการเผา โดยใช้เวลาเผาทั้งสิ้นประมาณ 10 ─ 15 วัน หินปูนก็จะสุกกลายเป็นปูนสุก (Quicklime) จากนั้นทิ้งไว้ให้ปูนสุกเย็นตัวลง แล้วจึงนำปูนสุกไปจำหน่าย หรือผลิตเป็นปูนขาว (Slaked Lime หรือ Hydrated Lime) ต่อไป ในระหว่างที่ปล่อยให้เตาปูนขาวเย็นตัวลง (ใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมงไปจนถึง 2 วัน) จะทำการนำขี้เถ้าที่เกิดจากการเผาออกมาก่อน ต่อมาจึงเปิดช่องทางเข้าที่ใช้ลำเลียงหินปูนเข้าไปในตอนแรกออก แล้วทำการลำเลียงปูนสุกออกจากเตาปูนขาว ใช้เวลาประมาณ 3 ─ 7 วัน ขึ้นกับขนาดของเตาปูนขาว

**4.1.2 เตาตั้งแบบ Parallel Flow**

เป็นเตาปูนขาวแบบต่อเนื่อง (Continuous Kiln) ซึ่งมีลักษณะเป็นเตาตั้ง (Vertical Shaft Kiln) ใช้เทคโนโลยีจากประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ประเภทเชื้อเพลิงที่ใช้คือน้ำมันเตา โดยมีรูปร่างเป็นปล่องทรงกระบอก 2 ปล่อง ความสูงของแต่ละปล่องประมาณ 30 เมตร โดยมีกำลังการผลิต 150 ตันต่อวัน

ลักษณะการเผานั้นจะเป็นแบบ Parallel Flow คือ หินปูนและอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เคลื่อนที่จากด้านบนลงสู่ด้านล่างของเตาปูนขาวในทิศทางเดียวกัน ที่ด้านล่างของเตาปูนขาวจะมีพัดลม (Blower) สำหรับเป่าอากาศเย็น (Cooling Air) เพื่อเป่าให้ปูนสุกเย็นตัวลงก่อนที่จะลำเลียงไปเก็บที่ไซโลโดยใช้สายพานลำเลียง โดยหลักการทำงานของเตาตั้งแบบ Parallel Flow จะทำการเผาทีละปล่อง อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จะปล่อยออกมาจากด้านบนของแต่ละปล่อง โดยขณะที่ปล่องแรกทำหน้าที่ในขั้นเผาหินปูน (Calcining Zone) ปล่องที่สองจะทำหน้าที่เป็นขั้นอุ่นให้ร้อน (Preheating Zone) โดยรับอากาศร้อนจากการเผาในปล่องแรกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ เมื่อผ่านขั้นอุ่นให้ร้อน (Preheating Zone) แล้วอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จะถูกปล่อยมาจากทางด้านบนของปล่องที่สอง จากนั้นจะมีการกลับกระบวนการเผามาที่ปล่องที่สอง ในขณะเดียวกันก็จะทำการลำเลียงปูนสุกออกทางด้านล่างพร้อมกับใส่หินปูนใหม่ที่ด้านบนของปล่องแรก ทำเช่นนี้สลับกันไป ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเผาหินปูนแต่ละรอบจะใช้ประมาณ 12 ─ 15 นาที (ขึ้นอยู่กับการตั้งค่ากำลังการผลิตเริ่มต้น)

เตาปูนขาวแบบนี้มีระบบการควบคุมด้วยระบบ PLC (Programmable Logic Control) ทำการคำนวณค่าต่าง ๆ เช่น ปริมาณการใช้น้ำมันเตาของเตาปูนขาวตามค่ากำลังการผลิตที่ตั้งไว้ สามารถควบคุมให้ผลิตภัณฑ์ปูนขาว ที่ได้เป็นแบบสุกพอดี (Soft Burn) หรือแบบสุกมาก (Hard Burn) ได้ดี

รูปที่ 4.3 แสดงเตาตั้งแบบ Parallel Flow ส่วนรูปที่ 4.4 แสดงการทำงานของกระเช้า (Skip) ลำเลียงหินปูนเข้าสู่เตาตั้งแบบ Parallel Flow

ที่มา : การศึกษาความเหมาะสมการใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดในโรงงานอุตสาหกรรม, 2547

**รูปที่ 4.3 เตาตั้งแบบ Parallel Flow**

ที่มา : การศึกษาความเหมาะสมการใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดในโรงงานอุตสาหกรรม, 2547

**รูปที่ 4.4 กระเช้า (Skip) ลำเลียงหินปูนเข้าสู่เตาตั้งแบบ Parallel Flow**

**4.1.3 เตาตั้งแบบ Mixed Feed**

เป็นเตาปูนขาวแบบต่อเนื่อง (Continuous Kiln) ซึ่งมีลักษณะเป็นเตาตั้ง (Vertical Shaft Kiln) โดยใช้เทคโนโลยีจากประเทศจีน ประเภทของเชื้อเพลิงที่ใช้ คือ ถ่านหินแอนทราไซต์ มีความสูงของเตาปูนขาวประมาณ 23 เมตร ภายในก่อด้วยอิฐทนไฟ พื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 6 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 เมตร แต่ในการผลิตจริงจะทำการก่อสร้างเตาปูนขาว 2 ชุด แต่ละชุดจะมี 3 ปล่อง เนื่องจากคุ้มค่าการลงทุนมากกว่า โดยเตาปูนขาวทั้งสองชุด จะมีอัตราการผลิตรวมอยู่ที่ 250 ตันต่อวัน

การลำเลียงวัตถุดิบที่เป็นทั้งหินปูนและถ่านหินแอนทราไซต์ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงจะใช้สายพานลำเลียงขึ้นสู่ด้านบนของเตาปูนขาว การป้อนหินปูนและถ่านหินแอนทราไซต์จะป้อนสลับกันเป็นชั้น ๆ (Mixed Feed) อัตราส่วนการผสมระหว่างหินปูนต่อถ่านหินแอนทราไซต์อยู่ที่ประมาณ 6 ต่อ 1 จากนั้นจะปล่อยให้หินปูนตกตัวมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกตามแนวดิ่ง ซึ่งหลังจากผ่านโซนการทำงาน คือ ผ่านกระบวนการอุ่นให้ร้อน (Preheating Zone) การเผาหินปูน (Calcining Zone) และการทำให้เย็นตัว (Cooling Zone) ในที่สุดก็จะได้ปูนสุก ซึ่งปูนสุกที่ได้นี้จะเป็นแบบสุกมาก (Hard Burn)

สิ่งที่สำคัญมากของเตาปูนขาวแบบนี้คือ อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จะไหลสวนทาง (Counter Flow) กับการเคลื่อนที่ของหินปูนที่ใส่ลงในช่องบนสุดของเตาปูนขาว ที่ด้านล่างของเตาปูนขาวจะติดตั้งพัดลม (Blower) เพื่อทำหน้าที่เป่าอากาศเข้าสู่เตาปูนขาว ดังนั้นอากาศเสียก็จะเกิดที่ด้านบนสุดของเตาปูนขาว จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนใน 2 อย่างคือ หินปูนที่อยู่ด้านบนสุดของเตาปูนขาวจะถูกอุ่นให้ร้อนโดยความร้อนที่ได้จากอากาศที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตและอากาศที่เข้าสู่ด้านล่างของเตาปูนขาวได้รับความร้อนการทำให้เย็นตัว (Cooling Zone) ก่อนเข้าสู่การเผาหินปูน (Calcining Zone) จะลอยขึ้นด้านบนสุดของเตาปูนขาว โดยที่ด้านบนจะก่ออิฐทำเป็นปล่องไอเสีย (Stack) ทำหน้าที่ปล่อยอากาศเสียออกทางด้านบนของเตาปูนขาว ซึ่งปล่องไอเสีย (Stack) นี้มีความสูงประมาณ 60 เมตร โดยติดตั้งที่ความสูงประมาณ 3 ใน 4 ของความสูงของเตาปูนขาว จะทำการก่อสร้างปล่องไอเสีย (Stack) ร่วมกันอยู่ตรงกลางระหว่างเตาปูนขาวทั้ง 2 ชุด โดยอากาศที่ปล่อยออกจากเตาปูนขาวจะมีอุณหภูมิประมาณ 100°C

รูปที่ 4.5 แสดงเตาตั้งแบบ Mixed Feed ส่วนรูปที่ 4.6 แสดงสายพานที่ทำการลำเลียงถ่านหินแอนทราไซต์เข้าสู่เตาตั้งแบบ Mixed Feed

ที่มา : การศึกษาความเหมาะสมการใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดในโรงงานอุตสาหกรรม, 2547

**รูปที่ 4.5 เตาตั้งแบบ Mixed Feed**

ที่มา : การศึกษาความเหมาะสมการใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดในโรงงานอุตสาหกรรม, 2547

**รูปที่ 4.6 สายพานที่ทำการลำเลียงถ่านหินแอนทราไซต์เข้าสู่เตาตั้งแบบ Mixed Feed**

**4.1.4 เตาแบบหมุน (Rotary Kiln)**

เป็นเตาปูนขาวแบบต่อเนื่อง (Continuous Kiln) ที่มีลักษณะเป็นท่อกลมวางในแนวระนาบเอียง ทำมุมกับพื้นราบ 4° โดยใช้เหล็กเกรดพิเศษ มีความคงทนสูงและสามารถทนความร้อนได้ดี ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ยาว 60 เมตร ภายในก่อด้วยอิฐทนไฟ มีกำลังการผลิตประมาณ 400 ตันต่อวัน

มีลักษณะการทำงานเป็นแบบ Counter Flow โดยหินปูนภายในปล่องจะเคลื่อนที่ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกและแรงเหวี่ยงของปล่องผ่านการอุ่นให้ร้อน การเผา และการปล่อยให้เย็นตัวลง จนได้ปูนขาวปล่อยออกที่ปลายปล่อง สามารถกำหนดผลิตภัณฑ์ปูนขาวให้เป็นแบบสุกพอดี (Soft Burn) หรือแบบสุกมาก (Hard Burn) ได้ค่อนข้างง่าย โดยที่อุปกรณ์ไฟฟ้าและระบบควบคุมใช้ระบบ PLC (Programmable Logic Control) ที่สามารถควบคุมกระบวนการผลิตได้ทุกขั้นตอนจากห้องควบคุมและมีระบบสัญญาณเตือนภัยและระวังภัยตามจุดต่าง ๆ แจ้งให้ผู้ควบคุมทราบเมื่อเกิดปัญหาขึ้น

ในกระบวนการผลิตจะเริ่มต้นโดยการคัดขนาดหินปูนให้เหมาะสมแล้วนำไปพักเก็บไว้ที่ไซโล จากนั้นจึงค่อย ๆ ป้อนหินปูนไปที่หออุ่นวัตถุดิบ (Preheater) ซึ่งจะเก็บความร้อนที่เหลือจากเตาปูนขาว (ประมาณ 800 – 900°C) ภายในหออุ่นวัตถุดิบนี้จะประกอบไปด้วยแผ่นตะกรับ (Grate Plate) วางอยู่บนโซ่ลำเลียงซึ่งวิ่งอย่างช้า ๆ เพื่อให้หินปูนบนตะกรับค่อย ๆ ดูดซับความร้อนที่เหลือจากเตาปูนขาว อุณหภูมิสุดท้ายของอากาศก่อนทิ้งจะมีค่าประมาณ 100 – 200°C และจะถูกนำกลับไปอุ่นถ่านหินที่โรงบดถ่านหินต่อไป

วัตถุดิบที่เคลื่อนเข้าสู่เตาปูนขาวจะค่อย ๆ เคลื่อนที่ต่อลงมาสู่ด้านล่างของเตาปูนขาว โดยมีอัตราเร็วในการหมุนอยู่ที่ 2.5 ─ 2.8 รอบต่อนาที ซึ่งอัตราเร็วในการหมุนนี้จะเป็นตัวกำหนดอัตราการผลิตและอัตราการใช้เชื้อเพลิง เตาปูนขาวจะมีฐานรองรับอยู่ 4 จุด ฐานรองรับที่ 2 จะเป็นตัวขับเคลื่อนปล่องให้หมุน โดยมี Gear Box เป็นตัวปรับเปลี่ยนความเร็วในการหมุน โดยภายในเตาปูนขาวจะก่อด้วยอิฐทนไฟ ปล่องจะเชื่อมอยู่กับหัวเผา (Burner) ซึ่งเป็นตัวให้ความร้อนแก่เตาปูนขาว ที่จุดนี้จะมีพัดลม (Blower) เป่าลมร้อนเข้าสู่หออุ่นวัตถุดิบ (Preheater) เมื่อหินปูนเกิด Calcination แล้ว จะถูกลำเลียงเข้าสู่หม้อเย็น (Cooler) โดยที่หม้อเย็นจะมีพัดลมอีกตัวเป่าให้หินปูนเย็นตัวลง และลมร้อนนี้จะพัดเข้าสู่เครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitator: EP) เพื่อแยกฝุ่นละอองออก โดยลมร้อนจะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งจะนำเข้าสู่เตาปูนขาวเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน และอีกส่วนหนึ่งจะปล่อยออกสู่บรรยากาศ

รูปที่ 4.7 แสดงเตาแบบหมุน (Rotary Kiln) ส่วนรูปที่ 4.8 แสดง Gear Box ซึ่งทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนความเร็วในการหมุนของเตาแบบหมุน

ที่มา : การศึกษาความเหมาะสมการใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดในโรงงานอุตสาหกรรม, 2547

**รูปที่ 4.7 เตาแบบหมุน (Rotary Kiln)**

ที่มา : การศึกษาความเหมาะสมการใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดในโรงงานอุตสาหกรรม, 2547

**รูปที่ 4.8 Gear Box ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนความเร็วในการหมุนของเตาแบบหมุน**

## 4.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย

การวิเคราะห์และเปรียบเทียบเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย ใช้ข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลที่จำเป็น และเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมปูนขาวในประเทศไทย ซึ่งได้จากการสอบถามและรวบรวมข้อมูลจากผู้ประกอบการอุตสาหกรรมปูนขาวเพื่อทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบไม่ว่าจะเป็นทางวิศวกรรม และทางการเงิน

### 4.2.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบทางวิศวกรรม

#### 1) การวิเคราะห์และเปรียบเทียบด้านพลังงานที่ใช้ในการผลิต

การวิเคราะห์และเปรียบเทียบด้านพลังงานที่ใช้ในการผลิตของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย ซึ่งข้อมูลที่นำมาใช้ คือ กำลังการผลิต ปริมาณและค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิงที่ใช้ของเตาปูนขาวแต่ละแบบ โดยข้อมูลเหล่านี้ได้จากการสอบถาม และรวบรวมข้อมูลจากผู้ประกอบการอุตสาหกรรมปูนขาว มาทำการคำนวณและเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัม และประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน (Thermal Efficiency) ของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย (แสดงไว้ในตารางที่ 4.1)

เตาปูนขาวส่วนใหญ่จะทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงประมาณ $1{,}000 - 1{,}300^{\circ}C$ หินปูนจะถูกให้ความร้อนจนอุณหภูมิถึงจุดที่ทำให้เกิด Calcination ในทางทฤษฎีพลังงานที่ใช้ใน Calcination แล้วได้ปูนสุก (Quicklime) 1 กิโลกรัม มีค่า 770 kcal แต่ในทางปฏิบัติแล้วพลังงานที่ใช้จะมากกว่าในทางทฤษฎี เพราะมีพลังงานที่สูญเสีย (Energy Loss) เกิดจากการที่ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานที่ใช้มีค่าต่ำ ซึ่งสาเหตุของการสูญเสียไปในกระบวนการผลิตปูนขาวมีดังนี้คือ

- การสูญเสียพลังงานไปในอากาศที่ปล่อย (Exhaust Gases) ออกมาจากเตาปูนขาว
- การสูญเสียพลังงานไปในช่วงที่ปล่อยปูนสุกออกมาจากเตาปูนขาว
- การสูญเสียพลังงานไปในการไล่ความชื้นของหินปูนและเชื้อเพลิง
- การสูญเสียพลังงานไปในการแผ่รังสีความร้อน การนำความร้อน และการพาความร้อนที่ผิวผนังของเตาปูนขาว

ประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน (Thermal Efficiency) ขึ้นอยู่กับชนิดของหินปูนที่นำมาใช้ในการผลิต ประเภทของเตาปูนขาวที่นำมาใช้ ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ และทักษะของผู้ควบคุมเตาปูนขาว โดยสามารถที่คำนวณจาก

$$\text{Thermal Efficiency} = \frac{\text{Theoretical Energy Requirement x \%Available Oxide Content}}{\text{Heating Value per kg Fuel Used x kg Fuel Used per kg Quicklime}}$$

โดยรายละเอียดการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการผลิตและประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน (Thermal Efficiency) แสดงไว้ในภาคผนวก ข

**ตารางที่ 4.1 พลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนสุก และประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย**

| รายการ | เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) | เตาตั้งแบบ Parallel Flow | เตาตั้งแบบ Mixed Feed | เตาแบบหมุน (Rotary Kiln) |
|---|---|---|---|---|
| 1. กำลังการผลิตปูนสุก | 1,200 ตัน/ปี | 54,000 ตัน/ปี | 90,000 ตัน/ปี | 72,000 ตันปี |
| 2. ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ | 900 ตัน/ปี (ถ่านหินลิกไนต์) | 5,022,000 ลิตร/ปี (น้ำมันเตา) | 24,300 ตัน/ปี (ถ่านหินแอนทราไซต์) | 18,000 ตัน/ปี (ถ่านหินบิทูมินัส) |
| 3. อัตราการใช้เชื้อเพลิง | 750 กก./ตันปูนสุก (ถ่านหินลิกไนต์) | 93 ลิตร/ตันปูนสุก (น้ำมันเตา) | 270 กก./ตันปูนสุก (ถ่านหินแอนทราไซต์) | 250 กก./ตันปูนสุก (ถ่านหินบิทูมินัส) |
| 4. ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง | 5,100 kcal/kg | 9,900 kcal/l | 7,000 kcal/kg | 6,000 kcal/kg |
| 5. พลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัม | 3,825 kcal | 920.70 kcal | 1,890 kcal | 1,500 kcal |
| 6. ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาปูนขาว | 17.72 % | 73.60 % | 35.85 % | 45.17 % |

หมายเหตุ : น้ำมันเตา 1.053 ลิตร หนักท่ากับ 1 กิโลกรัม

ข้อมูลของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) จากบริษัท แอล.เอส. เอ็ม. (1999) จำกัด

ข้อมูลของเตาตั้งแบบ Parallel Flow จากบริษัท ปูนคุณภาพ จำกัด

ข้อมูลของเตาตั้งแบบ Mixed Feed จากบริษัท อโศกเคมีคอล จำกัด

ข้อมูลของเตาแบบหมุน (Rotary Kiln) จากบริษัท อโศกเคมีคอล จำกัด

รายละเอียดการคำนวณประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย แสดงไว้ในภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**2) การวิเคราะห์และเปรียบเทียบด้านเทคนิค**

โดยนำข้อมูลของกระบวนการผลิตและเทคโนโลยีเตาปูนขาวที่ได้รวบรวมมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบถึงข้อดีและข้อเสียของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทยไม่ว่าจะเป็นกำลังการผลิตปูนสุก ประเภทของเชื้อเพลิงที่ใช้ การควบคุมเตาปูนขาว เงินทุนในการก่อสร้างระบบในการผลิต และลักษณะของปูนสุกที่ได้ เป็นต้น (ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย)

**เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)**

**ข้อดี**

(1) เงินลงทุนเริ่มแรกในการก่อสร้างเตาปูนขาวจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำมากคือประมาณ 500,000 ─ 1,000,000 บาทต่อเตา (กำลังการผลิต 1,200 ตันต่อปี)

(2) ใช้แรงงานคนเป็นหลัก และการควบคุมเตาปูนขาวไม่ต้องการใช้คนงานที่มีความรู้สูงมากนัก เนื่องจากเทคโนโลยีเตาปูนขาวที่ใช้ไม่ซับซ้อน

**ข้อเสีย**

(1) คุณภาพของปูนขาวที่ได้ไม่ดี เนื่องจากประสิทธิภาพของเตาปูนขาวไม่ดีและไม่มีการควบคุมเรื่องความชื้น

(2) สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก เนื่องจากเป็นเตาปูนขาวระบบเปิดทำให้มีการสูญเสียความร้อนมาก

(3) เสียเวลาในการเผานานมาก คือ โดยเฉลี่ยเตาปูนขาว 1 เตา ใช้เวลาในการเรียงหินปูน 1 วัน ใช้เวลาในการเผา 10 ─ 15 วัน และเวลาใช้ในการทิ้งให้ปูนสุกเย็นตัว 2 ─ 3 วัน รวมทั้งสิ้นประมาณ 13 ─ 18 วัน

(4) ส่งผลให้เกิดปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อมด้านมลภาวะทางอากาศ เนื่องจากเป็นระบบเปิด ไม่มีการควบคุมเรื่องก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้

(5) ใช้วัตถุดิบเป็นหินปูนขนาดใหญ่มาก ต้องใช้คนงานคัดขนาดของหินปูน

**เตาตั้งแบบ Parallel Flow**

**ข้อดี**

(1) ประสิทธิภาพในการเผาสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเตาปูนขาวแบบอื่น

(2) ใช้เวลา 1 รอบในการผลิตปูนสุกไม่นาน คือ ประมาณ 24 ชั่วโมง หินปูนถูกเผากลายเป็นปูนสุก

(3) เนื่องจากเป็นการเผาแบบต่อเนื่อง ถ้ามีความผิดพลาดในการเผาเกิดขึ้น จะสามารถปรับเปลี่ยนค่าต่าง ๆ เพื่อให้ปูนสุกที่ได้สุกพอดี (Soft Burn) และสามารถควบคุมการผลิตได้

**ข้อเสีย**

(1) เงินลงทุนเริ่มแรกในการก่อสร้างเตาปูนขาวจัดอยู่ในเกณฑ์ที่สูง

(2) หินปูนที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการเผาจะต้องมีขนาดพอเหมาะ

(3) ผู้ปฏิบัติการต้องมีความรู้ในการควบคุมการผลิต เนื่องจากใช้ระบบ PLC (Programmable Logic Control) ควบคุมกระบวนการผลิต

(4) ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงสูง หากใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง แต่หากออกแบบให้ใช้ถ่านหินก็จะสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลงไปได้มาก

**เตาตั้งแบบ Mixed Feed**

**ข้อดี**

(1) ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงต่ำ เนื่องจากใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง

(2) เมื่อเทียบกระบวนการผลิตปูนขาว เตาตั้งแบบ Mixed Feed ทำได้ง่ายกว่าเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) เนื่องจากเป็นการเผาแบบต่อเนื่อง

**ข้อเสีย**

(1) ปูนสุกที่ได้เป็นแบบสุกมาก (Hard Burn)

(2) ต้องใช้วัตถุดิบที่เป็นหินปูนขนาดใหญ่

(3) เงินลงทุนเริ่มแรกในการก่อสร้างเตาปูนขาวจัดอยู่ในเกณฑ์ที่สูงกว่าเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)

**เตาแบบหมุน (Rotary Kiln)**

**ข้อดี**

(1) สามารถใช้เชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่มีค่าความร้อน (Heating Value) สูงมาใช้แทนถ่านหินในการผลิตปูนขาวได้

(2) สามารถใช้หินปูนที่มีขนาดเล็กกว่า 10 มิลลิเมตรได้

(3) มีกำลังการผลิตที่สูง เมื่อเทียบกับเตาปูนขาวแบบอื่น

(4) มีค่าใช้จ่ายในด้านแรงงานต่ำ เนื่องจากใช้คนงานในการควบคุมเตาปูนขาวน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังการผลิตที่เท่ากัน

**ข้อเสีย**

(1) เงินลงทุนเริ่มแรกในการก่อสร้างเตาปูนขาวจัดอยู่ในเกณฑ์ที่สูงมาก

(2) อัตราการใช้พลังงานในการเผาต่อน้ำหนักปูนสุกที่ได้มีค่าสูง

(3) ต้องมีการตรวจสอบสภาพของเตาปูนขาวเป็นอย่างดี เพื่อไม่ให้เกิดรอยรั่วภายในเตาปูนขาว ซึ่งเป็นสาเหตุของการสูญเสียความร้อน

(4) ผู้ปฏิบัติการต้องมีความรู้ในการควบคุมการผลิต

**ตารางที่ 4.2 ข้อมูลทางเทคนิคของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย**

| รายการ | เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) | เตาตั้งแบบ Parallel Flow | เตาตั้งแบบ Mixed Feed | เตาแบบหมุน (Rotary Kiln) |
|---|---|---|---|---|
| 1. ประเภทของเชื้อเพลิงที่ใช้ | ถ่านหิน (ลิกไนต์) | น้ำมันเตา | ถ่านหิน (แอนทราไซต์) | ถ่านหิน (บิทูมินัส) |
| 2. การควบคุมเตาปูนขาว | ไม่ต้องมีทักษะมากนัก | ต้องมีทักษะสูง | ต้องมีทักษะพอสมควร | ต้องมีทักษะสูง |
| 3. เงินลงทุนเริ่มแรก | ต่ำมาก (750,000 บาท) | สูง (150,000,000 บาท) | สูง (250,000,000 บาท) | สูงมาก (800,000,000 บาท) |
| 4. แรงงานที่ใช้ในการผลิต | มาก (5 คนต่อเตาต่อกะ) | ปานกลาง (3 คนต่อเตาต่อกะ) | มาก (5 คนต่อเตาต่อกะ) | ปานกลาง (3 คนต่อเตาต่อกะ) |
| 5. ระบบในการผลิต | ไม่ต่อเนื่อง | ต่อเนื่อง (Counter Flow /Parallel Flow) | ต่อเนื่อง (Counter Flow) | ต่อเนื่อง (Counter Flow) |
| 6. ขนาดของหินปูนที่ป้อน | ขนาดใหญ่มาก (75 – 150 มิลลิเมตร) | ขนาดใหญ่ (50 – 100 มิลลิเมตร) | ขนาดใหญ่ (50 – 100 มิลลิเมตร) | ขนาดใหญ่ถึงขนาดเล็ก (0 – 100 มิลลิเมตร) |
| 7. ปูนสุกที่ได้ส่วนใหญ่ | Hard Burn | Hard Burn และ Soft Burn | Hard Burn | Hard Burn และ Soft Burn |
| 8. ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาปูนขาว | ต่ำ (17.72 %) | สูงมาก (73.60 %) | ปานกลาง (35.85 %) | สูง (45.17 %) |

หมายเหตุ : ข้อมูลของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) จากบริษัท แอล.เอส. เอ็ม. (1999) จำกัด
ข้อมูลของเตาตั้งแบบ Parallel Flow จากบริษัท ปูนคุณภาพ จำกัด
ข้อมูลของเตาตั้งแบบ Mixed Feed จากบริษัท อโศกเคมีคอล จำกัด
ข้อมูลของเตาแบบหมุน (Rotary Kiln) จากบริษัท อโศกเคมีคอล จำกัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**4.2.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบทางการเงิน**

โดยนำข้อมูลที่เกี่ยวกับต้นทุนในการผลิต ไม่ว่าจะเป็นเงินลงทุนในก่อสร้าง ต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม และค่าแรงงาน เป็นต้น รวมถึงรายได้จากการขายปูนขาว นำมาคำนวณหาต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาวของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย และทำการวิเคราะห์กระแสเงิน (Cash Flow Analysis) แล้วนำวิเคราะห์และเปรียบเทียบที่มีเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

**1) ต้นทุนในการผลิต**

การศึกษาและวิเคราะห์ในเรื่องต้นทุนการผลิตปูนขาวของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย ซึ่งข้อมูลดิบที่ใช้ได้มาจากการสอบถามและรวบรวมข้อมูลจากผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทย ซึ่งต้นทุนในการผลิตปูนขาวสามารถแบ่งได้ดังนี้

**(1) เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว** จะรวมถึงค่าติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการผลิต เช่น ระบบลำเลียงวัสดุ ระบบการขนส่งวัสดุ และระบบการย่อยวัตถุดิบ เป็นต้น ซึ่งได้จากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการอุตสาหกรรมปูนขาว

**(2) ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว** จะรวมถึงค่าแรงงาน และค่าวัสดุที่ใช้ซ่อมแซมเตาปูนขาว และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการผลิต เป็นต้น ซึ่งได้จากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการอุตสาหกรรมปูนขาว

**(3) ค่าแรงงาน** จะรวมถึงค่าแรงงานที่เป็นคนงานขนวัตถุดิบและปูนขาว และผู้ที่ควบคุมเตาปูนขาว เป็นต้น ซึ่งได้จากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการอุตสาหกรรมปูนขาว

**(4) ค่าหินปูน** จะรวมถึงค่าขนส่งหินปูนถึงหน้าโรงงาน เป็นต้น ซึ่งได้จากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการอุตสาหกรรมปูนขาว

**(5) ค่าเชื้อเพลิง** จะรวมถึงค่าขนส่งเชื้อเพลิงถึงหน้าโรงงาน เป็นต้น ซึ่งได้จากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการอุตสาหกรรมปูนขาว

**(6) ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ** จะรวมถึงค่าบริหารงาน และค่าไฟฟ้าที่ใช้ภายในโรงงาน เป็นต้น ซึ่งได้จากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการอุตสาหกรรมปูนขาว

โดยรายละเอียดการคำนวณต้นทุนต่าง ๆ ในการผลิตของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย และอายุการใช้งานของเตาปูนขาวแต่ละแบบ (แสดงไว้ในภาคผนวก ค) จากข้อมูลของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย จะนำมาคำนวณหาต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ส่วนแผนภูมิแท่งแสดงต้นทุนการผลิตปูนขาวของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 และสัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) เตาตั้งแบบ Parallel Flow เตาตั้งแบบ Mixed Feed และเตาแบบหมุน (Rotary Kiln) แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 ถึง 4.12 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.3 ต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย**

| รายการ | เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) (ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง) | | เตาตั้งแบบ Parallel Flow (ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง) | | เตาตั้งแบบ Mixed Feed (ใช้ถ่านหินแอนทราไซต์เป็นเชื้อเพลิง) | | เตาแบบหมุน (Rotary Kiln) (ใช้ถ่านหินบิทูมินัสเป็นเชื้อเพลิง) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (บาท/ตันปูนขาว) | (% ของต้นทุนรวม) | (บาท/ตันปูนขาว) | (% ของต้นทุนรวม) | (บาท/ตันปูนขาว) | (% ของต้นทุนรวม) | (บาท/ตันปูนขาว) | (% ของต้นทุนรวม) |
| 1. เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว | 62.50 | 4.45 | 138.88 | 11.32 | 277.78 | 24.56 | 555.56 | 42.13 |
| 2. ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว | 33.33 | 2.37 | 27.78 | 2.27 | 100.00 | 8.84 | 80.00 | 6.07 |
| 3. ค่าแรงงาน | 200.00 | 14.23 | 25.67 | 2.09 | 31.30 | 2.77 | 43.00 | 3.26 |
| 4. ค่าหินปูน (รวมค่าขนส่ง) | 260.00 | 18.49 | 260.00 | 21.20 | 260.00 | 22.99 | 260.00 | 19.72 |
| 5. ค่าเชื้อเพลิง (รวมค่าขนส่ง) | 825.00 | 58.68 | 744.00 | 60.67 | 432.00 | 38.19 | 325.00 | 24.65 |
| 6. ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ | 25.00 | 1.78 | 30.00 | 2.45 | 30.00 | 2.65 | 55.00 | 4.17 |
| **รวม** | **1,405.83** | **100.00** | **1,226.33** | **100.00** | **1,131.08** | **100.00** | **1,318.56** | **100.00** |

หมายเหตุ : ราคาน้ำมันเตา 8 บาทต่อลิตร

ราคาถ่านหินลิกไนต์ 1,100 บาทต่อตัน

ราคาถ่านหินบิทูมินัส 1,300 บาทต่อตัน

ราคาถ่านหินแอนทราไซต์ 1,600 บาทต่อตัน

ข้อมูลของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) จากบริษัท แอล.เอส. เอ็ม. (1999) จำกัด

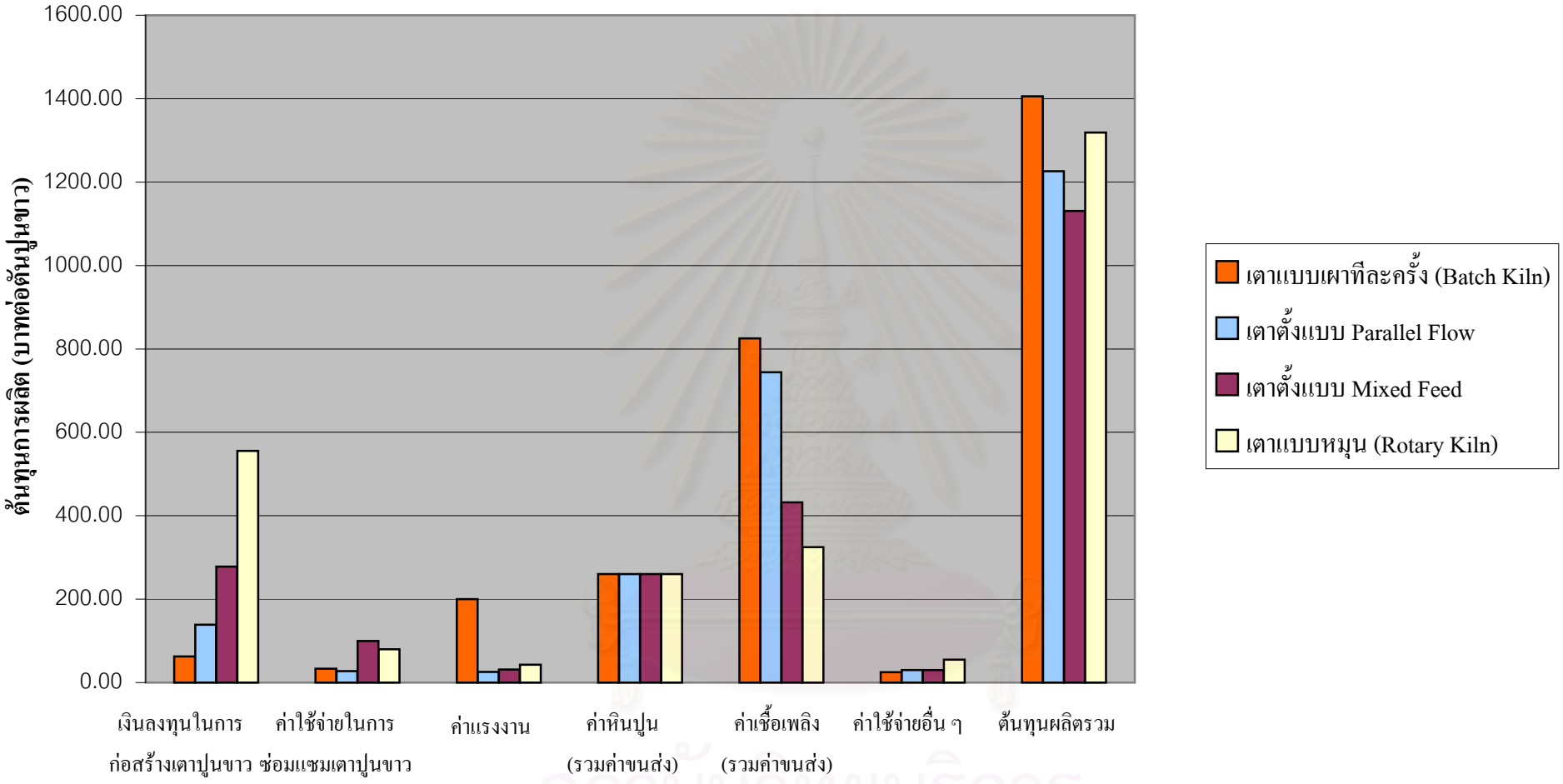
ข้อมูลของเตาตั้งแบบ Parallel Flow จากบริษัท ปูนคุณภาพ จำกัด

ข้อมูลของเตาตั้งแบบ Mixed Feed จากบริษัท อโศกเคมีคอล จำกัด

ข้อมูลของเตาแบบหมุน (Rotary Kiln) จากบริษัท อโศกเคมีคอล จำกัด

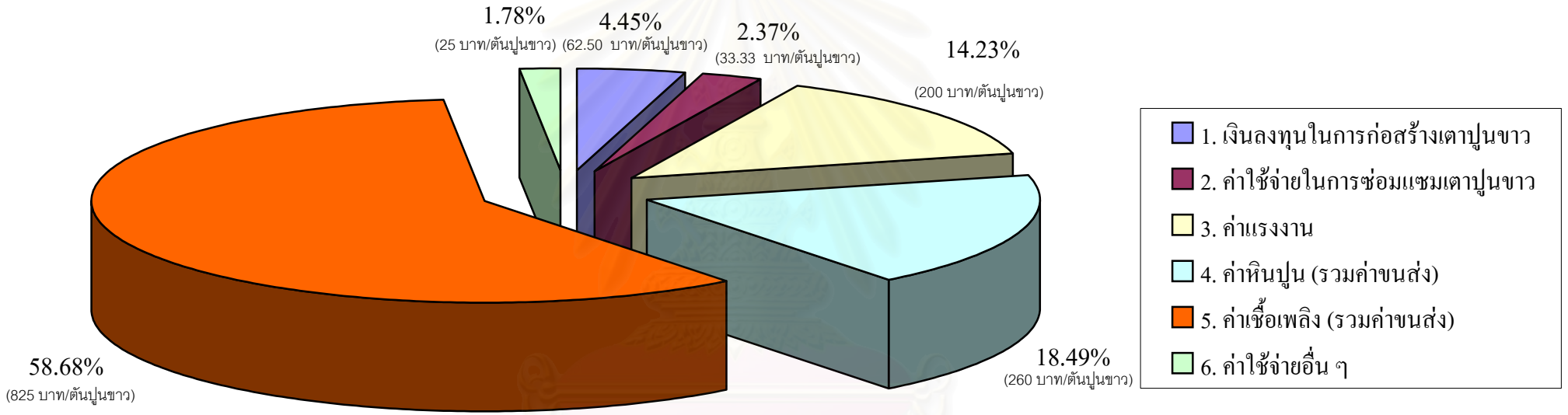
รายละเอียดของต้นทุนต่าง ๆ ในการผลิตของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย แสดงไว้ในภาคผนวก ค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 4.9 แผนภูมิแท่งแสดงต้นทุนการผลิตปูนขาวของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย**

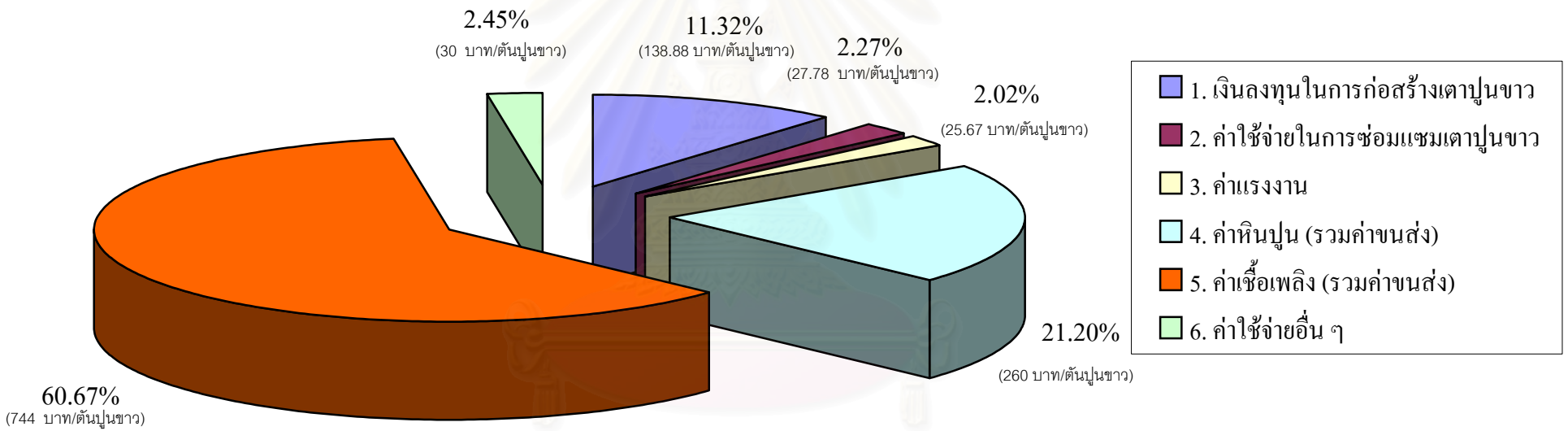
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**หมายเหตุ :** ต้นทุนผลิตรวม 1,405.83 บาต่อตันปูนขาว

**รูปที่ 4.10 สัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง**

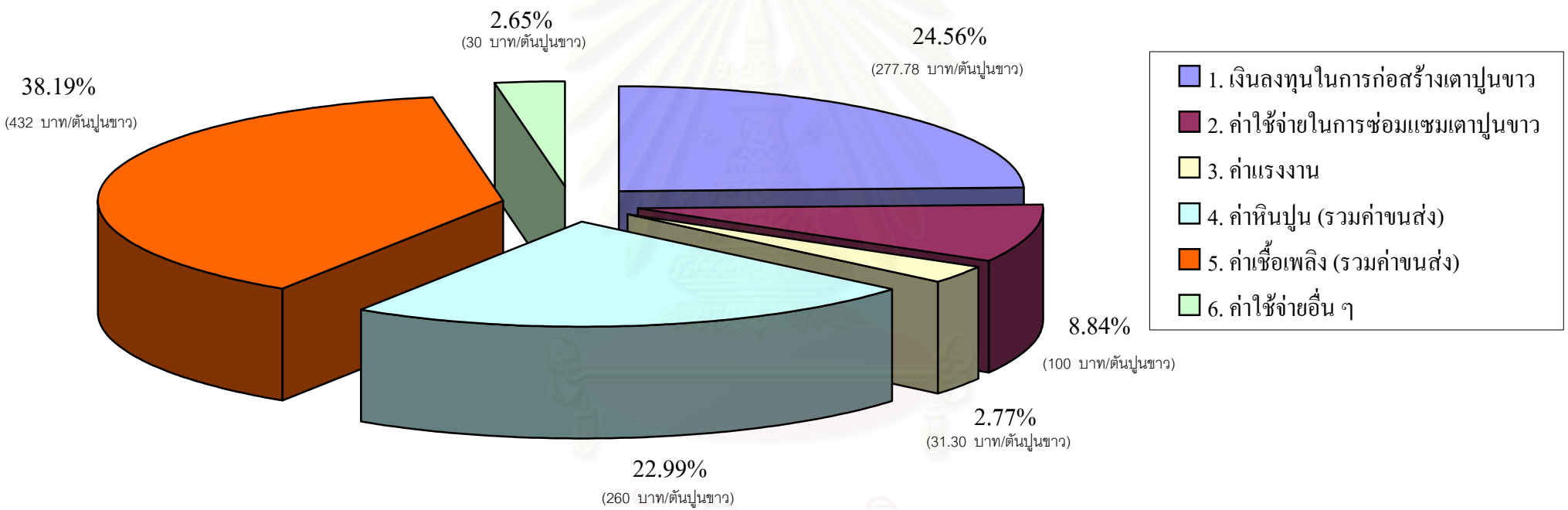
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**หมายเหตุ :** ต้นทุนผลิตรวม 1,226.33 บาทต่อตันปูนขาว

**รูปที่ 4.11 สัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งแบบ Parallel Flow ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง**

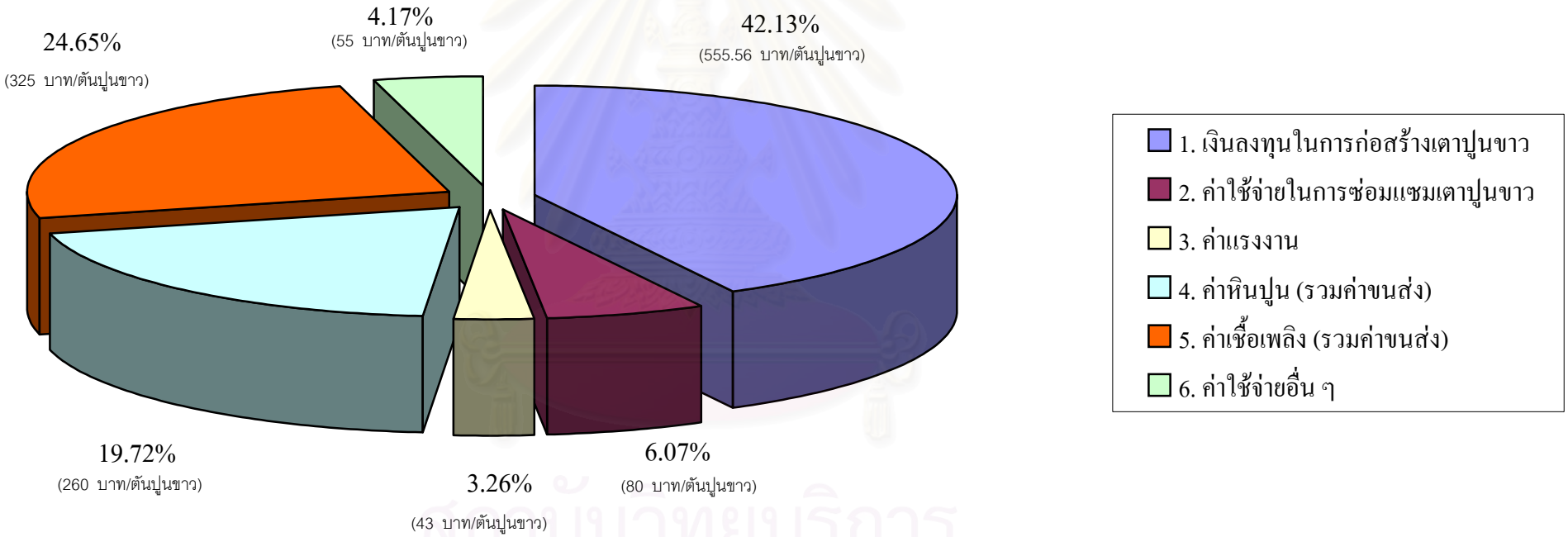
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**หมายเหตุ :** ต้นทุนผลิตรวม 1,131.08 บาทต่อตันปูนขาว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**รูปที่ 4.12 สัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งแบบ Mixed Feed ใช้ถ่านหินแอนทราไซต์เป็นเชื้อเพลิง**




**หมายเหตุ :** ต้นทุนผลิตรวม 1,318.56 บาทต่อตันปูนขาว

**รูปที่ 4.13 สัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบหมุน (Rotary Kiln) ใช้ถ่านหินบิทูมินัสเป็นเชื้อเพลิง**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย (ตารางที่ 4.3) จะพบว่า ต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว 1 ตันของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) มีต้นทุนที่สูงที่สุดคือ 1,405.83 บาท ซึ่งค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงของเตาแบบเผาทีละครั้งมีค่ามากถึงร้อยละ 58.68 ของต้นทุนในการผลิต (825 บาทต่อตันปูนขาว) ดังนั้นจึงทำให้ต้นทุนในการผลิตนั้นสูง เป็นปัญหาใหญ่สำหรับผู้ประกอบการ เนื่องจากไม่สามารถทำให้ราคาขายของปูนขาวสูงกว่าราคาในขณะนี้ได้ และยังต้องแข่งขันกับผู้ประกอบการรายอื่นที่ใช้เตาแบบเผาต่อเนื่อง (Continuous Kiln) ที่มีต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตที่ต่ำกว่าคือ เตาตั้งแบบ Parallel Flow (ต้นทุนการผลิต 1,226.33 บาทต่อตันปูนขาว) เตาตั้งแบบ Mixed Feed (ต้นทุนการผลิต 1,131.08 บาทต่อตันปูนขาว) และเตาแบบหมุน (ต้นทุนการผลิต 1,318.56 บาทต่อตันปูนขาว)

จากแผนภูมิแท่งของต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาวของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย (ดูรูปที่ 4.9 ประกอบ) สามารถพิจารณาค่าใช้จ่ายต่อหน่วยในการผลิตแต่ละด้านดังนี้

- เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว พบว่า เตาแบบหมุนมีค่าใช้จ่ายที่สูงที่สุดคือ 555.56 บาทต่อตันปูนขาว เนื่องจากเป็นเตาปูนขาวที่ใช้เทคโนโลยีที่ซับซ้อน และต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการผลิตที่มีราคาแพง เช่น เครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitator: EP) และหัวเผา (Burner) เป็นต้น ทำให้คำนวณเงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาวต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว 1 ตัน มีค่าใช้จ่ายสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเตาปูนขาวแบบอื่น
- ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว พบว่า เตาตั้งแบบ Mixed Feed มีค่าใช้จ่ายที่สูงที่สุดคือ 100 บาทต่อตันปูนขาว เนื่องจากส่วนที่ต้องเปลี่ยนและซ่อมแซมตลอดทุกปีคือผนังของเตาปูนขาวที่เป็นอิฐทนไฟ (Refractory Brick) ที่มีราคาแพง ทำให้คำนวณค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาวต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว 1 ตัน มีค่าใช้จ่ายสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเตาปูนขาวแบบอื่น
- ค่าแรงงาน พบว่า เตาแบบเผาทีละครั้งมีค่าใช้จ่ายที่สูงที่สุดคือ 555.56 บาทต่อตันปูนขาว เนื่องจากจำนวนของแรงงานที่ใช้ในการผลิตมีมาก (5 คนต่อเตาต่อกะ) เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังการผลิตเพียง 1,200 ตันต่อปี ทำให้คำนวณค่าแรงงานต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว 1 ตัน มีค่าใช้จ่ายสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเตาปูนขาวแบบอื่น
- ค่าหินปูน (รวมค่าขนส่ง) พบว่ามีค่าใช้จ่ายเท่ากันคือ 260 บาทต่อตันปูนขาว เนื่องจากสมมติให้โรงงานปูนขาวอยู่ในพื้นที่ใกล้กัน และแหล่งหินปูนที่ใช้เป็นวัตถุดิบอยู่ใกล้กับโรงงานปูนขาว
- ค่าเชื้อเพลิง (รวมค่าขนส่ง) พบว่า เตาแบบเผาทีละครั้งมีค่าใช้จ่ายที่สูงที่สุดคือ 825 บาทต่อตันปูนขาว เนื่องจากประสิทธิภาพในการใช้พลังงานมีค่าต่ำมาก (17.72%) ทำให้สิ้นเปลืองถ่านหินลิกไนต์ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงมากคือ ต้องใช้ถ่านหินลิกไนต์ถึง 750 กิโลกรัมต่อตัน

ปูนสุก ทำให้คำนวณค่าเชื้อเพลิงต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว 1 ตัน มีค่าใช้จ่ายสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเตาปูนขาวแบบอื่น

- ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ที่เป็นค่าบริหารงาน และค่าไฟฟ้าที่ใช้ภายในโรงงาน พบว่าเตาแบบหมุนมีค่าใช้จ่ายที่สูงที่สุดคือ 55 บาทต่อตันปูนขาว เนื่องจากมีอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการผลิตที่ใช้ปริมาณไฟฟ้ามาก เช่น เครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitator: EP) เป็นต้น ทำให้คำนวณค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ที่เป็นค่าบริหารงาน และค่าไฟฟ้าที่ใช้ภายในโรงงานต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว 1 ตัน มีค่าใช้จ่ายสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเตาปูนขาวแบบอื่น

เมื่อทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทยพบว่า สัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวที่มากที่สุดของเตาปูนขาวแต่ละแบบในประเทศไทย (ยกเว้นเตาแบบหมุน) คือ ค่าเชื้อเพลิง

สัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้ง (ดูรูปที่ 4.10 ประกอบ) พบว่า ค่าเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนสูงที่สุดคือ ร้อยละ 58.68 ของต้นทุนการผลิต (825 บาทต่อตันปูนขาว) เนื่องจากประสิทธิภาพในการใช้พลังงานมีค่าต่ำมาก (17.72%) ทำให้สิ้นเปลืองถ่านหินลิกไนต์ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงมาก ส่วนสัดส่วนของต้นทุนการผลิตที่มีค่ารองลงมาจากมากไปน้อยสุดคือ ค่าหินปูน ค่าแรงงาน เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว และค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ตามลำดับ

สัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งแบบ Parallel Flow (ดูรูปที่ 4.11 ประกอบ) พบว่า ค่าเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนสูงที่สุดคือ ร้อยละ 60.67 ของต้นทุนการผลิต (744 บาทต่อตันปูนขาว) เนื่องจากใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงจะเห็นได้ว่า ราคาของน้ำมันเตามีแนวโน้มที่สูงขึ้นตลอด เป็นปัญหาสำคัญของผู้ประกอบการที่ใช้เตาตั้งแบบ Parallel Flow ส่วนสัดส่วนของต้นทุนการผลิตที่มีค่ารองลงมาจากมากไปน้อยสุดคือ ค่าหินปูน เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว และค่าแรงงาน ตามลำดับ

สัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งแบบ Mixed Feed (ดูรูปที่ 4.12 ประกอบ) พบว่า ค่าเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนสูงที่สุดคือ ร้อยละ 38.19 ของต้นทุนการผลิต (432 บาทต่อตันปูนขาว) ส่วนสัดส่วนของต้นทุนการผลิตที่มีค่ารองลงมาจากมากไปน้อยสุดคือ เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว ค่าหินปูน ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว ค่าแรงงาน และค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ตามลำดับ

สัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบหมุน (ดูรูปที่ 4.13 ประกอบ) พบว่า เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาวที่มีสัดส่วนสูงที่สุดคือ ร้อยละ 42.13 ของต้นทุนการผลิต (555.56 บาทต่อตันปูนขาว) เนื่องจากใช้เทคโนโลยีที่ซับซ้อน และติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องที่มีราคาแพง ส่วนสัดส่วนของต้นทุนการผลิตที่มีค่ารองลงมาจากมากไปน้อยสุดคือ ค่าเชื้อเพลิง ค่าหินปูน ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ และค่าแรงงาน ตามลำดับ

**2) การวิเคราะห์กระแสเงิน (Cash Flow Analysis)**

การศึกษาและวิเคราะห์กระแสเงิน (Cash Flow Analysis) ในการผลิตปูนขาวของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย ซึ่งข้อมูลดิบที่ใช้ได้มาจากการสอบถามและรวบรวมข้อมูลจากผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทย ซึ่งการวิเคราะห์กระแสเงิน (Cash Flow Analysis) เป็นการจัดเรียงกระแสเงินเข้า และกระแสเงินที่ใช้จ่ายออกไปในกิจกรรมต่าง ๆ ทุกปี จนสิ้นอายุการใช้งานของเตาปูนขาว

จากนั้นนำผลวิเคราะห์ที่ได้มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์กระแสเงิน (Cash Flow Analysis) โดยมีเกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

**(1) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV)** เป็นการวิเคราะห์ที่นิยมใช้กันมากเพื่อเปรียบเทียบโครงการที่มีระยะเวลาในการดำเนินงานไม่เท่ากัน ทำโดยการเปลี่ยนค่ากระแสเงินสดสุทธิ (Net Cash Flow) ของแต่ละปีไปเป็นมูลค่าเงินปัจจุบัน แล้วรวมผลลัพธ์ทั้งหมดเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ซึ่งอัตราลดค่า (Discount Rate) ที่ใช้ในการศึกษานี้คือ 8 % ถ้าหากมูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นบวก หมายความว่าเป็นโครงการที่มีผลตอบแทนมากกว่าความพอใจขั้นต่ำ โครงการนั้นสมควรลงทุน ส่วนโครงการที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นลบ หมายความว่าโครงการนั้นให้ผลตอบแทนน้อยกว่าผลตอบแทนขั้นต่ำที่กำหนดไว้

**(2) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR)** เป็นการวิเคราะห์หาอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยของโครงการ ซึ่งทำให้ผลรวมมูลค่าปัจจุบันของโครงการมีค่าเท่ากับศูนย์ (ผลรวมของกระแสเงินออกเท่ากับกระแสเงินได้) ถ้าผลวิเคราะห์ว่า อัตราผลตอบแทนภายในมากกว่าผลตอบแทนขั้นต่ำ โครงการนั้นสมควรลงทุน และถ้าอัตราผลตอบแทนภายในมีค่าน้อยกว่าผลตอบแทนขั้นต่ำ ก็จะเป็นโครงการที่ไม่น่าลงทุน

**(3) ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)** เป็นระยะเวลาที่ต้องใช้เพื่อให้มีผลตอบแทนคุ้มกับการลงทุน เป็นวิธีการที่ง่ายโดยไม่ต้องคิดค่าเงินปัจจุบัน ซึ่งในสภาวะที่ไม่แน่นอนการลงทุนที่มีระยะเวลาคุ้มทุนเร็วกว่าย่อมมีความเสี่ยงน้อยกว่าโครงการที่มีระยะเวลาการคืนทุนที่มากกว่า

การวิเคราะห์กระแสเงิน (Cash Flow Analysis) โดยกระแสเงินเข้าและออกของการผลิตปูนขาวที่ของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ถึง 4.7 และแผนภูมิแท่งแสดง Cumulative Net Cash Flow ของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) เตาตั้งแบบ Parallel Flow เตาตั้งแบบ Mixed Feed และเตาแบบหมุน (Rotary Kiln) แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 ถึง 4.17 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.4 กระแสเงินเข้าและออกของการผลิตปูนขาวที่ใช้เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)**

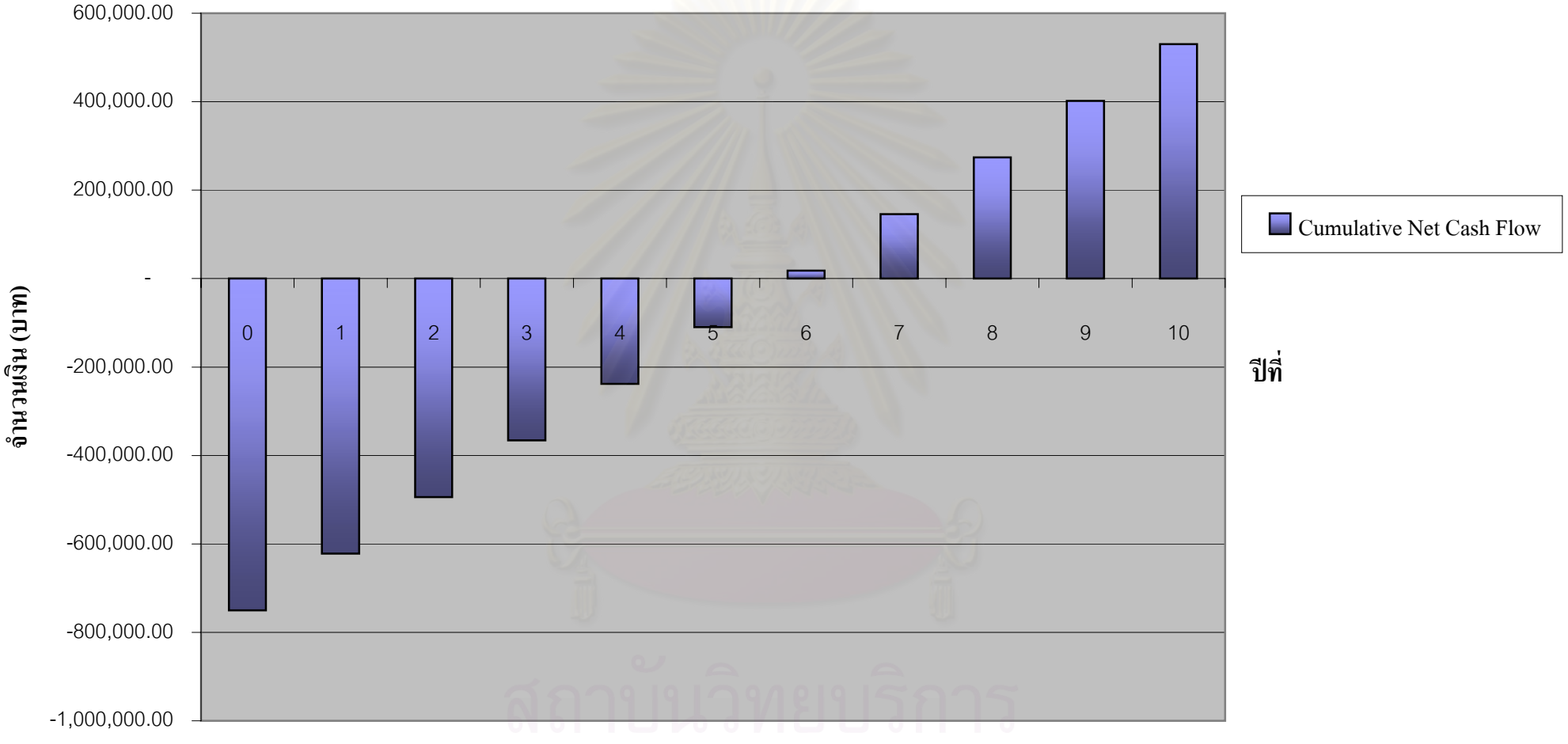
| รายการ | ปีที่ | | | | | | | | | | | รวม |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| **Cash In Flow :-** | | | | | | | | | | | | |
| รายได้จากการขายปูนขาว | | 1,740,000.00 | 1,740,000.00 | 1,740,000.00 | 1,740,000.00 | 1,740,000.00 | 1,740,000.00 | 1,740,000.00 | 1,740,000.00 | 1,740,000.00 | 1,740,000.00 | 17,400,000.00 |
| | | | | | | | | | | | | |
| **Cash Out Flow :-** | | | | | | | | | | | | |
| 1. เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว | - 750,000.00 | | | | | | | | | | | - 750,000.00 |
| 2. ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว | | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 400,000.00 |
| 3. ค่าแรงงาน | | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 2,400,000.00 |
| 4. ค่าหินปูน (รวมค่าขนส่ง) | | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 3,120,000.00 |
| 5. ค่าเชื้อเพลิง (รวมค่าขนส่ง) | | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 9,900,000.00 |
| 6. ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ | | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 300,000.00 |
| **Total Cash Out Flow** | - 750,000.00 | - 1,612,000.00 | - 1,612,000.00 | - 1,612,000.00 | - 1,612,000.00 | - 1,612,000.00 | -1,612,000.00 | -1,612,000.00 | -1,612,000.00 | -1,612,000.00 | -1,612,000.00 | -16,870,000.00 |
| | | | | | | | | | | | | |
| **Net Cash Flow** | - 750,000.00 | 128,000.00 | 128,000.00 | 128,000.00 | 128,000.00 | 128,000.00 | 128,000.00 | 128,000.00 | 128,000.00 | 128,000.00 | 128,000.00 | 530,000.00 |
| **Cumulative Net Cash Flow** | - 750,000.00 | - 622,000.00 | - 494,000.00 | - 366,000.00 | - 238,000.00 | - 110,000.00 | 18,000.00 | 146,000.00 | 274,000.00 | 402,000.00 | 530,000.00 | - 1,210,000.00 |
| **Present Value (@8%)** | - 750,000.00 | 118,515.20 | 109,734.40 | 101,606.40 | 94,080.00 | 87,116.80 | 80,665.60 | 74,688.00 | 69,158.40 | 64,025.60 | 59,289.60 | 108,880.00 |

**หมายเหตุ :** มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV) = 108,880.00 บาท

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return : IRR) = 11.12 %

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) = 5.86 ปี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 4.14 แผนภูมิแท่งแสดง Cumulative Net Cash Flow ของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)**

## ตารางที่ 4.5 กระแสเงินเข้าและออกของการผลิตปูนขาวที่ใช้เตาตั้งแบบ Parallel Flow

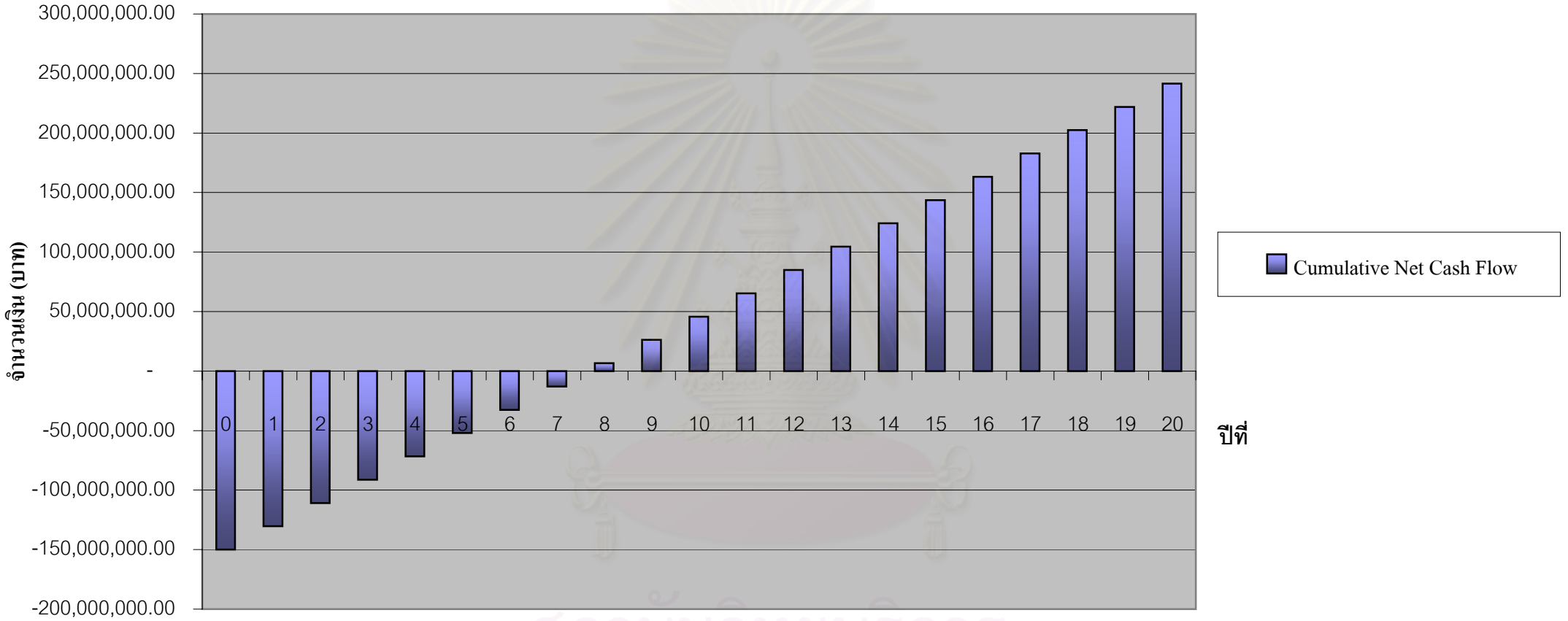
| รายการ | ปีที่ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | รวม |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | |
| **Cash In Flow :-** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| รายได้จากการขายปูนขาว | | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 78,300,000.00 | 1,566,000,000.00 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Cash Out Flow :-** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว | -150,000,000.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - 150,000,000.00 |
| 2. ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว | | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 1,500,000.00 | - 30,000,000.00 |
| 3. ค่าแรงงาน | | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 1,386,000.00 | - 27,720,000.00 |
| 4. ค่าหินปูน (รวมค่าขนส่ง) | | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | -14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 14,040,000.00 | - 280,800,000.00 |
| 5. ค่าเชื้อเพลิง (รวมค่าขนส่ง) | | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | -40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 40,176,000.00 | - 803,520,000.00 |
| 6. ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ | | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 1,620,000.00 | - 32,400,000.00 |
| **Total Cash Out Flow** | -150,000,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | -58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 58,722,000.00 | - 1,324,440,000.00 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Net Cash Flow** | -150,000,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 19,578,000.00 | 241,560,000.00 |
| **Cumulative Net Cash Flow** | -150,000,000.00 | -130,422,000.00 | -110,844,000.00 | - 91,266,000.00 | - 71,688,000.00 | -52,110,000.00 | - 32,532,000.00 | - 12,954,000.00 | 6,624,000.00 | 26,202,000.00 | 45,780,000.00 | 65,358,000.00 | 84,936,000.00 | 104,514,000.00 | 124,092,000.00 | 143,670,000.00 | 163,248,000.00 | 182,826,000.00 | 202,404,000.00 | 221,982,000.00 | 241,560,000.00 | 961,380,000.00 |
| **Present Value (@8%)** | -150,000,000.00 | 18,127,270.20 | 16,784,219.40 | 15,541,016.40 | 14,389,830.00 | 13,324,786.80 | 12,338,055.60 | 11,423,763.00 | 10,577,993.40 | 9,792,915.60 | 9,068,529.60 | 8,397,004.20 | 7,774,423.80 | 7,198,830.60 | 6,666,309.00 | 6,170,985.60 | 5,714,818.20 | 13,763,334.00 | 4,898,415.60 | 4,536,222.60 | 4,199,481.00 | 50,688,204.60 |

**หมายเหตุ :** มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV) = 50,688,204.60 บาท

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return : IRR) = 11.60 %

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) = 7.66 ปี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 4.15 แผนภูมิแท่งแสดง Cumulative Net Cash Flow ของเตาตั้งแบบ Parallel Flow**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ตารางที่ 4.6 กระแสเงินเข้าและออกของการผลิตปูนขาวที่ใช้เตาตั้งแบบ Mixed Feed

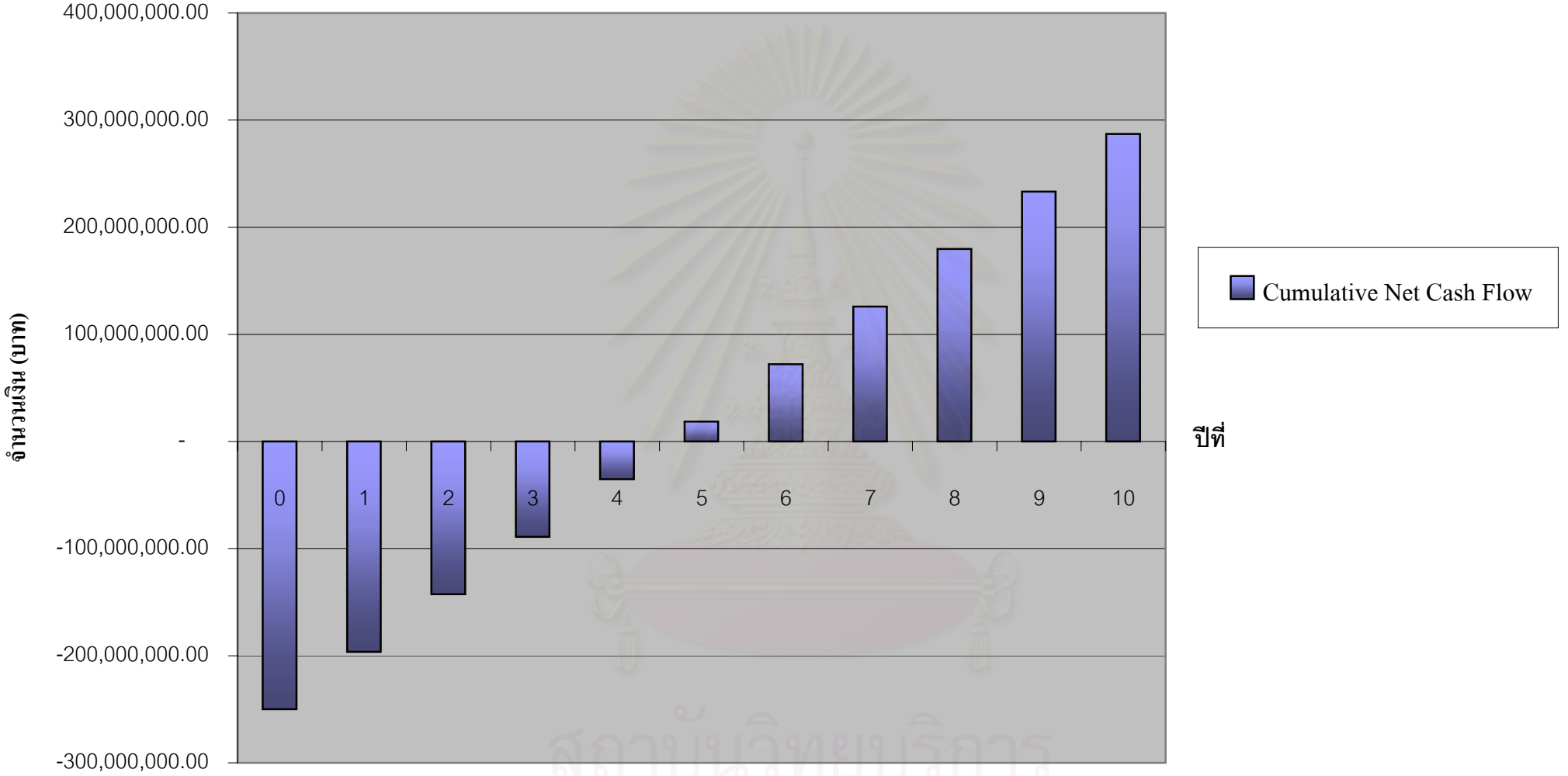
| รายการ | ปีที่ | | | | | | | | | | | รวม |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| **Cash In Flow :-** | | | | | | | | | | | | |
| รายได้จากการขายปูนขาว | | 130,500,000.00 | 130,500,000.00 | 130,500,000.00 | 130,500,000.00 | 130,500,000.00 | 130,500,000.00 | 130,500,000.00 | 130,500,000.00 | 130,500,000.00 | 130,500,000.00 | 1,174,500,000.00 |
| | | | | | | | | | | | | |
| **Cash Out Flow :-** | | | | | | | | | | | | |
| 1. เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว | - 250,000,000.00 | | | | | | | | | | | - 250,000,000.00 |
| 2. ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว | | - 9,000,000.00 | - 9,000,000.00 | - 9,000,000.00 | - 9,000,000.00 | - 9,000,000.00 | - 9,000,000.00 | - 9,000,000.00 | - 9,000,000.00 | - 9,000,000.00 | - 9,000,000.00 | - 90,000,000.00 |
| 3. ค่าแรงงาน | | - 2,817,000.00 | - 2,817,000.00 | - 2,817,000.00 | - 2,817,000.00 | - 2,817,000.00 | - 2,817,000.00 | - 2,817,000.00 | - 2,817,000.00 | - 2,817,000.00 | - 2,817,000.00 | - 28,170,000.00 |
| 4. ค่าหินปูน (รวมค่าขนส่ง) | | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 234,000,000.00 |
| 5. ค่าเชื้อเพลิง (รวมค่าขนส่ง) | | - 38,880,000.00 | - 38,880,000.00 | - 38,880,000.00 | - 38,880,000.00 | - 38,880,000.00 | - 38,880,000.00 | - 38,880,000.00 | - 38,880,000.00 | - 38,880,000.00 | - 38,880,000.00 | - 388,800,000.00 |
| 6. ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ | | - 2,700,000.00 | - 2,700,000.00 | - 2,700,000.00 | - 2,700,000.00 | - 2,700,000.00 | - 2,700,000.00 | - 2,700,000.00 | - 2,700,000.00 | - 2,700,000.00 | - 2,700,000.00 | - 27,000,000.00 |
| **Total Cash Out Flow** | - 250,000,000.00 | - 76,797,000.00 | - 76,797,000.00 | - 76,797,000.00 | - 76,797,000.00 | - 76,797,000.00 | - 76,797,000.00 | - 76,797,000.00 | - 76,797,000.00 | - 76,797,000.00 | - 76,797,000.00 | - 1,017,970,000.00 |
| | | | | | | | | | | | | |
| **Net Cash Flow** | - 250,000,000.00 | 53,703,000.00 | 53,703,000.00 | 53,703,000.00 | 53,703,000.00 | 53,703,000.00 | 53,703,000.00 | 53,703,000.00 | 53,703,000.00 | 53,703,000.00 | 53,703,000.00 | 287,030,000.00 |
| **Cumulative Net Cash Flow** | - 250,000,000.00 | -196,297,000.00 | - 142,594,000.00 | - 88,891,000.00 | - 35,188,000.00 | 18,515,000.00 | 72,218,000.00 | 125,921,000.00 | 179,624,000.00 | 233,327,000.00 | 287,030,000.00 | 203,665,000.00 |
| **Present Value (@8%)** | - 250,000,000.00 | 49,723,607.70 | 46,039,581.90 | 42,629,441.40 | 39,471,705.00 | 36,550,261.80 | 33,843,630.60 | 31,335,700.50 | 29,015,730.90 | 26,862,240.60 | 24,875,229.60 | 110,347,130.00 |

**หมายเหตุ :** มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV) = 110,347,130.00 บาท

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return : IRR) = 17.02 %

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) = 4.66 ปี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 4.16 แผนภูมิแท่งแสดง Cumulative Net Cash Flow ของเตาตั้งแบบ Mixed Feed**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ตารางที่ 4.7 กระแสเงินเข้าและออกของการผลิตปูนขาวที่ใช้เตาแบบหมุน (Rotary Kiln)

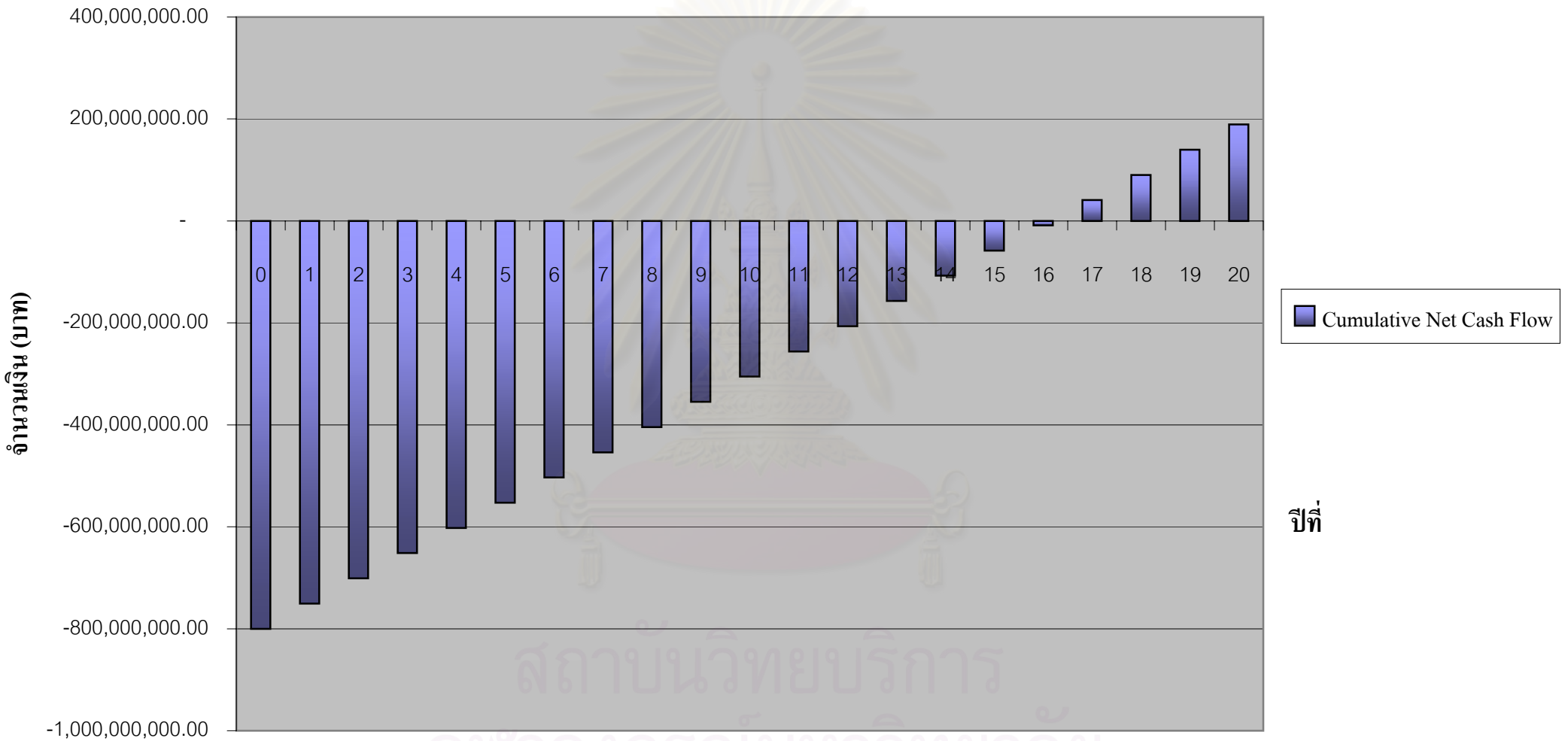
| รายการ | ปีที่ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | รวม |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | |
| **Cash In Flow :-** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| รายได้จากการขายปูนขาว | | ############ | ############ | 104,400,000.00 | ############ | ############ | 104,400,000.00 | 104,400,000.00 | ############ | ############ | 104,400,000.00 | 104,400,000.00 | 104,400,000.00 | 104,400,000.00 | 104,400,000.00 | 104,400,000.00 | 104,400,000.00 | 104,400,000.00 | 104,400,000.00 | 104,400,000.00 | 104,400,000.00 | 2,088,000,000.00 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Cash Out Flow :-** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว | - 800,000,000.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - 800,000,000.00 |
| 2. ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว | | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 5,760,000.00 | - 115,200,000.00 |
| 3. ค่าแรงงาน | | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 3,096,000.00 | - 61,920,000.00 |
| 4. ค่าหินปูน (รวมค่าขนส่ง) | | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 18,720,000.00 | - 374,400,000.00 |
| 5. ค่าเชื้อเพลิง (รวมค่าขนส่ง) | | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 23,400,000.00 | - 468,000,000.00 |
| 6. ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ | | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 3,960,000.00 | - 79,200,000.00 |
| **Total Cash Out Flow** | - 800,000,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 54,936,000.00 | - 1,898,720,000.00 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Net Cash Flow** | - 800,000,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 49,464,000.00 | 189,280,000.00 |
| **Cumulative Net Cash Flow** | - 800,000,000.00 | ############ | ############ | - 651,608,000.00 | ############ | ############ | - 503,216,000.00 | -453,752,000.00 | ############ | ############ | - 305,360,000.00 | - 255,896,000.00 | - 206,432,000.00 | - 156,968,000.00 | - 107,504,000.00 | - 58,040,000.00 | - 8,576,000.00 | 40,888,000.00 | 90,352,000.00 | 139,816,000.00 | 189,280,000.00 | - 6,412,560,000.00 |
| **Present Value (@8%)** | - 800,000,000.00 | 45,798,717.60 | 42,405,487.20 | 39,264,523.20 | 36,356,040.00 | 33,665,198.40 | 31,172,212.80 | 28,862,244.00 | 26,725,399.20 | 24,741,892.80 | 22,911,724.80 | 21,215,109.60 | 19,642,154.40 | 18,187,912.80 | 16,842,492.00 | 15,591,052.80 | 14,438,541.60 | 34,773,192.00 | 12,375,892.80 | 11,460,808.80 | 10,610,028.00 | - 292,959,375.20 |

**หมายเหตุ :** มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV) = - 292,959,375.20 บาท

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return : IRR) = 2.11 %

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) = 16.17 ปี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 4.17 แผนภูมิแท่งแสดง Cumulative Net Cash Flow ของเตาแบบหมุน (Rotary Kiln)**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบเกณฑ์ในการตัดสินใจของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย**

| รายการ | เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) | เตาตั้งแบบ Parallel Flow | เตาตั้งแบบ Mixed Feed | เตาแบบหมุน (Rotary Kiln) |
|---|---|---|---|---|
| 1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) | 108,880.00 บาท | 50,688,204.60 บาท | 110,347,130.00 บาท | -292,959,375.20 บาท |
| 2. อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) | 11.12 % | 11.60 % | 17.02 % | 2.11 % |
| 3. ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) | 5.86 ปี | 7.66 ปี | 4.66 ปี | 16.17 ปี |

หมายเหตุ : ข้อมูลของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) จากบริษัท แอล.เอส. เอ็ม. (1999) จำกัด
ข้อมูลของเตาตั้งแบบ Parallel Flow จากบริษัท ปูนคุณภาพ จำกัด
ข้อมูลของเตาตั้งแบบ Mixed Feed จากบริษัท อโศกเคมีคอล จำกัด
ข้อมูลของเตาแบบหมุน (Rotary Kiln) จากบริษัท อโศกเคมีคอล จำกัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทยพบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) ที่มีค่ามากที่สุดไปหาน้อยที่สุดคือ เตาตั้งแบบ Mixed Feed (110,347,130.00 บาท) เตาตั้งแบบ Parallel Flow (50,688,204.60 บาท) เตาแบบเผาทีละครั้ง (108,880.00 บาท) และเตาแบบหมุน (-292,959,375.20 บาท) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเตาตั้งแบบ Mixed Feed เตาตั้งแบบ Parallel Flow และเตาแบบเผาทีละครั้งมีความเป็นไปได้ในการลงทุน ยกเว้นเตาแบบหมุนที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) เป็นลบ ทำให้ไม่น่าที่จะลงทุน

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) ที่มีค่ามากที่สุดไปหาน้อยที่สุดคือ เตาตั้งแบบ Mixed Feed (17.02 %) เตาตั้งแบบ Parallel Flow (11.60 %) เตาแบบเผาทีละครั้ง (11.12 %) และเตาแบบหมุน (2.11 %) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเตาตั้งแบบ Mixed Feed มีผลตอบแทนในการลงทุนที่สูงสุด ทำให้คุ้มค่าในการลงทุน แต่เตาแบบหมุนมีผลตอบแทนในการลงทุนที่น้อยมาก

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ที่เร็วที่สุดไปหาช้าที่สุดคือ เตาตั้งแบบ Mixed Feed (4.66 ปี) เตาแบบเผาทีละครั้ง (5.86 ปี) เตาตั้งแบบ Parallel Flow (7.66 ปี) และเตาแบบหมุน (16.17 ปี) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเตาตั้งแบบ Mixed Feed มีระยะเวลาคืนทุนที่เร็วที่สุด ทำให้มีความเสี่ยงน้อย แต่เตาแบบหมุนมีระยะเวลาคืนทุนที่ช้ามากเมื่อเทียบกับอายุการใช้งาน 20 ปี จึงทำให้มีความเสี่ยงในการลงทุนมาก

## 4.3 สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นกับอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทย

จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบระหว่างเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้อยู่ในประเทศไทย พบว่าปัญหาของผู้ประกอบการอุตสาหกรรมปูนขาว จะเป็นต้นทุนในการผลิตที่สูง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตอื่น พบว่ามีค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงเป็นต้นทุนหลัก โดยเฉพาะเตาแบบเผาทีละครั้ง หากจะต้องการลดต้นทุนในการผลิตลง จึงควรเน้นไปที่การลดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลง ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาปูนขาวให้ดีขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานลดลง จากการเปรียบเทียบด้านต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้อยู่ในประเทศไทยพบว่า เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) มีค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่มากถึงร้อยละ 58.68 ของต้นทุนในการผลิต (825 บาทต่อตันปูนขาว) ซึ่งมีเป็นค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเตาปูนขาวแบบอื่นที่ใช้อยู่ในประเทศไทย จึงเป็นปัญหาที่สำคัญของผู้ประกอบการที่ใช้เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)

โดยเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) เป็นอุตสาหกรรมปูนขาวขนาดเล็กถึงกลางที่มีกำลังการผลิตไม่สูงนัก (กำลังการผลิตปูนสุกไม่เกิน 10,000 ตันต่อปี) ซึ่งมีข้อได้เปรียบในเรื่องของเงินลงทุนเริ่มแรกในการก่อสร้างเตาปูนขาวที่ไม่สูง (ประมาณ 500,000 ─ 1,000,000 บาท) เป็นเทคโนโลยี

ที่ไม่ซับซ้อน ทำให้ง่ายในการก่อสร้างเตาปูนขาว และการควบคุมเตาปูนขาวไม่จำเป็นต้องใช้คนงานที่มีทักษะสูง แต่พบว่าประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาแบบเผาทีละครั้งมีค่าต่ำมาก (ประมาณ 17.72 %) เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนมากในระหว่างการผลิต ทำให้สิ้นเปลืองการใช้เชื้อเพลิง ทำให้ต้นทุนในการผลิตปูนขาวนั้นสูง ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่สำหรับผู้ประกอบการที่ใช้เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) เนื่องจากไม่สามารถทำให้ราคาขายของปูนขาวสูงกว่าราคาในขณะนี้ได้ ทั้งยังต้องแข่งขันกับผู้ผลิตอื่นที่ใช้เตาแบบเผาต่อเนื่อง (Continuous Kiln) แบบอื่นในการผลิตที่มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานที่สูงกว่า จึงมีต้นทุนในการผลิตโดยเฉพาะค่าเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่ามาก จากปัญหาที่กล่าวมาหากผู้ประกอบการที่ใช้เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) ไม่สามารถที่จะลดต้นทุนในการผลิตได้จะทำให้ไม่สามารถดำเนินกิจการได้ และอาจจะต้องเลิกกิจการ หากจะสามารถอยู่รอดได้จะต้องเปลี่ยนเทคโนโลยีเตาปูนขาวใหม่ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลง ซึ่งเป็นต้นทุนหลักของการผลิตปูนขาว อีกทั้งยังมีปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อมที่ยังไม่มีมาตรการที่จัดการเรื่องนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมากเป็นปัญหามลภาวะฝุ่นและควันดำที่เกิดจากกระบวนการผลิต ซึ่งมีการร้องเรียนจากประชาชนที่อยู่ใกล้เคียงกับโรงงานผลิตปูนขาว จากการสอบถามผู้ประกอบการได้มีการแก้ไขปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อมโดยการชะลอการเผาไหม้ให้อัตราการป้อนถ่านหินทีละน้อย ซึ่งวิธีนี้ยังไม่สามารถแก้ไขปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อมได้ เพียงแต่เป็นการช่วยลดปริมาณควันดำและฝุ่นเท่านั้น

เพื่อแก้ปัญหาที่กล่าวมาจึงน่าจะมีความเป็นไปได้ในการสร้างประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและอัตราการใช้เชื้อเพลิงให้ดีขึ้น โดยทำการเปลี่ยนมาใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Continuous Vertical Shaft Kiln) ทดแทนเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีเตาปูนขาวที่ยังไม่มีผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทยนำมาใช้ เหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่มีกำลังการผลิตที่ไม่สูงนัก โดยลักษณะเป็นเตาแบบเผาต่อเนื่อง (Continuous Kiln) ที่มีการป้อนหินปูนสลับชั้นกันระหว่างถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง (Mixed Feed) เข้าไปในเตาปูนขาว ทำให้ถ่านหินเผาไหม้แล้วให้ความร้อนกับหินปูนในแต่ละชั้นโดยตรงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้ดีขึ้น ทั้งยังจะลดปัญหาเรื่องมลภาวะทางอากาศ เช่น ก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์ ($SO_x$) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงน้อยลงจากเดิม เนื่องจากปริมาณการใช้ถ่านหินที่น้อยลง และลดปัญหาของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion)

# บทที่ 5

# เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง

เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Continuous Vertical Shaft Kiln) เป็นเตาปูนขาวที่ยังไม่มีผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทยนำมาใช้ โดย Kevin Mason (1997) ซึ่งเป็นนักวิจัยของ Intermediate Technology (IT) ได้ทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการผลิตปูนขาวในประเทศซิมบับเว โดยศึกษาและวิจัยถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) ที่ใช้อยู่เดิม พบว่ามีประสิทธิภาพที่ต่ำมาก จึงได้ทำการออกแบบเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องต้นแบบที่มีกำลังการผลิตปูนสุก 1.50 ตันต่อวัน (ดูรูปที่ 5.1 ประกอบ) ซึ่งมีการลงทุนในก่อสร้างที่ไม่สูงนัก และประสิทธิภาพในการใช้พลังงานที่ดีขึ้น เพื่อมาทดแทนเตาปูนขาวแบบเดิม

ลักษณะเทคโนโลยีเป็นเตาปูนขาวแบบต่อเนื่อง (Continuous Kiln) ที่มีการป้อนหินปูนสลับชั้นกันระหว่างถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง (Mixed Feed) เข้าไปในเตาปูนขาว ทำให้ถ่านหินเผาไหม้แล้วให้ความร้อนกับหินปูนในแต่ละชั้นโดยตรง ยังส่งผลให้ประสิทธิภาพในการใช้เผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ดีทั้งยังทำให้ลดปัญหา เรื่องสิ่งแวดล้อมในด้านของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) ของถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง

ที่มา : Kevin Mason, 1997

**รูปที่ 5.1 เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Continuous Vertical Shaft Kiln) ที่ประเทศซิมบับเว**

## 5.1 การออกแบบเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง

### 5.1.1 กำลังการผลิตที่ต้องการ

สิ่งแรกที่จะต้องนำมาพิจารณาคือ ปริมาณของปูนสุกที่ผลิตได้ ซึ่งปริมาณของปูนสุกที่ผลิตได้จะเป็นสัดส่วนกับพื้นที่หน้าตัดของเตาตั้ง (Vertical Shaft Kiln) ที่ใช้ โดยมีอัตราส่วนประมาณในการคำนวณคือ ในพื้นที่หน้าตัดของเตาตั้ง 1 ตารางเมตร จะมีปริมาณของปูนสุกที่ผลิตได้ประมาณ 2.50 ตันต่อวัน (Michael Wingate, 1985) ซึ่งอัตราส่วนนี้จะช่วยประมาณการคร่าว ๆ เท่านั้น เนื่องจากปริมาณของปูนสุกที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยในการออกกแบบอื่น ๆ และปัจจัยในการผลิตด้วย

ปัจจัยในการออกแบบเตาปูนขาวเพื่อให้มีขนาดเล็กที่สุดที่สามารถทำการผลิตปูนสุก ซึ่งการที่จะได้ขนาดของเตาปูนขาวที่เหมาะสมในการผลิต จะต้องทำการทดลองสร้างและทดสอบเตาปูนขาวในขนาดต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับกำลังการผลิตที่ต้องการ โดยจะต้องทำให้มีขั้นตอนไม่ซับซ้อนที่จะทำให้เตาตั้ง (Vertical Shaft Kiln) เนื่องจากส่งผลให้เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาวที่สูงตามไปด้วย ซึ่งปริมาณของปูนสุกที่ผลิตได้จะเป็นสัดส่วนกับพื้นที่หน้าตัดของเตาตั้งที่ใช้ แต่เป็นไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของเตาตั้งที่ใช้ ดังนั้นจะพบว่า ความสูงของเตาตั้งจะไม่ส่งผลต่อปริมาณของปูนสุกที่ผลิตได้

Kevin Mason (1997) ได้ทำการออกแบบเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องต้นแบบที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.60 เมตร ดังนั้นจะมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.28 ตารางเมตร ซึ่งจากการประมาณการปริมาณของปูนสุกที่ผลิตได้คือ 0.75 ตันต่อวัน แต่ความเป็นจริงแล้ว เมื่อเตาปูนขาวที่ประสิทธิภาพที่เหมาะสม จะสามารถผลิตปูนสุกได้มากกว่าที่ประมาณการไว้ 2 เท่า โดยจะพบว่าเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องต้นแบบที่ประเทศซิมบับเว สามารถผลิตปูนสุกได้ประมาณ 1.50 ตันต่อวัน

### 5.1.2 ความสูงของเตาตั้ง

ในทางทฤษฎีจะพบว่า เตาตั้งจะต้องมีความสูงพอที่จะทำให้เกิดโซนการทำงานตลอดเวลาที่ทำการเผาหินปูน (Calcination) แต่อาจจะไม่เป็นไปตามนี้ เมื่อเกิดเปลวไฟลุกขึ้นสูงมากจะส่งผลให้ไม่มีช่วงของการอุ่นวัตถุดิบ (Preheating Zone) และเกิดช่วงในการปล่อยปูนสุกออกมานานเกินไป เป็นเพราะคนงานที่ไม่มีทักษะพอในการควบคุมเตาปูนขาว และในทางตรงกันข้ามถ้าคนงานเพิ่มกำลังการผลิตโดยการปล่อยปูนสุกออกจากเตาปูนขาวถี่เกินไปจะส่งผลทำให้ไม่มีช่วงที่ปูนสุกเย็นตัวลง (Cooling Zone) และความร้อนสูญเสียไปมากจากการที่ปูนสุกถูกปล่อยออกจากเตาปูนขาวบ่อยครั้ง ทั้งยังส่งผลให้ปูนสุกที่ได้เป็นแบบยังไม่สุก (Underburnt) อีกด้วย ดังนั้นการออกแบบเตาปูนขาวให้มีความสูงพอที่จะทำให้เกิดโซนการทำงานตามการปฏิบัติงานที่ตั้งไว้

A. B. Searle (1935) ได้เสนอแนะว่า เตาตั้ง (Vertical Shaft Kiln) ควรจะมีความสูงในช่วงของการอุ่นวัตถุดิบ (Preheating Zone) ยาวพอ จะทำให้ไม่ต้องดูแลเป็นพิเศษว่ามีการกระจาย

ความร้อนในช่วงนี้หรือไม่ ถ้าความสูงของเตาตั้ง (Vertical Shaft Kiln) สูงมากพอ จะส่งผลทำให้ความร้อนส่วนใหญ่จะถูกกลับนำมาใช้ในช่วงของการอุ่นวัตถุดิบ (Preheating Zone) และในช่วงที่ปูนสุกเย็นตัวลง (Cooling Zone) ควรมีความสูงพอ เพื่อที่จะทำให้ปูนสุกเย็นตัวลงในอุณหภูมิที่สามารถลำเลียงออกจากเตาปูนขาวได้ (ประมาณ 80°C)

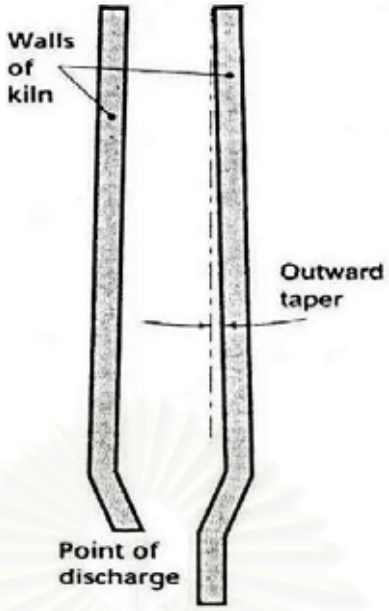
การพิจารณาถึงความสูงของเตาปูนขาวที่ใช้ โดยจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาตั้งที่ใช้ ซึ่งจะมีอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Height to Diameter Ratio) โดยมีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้มากมาย เช่น John Spiropoulos (1958) ได้เสนอว่า วัตถุดิบที่ใช้เป็นหินปูนที่มีความพรุนสูงควรใช้เตาปูนขาวที่มีอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4 : 1 ส่วนหินปูนที่มีเนื้อแน่นควรใช้ที่อัตราส่วนเท่ากับ 4.5 : 1 และ J. E. White (1981) ได้เสนอว่า อัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 : 1 เหมาะกับเตาตั้ง (Vertical Shaft Kiln) ขนาดเล็กที่มีการป้อนหินปูนสลับชั้นกันกับเชื้อเพลิงที่ใช้ (Mixed Feed) เป็นต้น ซึ่งอัตราส่วนมี่กล่าวมานี้มีค่าแตกต่างกันไป เนื่องจากเป็นค่าที่ได้มาจากประสบการณ์ที่ได้จากการผลิตมาหลายปีของผู้ที่ทำการศึกษานั้น ๆ

Kevin Mason (1997) ได้ทำการออกแบบเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องต้นแบบ จะใช้อัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 7.5 : 1 ดังนั้นจะมีความสูงเท่ากับ 4.50 เมตร (เมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคือ 0.60 เมตร) โดยขนาดของความสูงเป็นปัจจัยหนึ่งที่บ่งบอกถึงการเลือกชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการก่อสร้าง เตาปูนขาว ซึ่งจะต้องทำการออกแบบให้ง่ายในการก่อสร้าง

### 5.1.3 รูปร่างของเตาตั้ง

รูปร่างของเตาตั้ง จะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ รูปร่างภายในเตาตั้ง และรูปร่างภายนอกเตาตั้ง โดยส่วนใหญ่รูปร่างภายในของเตาตั้งจะเป็นทรงกระบอก ซึ่งพื้นที่หน้าตัดที่เป็นวงกลมนี้จะช่วยในการไหลของวัตถุดิบ และมีการกระจายความร้อนได้ดีในเตาปูนขาว เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม จะพบว่าการก่อสร้างเตาปูนขาวทำได้ง่าย แต่วัตถุดิบที่ไหลลงมาจะติดตามมุมได้ง่าย และจะเกิดจุดที่ความร้อนเข้าไปไม่ทั่วถึง ดังนั้นการออกแบบรูปร่างของเตาตั้ง จะทำการออกแบบให้มีลักษณะกางออกมาตรงด้านล่างของเตาตั้ง (ดูรูปที่ 5.2 ประกอบ) เพื่อลำเลียงปูนสุกออกมาจากเตาตั้งได้ง่าย

รูปร่างภายนอกของเตาตั้งจะทำการก่อสร้างเป็นทรงสี่เหลี่ยม เพื่อช่วยให้ง่ายในการก่อสร้าง โดยช่วงในการติดตั้งฉนวนกันความร้อนให้ประสิทธิภาพ จะติดตั้งตรงส่วนแคบที่สุดระหว่างผนังด้านในที่เป็นทรงกระบอกและผนังด้านนอกที่เป็นทรงสี่เหลี่ยม ซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบน้อยมากในเรื่องของการสูญเสียความร้อนที่ออกไป




ที่มา : Kevin Mason, 1997

**รูปที่ 5.2 ผนังภายนอกของเตาตั้งที่มีลักษณะกางออกมาตรงด้านล่าง**

วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างเตาปูนขาวที่สำคัญคือ อิฐทนไฟ (Refractory Brick) เพื่อป้องกันความร้อน และการสึกกร่อน โดยทำการบุไว้โดยรอบเตาปูนขาว แต่เนื่องจากเป็นวัสดุที่ค่อนข้างแพง จึงทำให้เงินลงทุนในการก่อสร้างที่สูงตามไปด้วย ดังนั้นควรที่จะจะใช้อิฐทนไฟในช่วงของเตาปูนขาวที่มีอุณหภูมิที่สูง (ในช่วงระหว่างการเกิด Calcination) ส่วนวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างผนังภายนอกเตาปูนขาวอาจจะเป็นอิฐดินเผา

การเลือกชนิดของฉนวนกันความร้อน เป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยไม่ให้ความร้อนออกสู่ภายนอกเตาปูนขาว โดยมากวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน จะมีปริมาณของอากาศอยู่ภายในค่อนข้างสูง ซึ่งช่องว่างของอากาศที่อยู่ระหว่างผนังภายในและนอกของเตาปูนขาว จะช่วยลดการสูญเสียความร้อนที่ออกจากเตาปูนขาวได้ในระดับหนึ่ง และจะลดการสูญเสียความร้อนได้อีก เมื่อใช้วัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อนที่มีอากาศอยู่ในเนื้อของวัสดุมาบุที่ผนังภายนอกของเตาปูนขาว โดยวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนนี้ จะต้องทนได้ที่อุณหภูมิประมาณ 1,000°C ขึ้นไป เช่น ใยหิน (Rockwool) เป็นวัสดุที่กันความร้อนได้ดีมาก และง่ายในการติดตั้ง แต่จะพบว่าเป็นวัสดุที่มีราคาแพงมาก ดังนั้นอาจจะใช้แกลบ หรือขี้เถ้าแทนซึ่งมีราคาที่ถูกกว่า และในเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องต้นแบบที่ Kevin Mason (1997) ได้ทำการออกแบบจะใช้คอนกรีตผสมแร่เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) เป็นฉนวนกันความร้อน ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้กันความร้อนได้ดีพอ และมีราคาไม่แพงมาก

**5.1.4 การไหลของอากาศ**

การไหลของอากาศเข้าสู่เตาปูนขาว เป็นปัจจัยหนึ่งในการออกแบบ และการก่อสร้างเตาปูนขาว โดยอากาศที่ไหลเข้าเตาปูนขาว จะต้องมีปริมาณเพียงพอในการทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (Complete Combustion) ซึ่งปริมาณของอากาศจะต้องไหลเข้าสู่เตาปูนขาวเร็วพอที่ทำให้เกิดกระบวนการเผาไหม้ได้ โดย R. S. Boynton (1980) เสนอว่า ปริมาณของอากาศที่ใช้ประมาณ 10 ส่วน ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Solid Fuel) 1 ส่วน และจะสามารถผลิตปูนสุกได้ประมาณ 5 ส่วน ในทางปฏิบัติอาจจะต้องเพิ่มปริมาณของอากาศอีกประมาณ 3 เท่า เพื่อทำให้เกิดการกระจายตัวของความร้อน

การออกแบบการไหลของอากาศเข้าสู่เตาปูนขาวทำได้ยาก เนื่องจากความแตกต่างในเรื่องของขนาดและรูปร่างของหินปูน และถ่านหินที่ไม่เท่ากันตลอดในเวลาทำการผลิตจริง ซึ่งจะพบว่า อากาศจะไหลผ่านช่องว่างที่มีขนาดเล็กได้ยาก ทำให้ต้องเป่าอากาศเข้าไปเตาปูนขาวโดยใช้พัดลม (Blower) ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถที่จะคำนวณหาความดันที่ตกไป (Pressure Drop) ในช่วงที่อากาศไหลผ่านเตาปูนขาว เพื่อทราบว่ามีความต้านทานการไหลของอากาศมากน้อยเพียงใด จากสมการของ Fanning เพื่อใช้ในการประมาณความดันที่ตกไป (Pressure Drop) ดังนี้คือ

$$\Delta p = \frac{4fLV^2}{2gd}$$

โดยที่ $\Delta p$ = ความดันที่ตกไป (Pressure Drop)
$f$ = สัมประสิทธิ์ของการเสียดทาน (Friction Factor)
$L$ = ความสูงของเตาปูนขาว
$V$ = ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน
$g$ = ค่าคงที่ของแรงโน้มถ่วง
$d$ = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาปูนขาว

ในทางปฏิบัติ จะทำการออกแบบเตาปูนขาวให้สามารถปรับปริมาณของอากาศที่ไหลผ่านได้ โดยปริมาณของอากาศที่เหมาะสมที่สุดจะต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ควบคุมเตาปูนขาวในการปรับค่า เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (Complete Combustion) และเกิด Calcination เปลี่ยนหินปูนเป็นปูนสุก โดยจะต้องปรับการไหลของอากาศตามไปด้วย ซึ่งสังเกตจากอากาศเสียที่ออกจากเตาปูนขาวเป็นควันดำ หรืออาจจะพบเชื้อเพลิงที่ยังเผาไม่หมดติดมากับปูนสุกที่ได้ แสดงว่ามีปริมาณของอากาศที่ไม่เพียงพอ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราการไหลของอากาศจะขึ้นอยู่กับปริมาณของอากาศที่ผ่านเข้าไปในเตาปูนขาว และความแตกต่างของความดันตรงบริเวณอากาศไหลผ่านเข้าเตาปูนขาว ซึ่งการไหลของอากาศที่ผ่านเข้าไปในเตาปูนขาว จะขึ้นอยู่กับ ความสูงของเตาปูนขาว รวมความสูงของปล่องอากาศเสีย (Stack) ด้วย และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านเข้าไปกับอากาศที่อยู่ภายในเตาปูนขาว ซึ่งการทำงานที่อาศัยการไหลของอากาศโดยธรรมชาติ (Natural Draught) จะต้องการความร้อนไหลผ่านเพื่อให้เกิดการไหลของอากาศ โดยอากาศเสียที่ปล่อยออกมา (Exhaust Gas) จะต้องมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศที่ไหลเข้ามา ซึ่งสามารถที่จะคำนวณหาปริมาณการไหลของอากาศเข้าสู่เตาปูนขาวได้จากสูตรดังต่อไปนี้คือ

$$D = 1.1215 \quad H\left(1 - \frac{T_a + 273}{T_g + 273}\right)$$

โดยที่ D = ปริมาณการไหลของอากาศเข้าสู่เตาปูนขาว (Draught)

H = ความสูงของเตาปูนขาว

$T_a$ = อุณหภูมิของอากาศในบริเวณโดยรอบเตาปูนขาว

$T_g$ = อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศในเตาปูนขาว

โดยเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องต้นแบบที่ Kevin Mason (1997) ได้ทำการออกแบบปล่องอากาศเสีย (Stack) ให้มีความสูงประมาณ 2.40 เมตร เพื่อช่วยให้เกิดการไหลของอากาศผ่านเตาปูนขาวได้ง่าย

## 5.2 การก่อสร้างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง

### 5.2.1 วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง

ในการก่อสร้างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง จะใช้วัสดุที่มีราคาไม่แพงมากนัก เพื่อให้ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมปูนขาวที่มีขนาดเล็กถึงกลาง (ผลิตปูนสุกไม่เกิน 10,000 ตันต่อปี) สามารถลงทุนก่อสร้างได้ โดยมีรายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างคือ

1) ผนังภายนอกของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง จะใช้อิฐบล็อค โดยก่ออิฐทับด้วยปูนซีเมนต์ ในช่วงของอิฐบล็อคทุก ๆ 4 ชั้นจะคั่นด้วยเหล็กยึดรับแรง และใช้ปูนซีเมนต์โปกทับอิฐที่ก่อไว้อีกทีหนึ่ง

2) ผนังภายในของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง จะก่ออิฐทนไฟ (Refractory Brick) โดยก่อให้เป็นรูปร่างทรงกระบอก

3) พื้นและฐานรากของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง โดยจะวางโครงสร้างฐานราก เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งผูกเหล็กเส้นเพื่อใช้ในการรับแรง

4) ฉนวนกันความร้อนระหว่างผนังภายนอกและใน จะผสมระหว่างแร่เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) ประมาณ 2 ส่วนกับอิฐที่บดละเอียดประมาณ 1 ส่วน และนำส่วนผสมนี้ 4 ส่วนมาผสมกับปูนขาว (Hydrated Lime) 1 ส่วน จะได้คอนกรีตที่มีแร่เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite Concrete) เพื่อเป็นฉนวนกันความร้อน ซึ่งอาจจะใช้อิฐที่เป็นฉนวน (Insulation Brick) แทนในชั้นนี้ก็ได้

5) เหล็กยึดรับแรง โดยใช้แผ่นเหล็กบางขนาดกว้าง 0.5 เซนติเมตร และยาว 5 เซนติเมตร ซึ่งยึดไว้ด้วยท่อนเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร

6) ช่องสำหรับตรวจสอบภายในเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง โดยจะใช้ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร อยู่ตรงกลางช่องสำหรับตรวจสอบ

7) ประตูสำหรับปล่อยปูนสุกออกจากเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง โดยจะใช้แผ่นเหล็กหนาประมาณ 6 มิลลิเมตร

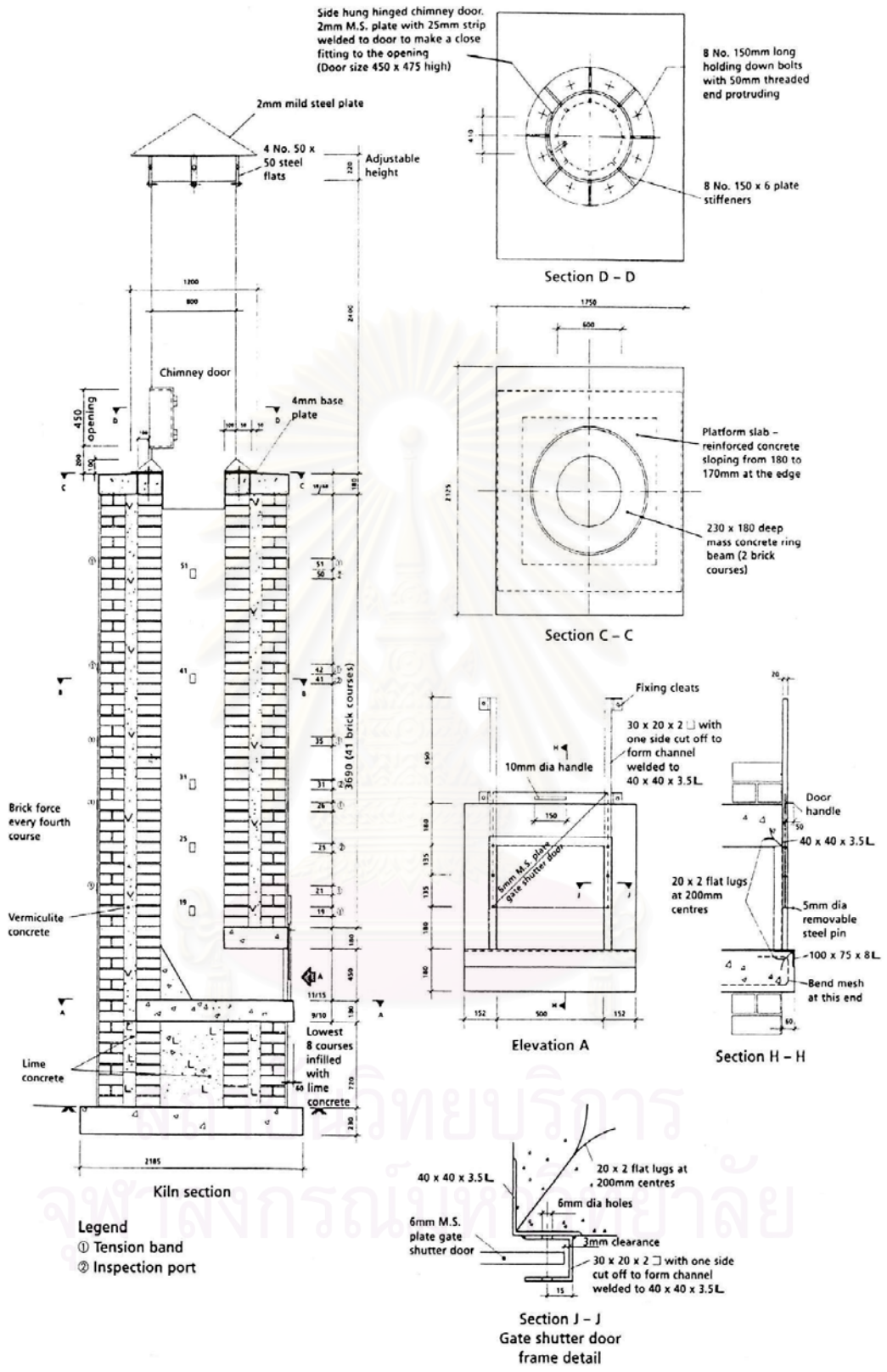
8) ปล่องอากาศเสีย (Stack) โดยจะใช้แผ่นเหล็กหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร และใช้หมุดยึดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

**5.2.2 รายละเอียดของการก่อสร้าง**

รายละเอียดของการก่อสร้างจะแสดงไว้ในรูปที่ 5.3 โดยจะมีขั้นตอนในการก่อสร้างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง และระยะเวลาในการก่อสร้าง (แสดงไว้ในตารางที่ 5.1)

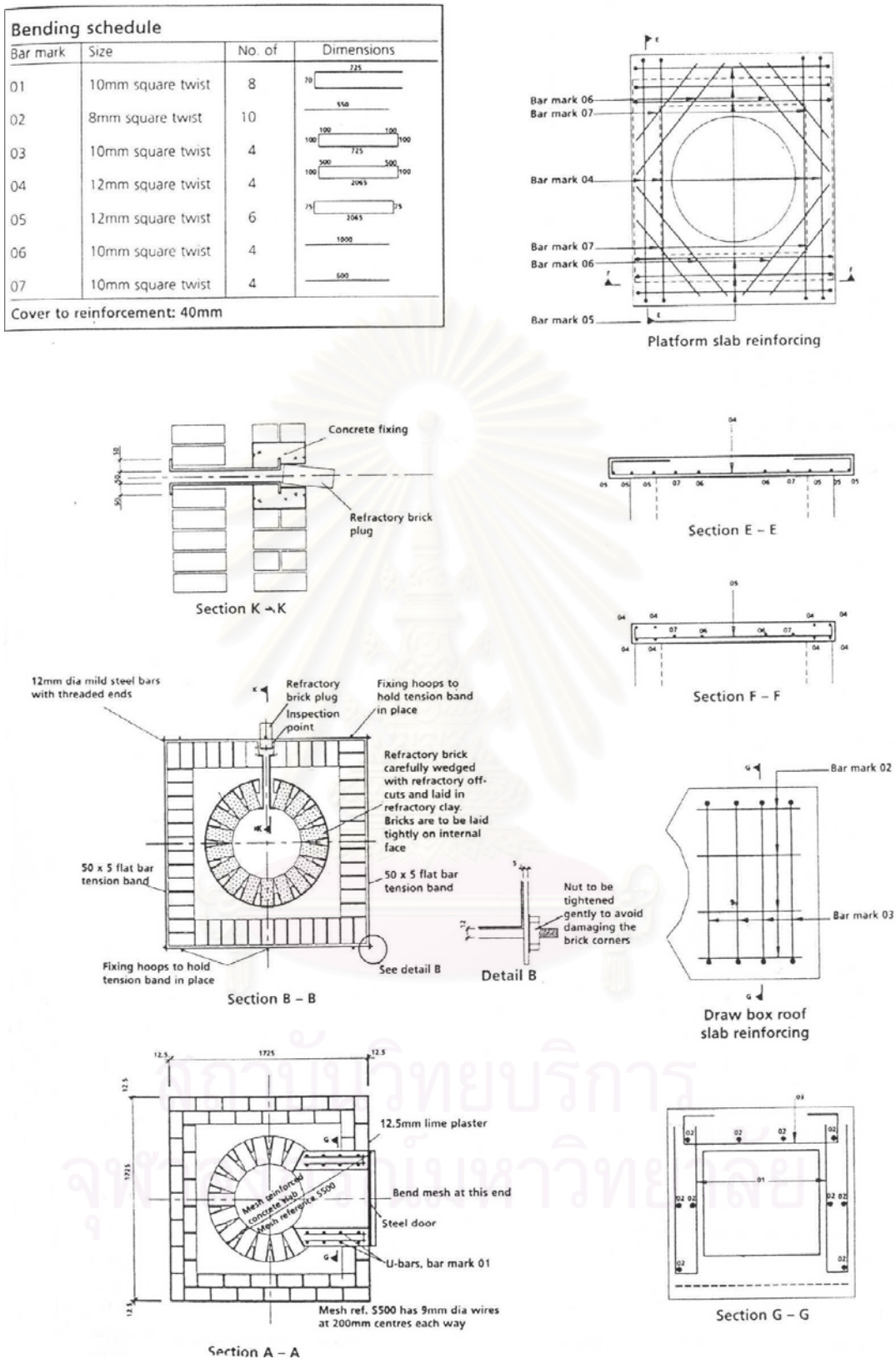
การก่อสร้างจะเริ่มด้วยพื้นและฐานรากของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องโดยจะวางโครงสร้างฐานรากเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งผูกเหล็กเส้นเพื่อใช้ในการรับแรง จากนั้นก่อผนังภายในของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง จะก่ออิฐทนไฟ (Refractory Brick) โดยก่อให้เป็นรูปร่างทรงกระบอก จากนั้นก่ออิฐเป็นผนังด้านนอก ในช่วงของอิฐบล็อคทุก ๆ 4 ชั้นจะคั่นด้วยเหล็กยึดรับแรง และใช้ปูนซีเมนต์โปกทับอิฐที่ก่อไว้อีกทีหนึ่ง โดยให้มีช่องว่างระหว่างผนังด้านในและด้านนอก และเติมคอนกรีตที่มีแร่เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite Concrete) ที่ผสมแล้วลงในช่องว่างดังกล่าว เพื่อเป็นฉนวนกันความร้อน แล้วทำการติดตั้งประตูสำหรับปล่อยปูนสุกออกที่ด้านล่างของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง โดยจะใช้แผ่นเหล็กหนาประมาณ 6 มิลลิเมตร

จากนั้นทำการก่อนั่งร้านที่ด้านบนของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง จะติดเหล็กยึดรับแรง โดยใช้แผ่นเหล็กบางขนาดกว้าง 0.5 เซนติเมตร และยาว 5 เซนติเมตร ซึ่งยึดไว้ด้วยท่อนเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตรให้ยึดติดที่ผนังด้านนอกของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องเท่านั้น ซึ่งไม่สัมผัสกับผนังภายใน แล้วทำการติดตั้งปล่องอากาศเสีย (Stack) โดยจะใช้แผ่นเหล็กหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร และใช้หมุดยึดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ให้ยึดติดที่ผนังด้านนอกของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง เพื่อป้องกันน้ำที่จะซึมลงไปในช่องว่างระหว่างผนังด้านในและด้านนอกของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง




ที่มา : Kevin Mason, 1997

**รูปที่ 5.3 รายละเอียดโครงสร้างของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง**




ที่มา : Kevin Mason, 1997

**รูปที่ 5.3 รายละเอียดโครงสร้างของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (ต่อ)**

**ตารางที่ 5.1 ระยะเวลาในการก่อสร้างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง**

| รายการ | ระยะเวลาในการก่อสร้าง | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| 1) การหล่อพื้นฐานราก | ◄ | — | — | — | — | ► | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2) การก่ออิฐที่พื้นของฐานราก และเก็บรายละเอียด | | | | | | | ◄ | — | ► | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3) การติดตั้งเหล็กเส้นเสริมแรงที่พื้นกับส่วนล่างของเตาตั้งที่ใช้เป็นช่องปล่อยปูนสุก | | | | | | | | | | ◄ | — | ► | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4) การก่ออิฐบล็อคสร้างผนังภายในของเตาตั้ง | | | | | | | | | | | | | ◄ | — | — | — | ► | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5) การก่ออิฐทนไฟสร้างผนังภายนอกของเตาตั้ง และเติม Vermiculite Concrete ในช่องว่างระหว่างผนัง | | | | | | | | | | | | | | | | | | ◄ | — | — | — | ► | | | | | | | | | | |
| 6) การติดตั้งเหล็กรับแรงโดยรอบเตาตั้ง และทำการสร้างนั่งร้านที่ด้านบนของเตาตั้ง | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ◄ | — | ► | | | | | | | |
| 7) การติดตั้งปล่องอากาศเสีย (Stack) ที่ด้านบนของเตาตั้ง และทำการฉาบปูนที่ผนังด้านนอกของเตาตั้ง | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ◄ | — | — | — | ► | | |
| 8) การติดตั้ง และเก็บรายละเอียดในขั้นตอนสุดท้าย | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ◄ | ► |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.2.3 จำนวนและราคาของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง

เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องต้นแบบที่ Kevin Mason (1997) ได้ทำการออกแบบมีรายละเอียดของจำนวนวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง (แสดงไว้ในตารางที่ 5.2) โดยราคาของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างจะได้จากราคาต่อหน่วยของวัสดุที่จำหน่ายในประเทศไทยเป็นเกณฑ์ ซึ่งจะมีราคาของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องรวมเป็นเงินทั้งสิ้น 526,890 บาท

**ตารางที่ 5.2 รายละเอียดของจำนวนและราคาของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง**

| รายการ | จำนวน |
|---|---|
| 1) อิฐบล็อค | 4,000 ก้อน |
| 2) อิฐทนไฟ (Refractory Brick) | 1,000 ก้อน |
| 3) แร่เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) | 625 กก. |
| 4) ปูนซีเมนต์ | 1,250 กก. |
| 5) เหล็กยึดรับแรง | 120 กก. |
| 6) แผ่นเหล็กสำหรับทำปล่องอากาศเสีย (Stack) | 250 กก. |
| 7) แผ่นเหล็กทำประตูสำหรับปล่อยปูนสุก | 85 กก. |
| 8) เหล็กเส้น | 140 กก. |
| 9) ท่อเหล็ก | 100 กก. |
| 10) ทราย | 6 ลบ.ม. |
| 11) ปูนขาว | 750 กก. |
| 12) หินก่อสร้าง | 3 ลบ.ม. |

ที่มา : Kevin Mason, 1997

นอกจากนี้ยังต้องคิดค่าแรงงานในการก่อสร้าง โดยใช้คนงาน 6 คน และมีระยะเวลาในการก่อสร้างประมาณ 32 วัน (ดูตารางที่ 5.1 ประกอบ) ซึ่งจะเป็นค่าแรงงานในการก่อสร้างทั้งสิ้น 45,500 บาท จากนั้นจึงนำมารวมกับราคาของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง จะได้เป็นเงินลงทุนในการก่อสร้างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องทั้งสิ้น 572,390 บาท

## 5.3 การผลิตปูนขาวโดยใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง

### 5.3.1 การตรวจสอบการทำงาน

การทำงานของเตาปูนขาว จะต้องทำการตรวจสอบ เช่น การตรวจสอบอุณหภูมิในเตาปูนขาว ผนังด้านนอก และอากาศที่ปล่อยออกจากเตาปูนขาว (Exhaust Gas) โดยใช้แท่งวัดอุณหภูมิ (Thermocouples) การวัดความดันของอากาศโดยใช้บารอมิเตอร์ (Barometer) และการวัดความเร็วของลมในบริเวณรอบเตาปูนขาวโดยใช้เครื่องวัดความเร็วของลม (Anemometer) เป็นต้น แต่ปัจจัยเหล่านี้ไม่สามารถที่จะควบคุมได้

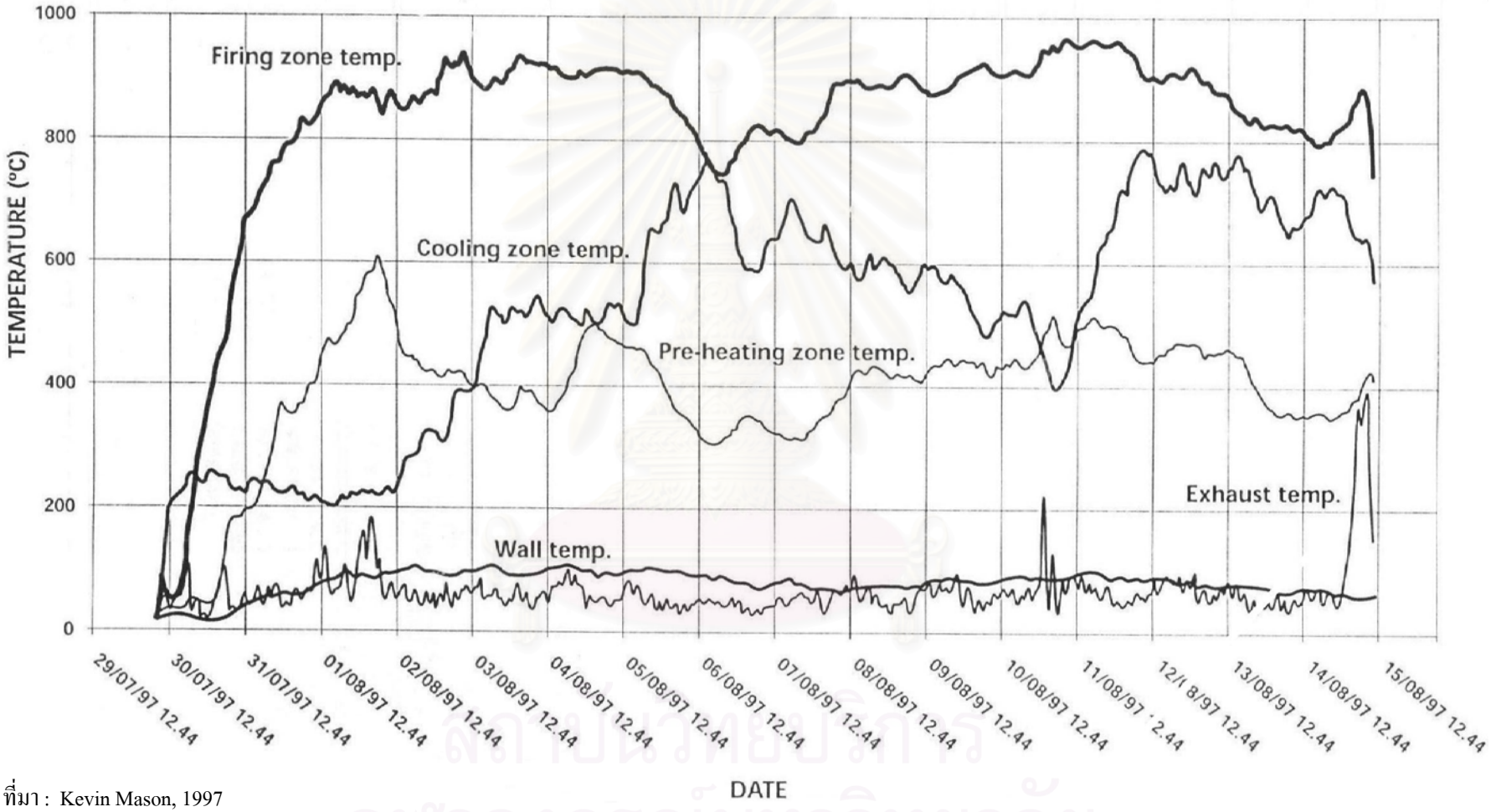
ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตปูนขาว จะนำมาพิจารณาและควบคุมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของเตาปูนขาวเหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิต

- ชนิดและขนาดของหินปูนที่ใช้
- ประเภทและขนาดของ เชื้อเพลิงที่ใช้
- อัตราส่วนระหว่างหินปูนกับเชื้อเพลิง
- ความถี่ในการป้อนหินปูน และปล่อยปูนสุกออกมา
- อัตราการไหลของอากาศ

โดยปัจจัยบางตัวสามารถที่จะกำหนดให้มีค่าคงที่ได้ในการผลิต เช่น ขนาดของหินปูนและเชื้อเพลิงที่ใช้ สามารถกำหนดให้มีขนาดที่เหมาะสมกับการผลิต ทำได้โดยการบดย่อยหินปูนและเชื้อเพลิงให้มีขนาดเหมาะสมก่อนนำมาใช้งาน ส่วนชนิดของหินปูน และประเภทของเชื้อเพลิงที่ใช้ สามารถที่จะเลือกจากแหล่งที่เหมาะสมกับการผลิต เช่น ส่วนประกอบทางเคมีของหินปูนที่ใช้ ค่าความร้อน (Heating Value) และปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงที่ใช้ เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างหินปูนกับเชื้อเพลิงมีค่าคงที่ด้วย

การตรวจสอบการทำงานของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง จะทำการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับการผลิต ได้แก่ อัตราในการเกิด Calcination ปริมาณปูนขาวที่ทำปฏิกิริยาได้ (Available Lime) ความสามารถในการทำปฏิกิริยาของปูนขาว ซึ่งได้จากการทดสอบคุณภาพของปูนขาว (รายละเอียดของวิธีการทดสอบแสดงในภาคผนวก จ) อัตราการไหลของอากาศในปล่องอากาศเสีย (Stack) และอุณหภูมิภายในเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (ดูรูปที่ 5.4 ประกอบ)

การผลิตปูนขาวมีสิ่งที่จะต้องทำการจัดการ และตรวจสอบที่สำคัญมีดังนี้คือ การตรวจสอบปริมาณของหินปูนและเชื้อเพลิงที่ใช้ให้เพียงพอกับการผลิต การบันทึกและตรวจสอบข้อมูลการผลิต การตรวจสอบการทำงานของเตาปูนขาว โดยเฉพาะผนังบุ (Lining) ของเตาปูนขาว การตรวจสอบและบำรุงรักษาเครื่องจักรอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต การจัดการและตรวจสอบการกองเก็บปูนขาวที่ได้




ที่มา : Kevin Mason, 1997

**รูปที่ 5.4 ตัวอย่างข้อมูลของอุณหภูมิภายในเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องที่ประเทศซิมบับเว**

**5.3.2 ขั้นตอนในการผลิต**

**1) การเตรียมวัตถุดิบ**

หินปูนที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตจะต้องย่อยให้มีขนาดที่เหมาะสมก่อนนำไปเข้าเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง ซึ่งขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมในการผลิตอยู่ในช่วงระหว่าง 60 – 80 มิลลิเมตร

**2) การเตรียมเชื้อเพลิง**

ถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง จะต้องย่อยให้มีขนาดที่เหมาะสมก่อนนำไปเข้าเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง ซึ่งขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมในการผลิตอยู่ในช่วงระหว่าง 100 – 150 มิลลิเมตร และจะต้องมีการชักตัวอย่าง (Sampling) ทุก ๆ 20 ตัน เพื่อทำการตรวจสอบค่าความร้อน (Heating Value) และองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินที่ใช้ให้เหมาะสมกับการผลิต

**3) การป้อนหินปูนและถ่านหิน**

เมื่อเริ่มทำการผลิตจะใช้ฟืนจุดที่ด้านล่างของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องประมาณ 20 กิโลกรัมก่อน จากนั้นจึงใส่ถ่านหินไปประมาณ 40 กิโลกรัม จนเปลวไฟลุกขึ้นสูง แล้วจึงเปิดประตูที่ด้านล่าง และปล่องอากาศเสีย (Stack) ให้อากาศไหลผ่าน แล้วทำการป้อนหินปูนและถ่านหินที่ด้านบนของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง โดยทำการป้อนหินปูนและถ่านหินเป็นช่วง ๆ ซึ่งจะมีอัตราส่วนระหว่างหินปูนกับเชื้อเพลิงที่ใช้ ซึ่งได้ทำการคำนวณเทียบกับค่าความร้อนของถ่านหินที่ใช้ในเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องที่ประเทศซิมบับเวกับถ่านหินในประเทศไทยที่ใช้ในเตาแบบเผาทีละครั้ง มีค่าเท่ากับ 6 : 1 (คือ ป้อนหินปูนประมาณ 300 กิโลกรัมต่อถ่านหินประมาณ 50 กิโลกรัม) และทำการป้อนหินปูนสลับชั้นกันระหว่างถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง (Mixed Feed) จนเต็ม

**4) การปล่อยปูนที่ได้ออก**

เมื่อความร้อนผ่านช่วงของการเผาหินปูน (Calcining Zone) และเริ่มเข้าสู่ช่วงของการอุ่นวัตถุดิบ (Preheating Zone) แล้วจึงทำการปล่อยปูนสุกที่ได้ออกมาจากเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง ซึ่งปูนสุกที่ปล่อยออกมาครั้งแรกจะพบว่ามีบางส่วนไม่ถูกเผา จะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพให้ดี เมื่อปล่อยปูนสุกออก จึงป้อนหินปูนและถ่านหินลงไปตามอัตราส่วน ซึ่งระยะเวลาในการปล่อยปูนสุกออกมา และการป้อนหินปูนและถ่านหินลงไปในเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องจะใช้เวลาประมาณ 15 นาที

**5) การตรวจสอบอุณหภูมิ**

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องจะอยู่ในช่วงประมาณ 950 – 1,000°C ถ้ามีอุณหภูมิมากกว่า 1,100°C แล้วปูนสุกที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นแบบสุกเกินไป (Overburnt) ในทางตรงข้ามอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่ำกว่า 900°C แล้วปูนสุกที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็น

แบบยังไม่สุก (Underburnt) โดยช่วงของการเผาหินปูน (Calcining Zone) จะอยู่ตรงกลางของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง ส่วนอุณหภูมิในช่วงของการปล่อยปูนสุกเย็นตัวลง (Cooling Zone) จะอยู่ในช่วงประมาณ 400 – 600°C และอุณหภูมิในช่วงของการอุ่นวัตถุดิบ (Preheating Zone) จะมีค่าประมาณ 400°C โดยผนังของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องควรจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า 100°C และอุณหภูมิของอากาศเสียที่ปล่อยออกจากเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องมีค่าประมาณ 85°C

ถ้าการตรวจสอบอุณหภูมิ ผู้ควบคุมไม่มีเครื่องมือวัดอุณหภูมิ จะสามารถสังเกตสีของเปลวไฟผ่านรูสำหรับสังเกต เช่น

- เปลวไฟสีแดงอ่อน จะมีอุณหภูมิประมาณ 500°C
- เปลวไฟสีแดงเข้ม จะมีอุณหภูมิประมาณ 700°C
- เปลวไฟสีน้ำตาลแดง จะมีอุณหภูมิประมาณ 1,000°C
- เปลวไฟส้มอ่อน จะมีอุณหภูมิประมาณ 1,200°C

**6) การเก็บข้อมูล**

การเก็บข้อมูลการผลิต เช่น ปริมาณของการป้อนหินปูนและถ่านหิน และการปล่อยปูนสุกที่ได้ออกมา เป็นต้น ควรทำการเก็บและบันทึกข้อมูลที่ได้ทุกวัน ในระหว่างการผลิตควรที่จะทำรายงานประจำวันในแต่ละกะของการทำงาน โดยเขียนรายงานระบุถึงปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิต และสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่ที่พบคือ หินปูนหลอมติดที่ผนังของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง เกิดขึ้นจากช่วงของการเผาหินปูน (Calcining Zone) มีอุณหภูมิสูงเกินไป และป้อนถ่านหินมากเกินไป โดยปัญหาของหินปูนหลอมตัวจะส่งผลให้ผนังบุ (Lining) สึกกร่อน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 6

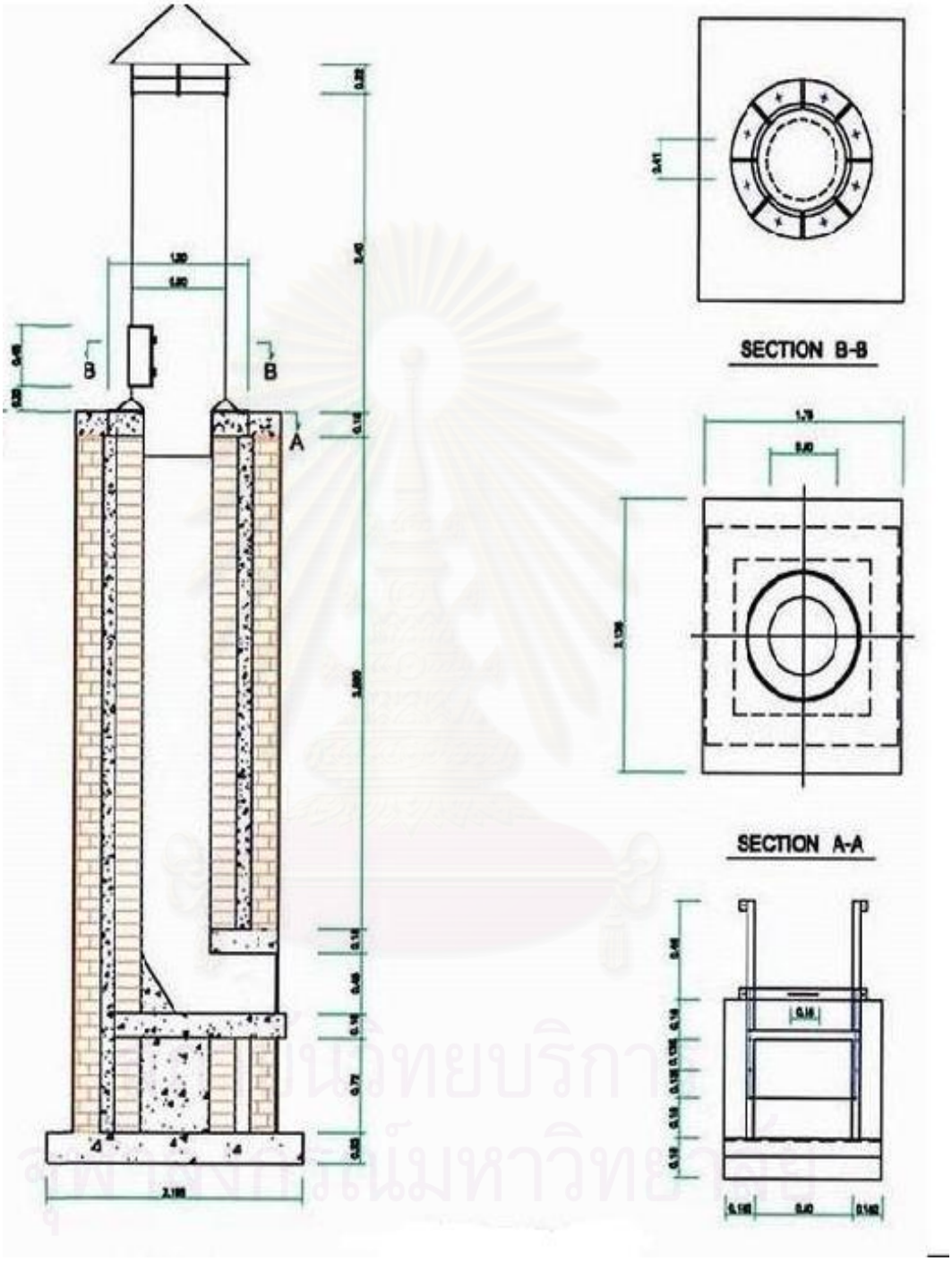
# ความเป็นไปได้ในการใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง สำหรับอุตสาหกรรมปูนขาวในประเทศไทย

ปัญหาที่เกิดขึ้นของอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทย มักจะพบในการผลิตปูนขาวที่ใช้เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) โดยส่วนใหญ่จะเป็นอุตสาหกรรมปูนขาวที่มีขนาดเล็กถึงกลาง ซึ่งมีกำลังการผลิตที่ไม่สูงนัก (กำลังการผลิตปูนสุกไม่เกิน 10,000 ตันต่อปี) จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบทางวิศวกรรม และทางการเงินของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทย (แสดงไว้ในบทที่ 4) จะพบว่าประสิทธิภาพของเตาแบบเผาทีละครั้งมีค่าต่ำมาก เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานความร้อนไปในระหว่างกระบวนการผลิตไปมาก ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ต้นทุนในการผลิตนั้นสูง เพื่อแก้ปัญหาที่กล่าวมาของเตาแบบเผาทีละครั้ง จึงน่าจะมีความเป็นไปได้ในการสร้างประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและอัตราการใช้เชื้อเพลิงให้ดีขึ้น โดยทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนมาใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Continuous Vertical Shaft Kiln) ทดแทนเตาแบบเผาทีละครั้ง

## 6.1 เตาตั้งขนาดเล็กแแบบต่อเนื่องสำหรับอุตสาหกรรมปูนขาวในประเทศไทย

เนื่องจากเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องต้นแบบที่ Kevin Mason (1997) ได้ทำการออกแบบและก่อสร้างที่ประเทศซิมบับเว (รายละเอียดแสดงไว้ในบทที่ 5) มีกำลังการผลิตปูนสุกเพียง 1.50 ตันต่อวัน ซึ่งมีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับเตาแบบเผาทีละครั้ง จึงน่าจะมีการออกแบบเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องให้มีกำลังการผลิตมากขึ้น ทำโดยการออกแบบและก่อสร้างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเพิ่มกำลังการผลิตเป็น 2 เท่าคือ มีกำลังการผลิตปูนสุก 3 ตันต่อวัน (หรือ 1,080 ตันต่อปี) ซึ่งใกล้เคียงกับกำลังการผลิตของเตาแบบเผาทีละครั้ง (1,200 ตันต่อปี)

ดังนั้นจากเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องต้นแบบที่ Kevin Mason (1997) ได้ทำการออกแบบและก่อสร้างที่ประเทศซิมบับเว จึงต้องเพิ่มขนาดของพื้นที่หน้าตัดของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง 2 เท่าเป็น 0.56 ตารางเมตร ทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องเพิ่มขึ้นเป็น 0.84 เมตร และจากอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Height to Diameter Ratio) ที่ใช้ในการออกแบบเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องเท่ากับ 7.5 : 1 ดังนั้นจะมีความสูงของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องเพิ่มขึ้นเป็น 6.30 เมตร โดยรูปที่ 6.1 แสดงรายละเอียดของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องสำหรับอุตสาหกรรมปูนขาวในประเทศไทยที่มีขนาดกำลังการผลิตปูนสุก 3 ตันต่อวัน




**รูปที่ 6.1 เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องสำหรับอุตสาหกรรมปูนขาวในประเทศไทย (กำลังการผลิตปูนสุก 3 ตันต่อวัน)**

โดยรายละเอียดของจำนวนวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องต้นแบบที่ Kevin Mason (1997) ได้ทำการออกแบบ (แสดงไว้ในตารางที่ 5.2) เมื่อคำนวณราคาของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างโดยใช้ราคาต่อหน่วยของวัสดุที่จำหน่ายในประเทศไทยเป็นเกณฑ์รวมเป็นเงินทั้งสิ้น 526,890 บาท นอกจากนี้ยังต้องคิดค่าแรงงานในการก่อสร้าง โดยใช้คนงาน 6 คน และมีระยะเวลาในการก่อสร้างประมาณ 32 วัน (ดูตารางที่ 5.1 ประกอบ) ซึ่งจะเป็น ค่าแรงงานในการก่อสร้างทั้งสิ้น 45,500 บาท จะได้เป็นเงินลงทุนในการก่อสร้างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องทั้งสิ้น 572,390 บาท แต่เมื่อออกแบบและก่อสร้างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเพิ่มกำลังการผลิตเป็น 2 เท่า จะต้องใช้วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างเพิ่มขึ้น เช่น อิฐทนไฟ (Refractory Brick) เพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า อิฐบล็อคเพิ่มขึ้นอีกประมาณร้อยละ 55 ปริมาณแร่เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 80 และปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 เป็นต้น ส่วนปล่องไอเสีย (Stack) จะต้องเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอีก 40 มิลลิเมตร เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องขนาดกำลังการผลิต 3 ตันต่อวันเพิ่มขึ้นอีกประมาณร้อยละ 48.50 เป็นเงินลงทุนในการก่อสร้างเท่ากับ 850,000 บาท

## 6.2 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง

การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตปูนขาวโดยใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง ประกอบไปด้วยข้อมูลการวิเคราะห์ในรายละเอียดทางวิศวกรรม และทางการเงิน โดยสามารถนำข้อมูลที่ทำการวิจัยเพื่อประกอบการตัดสินใจ และเปรียบเทียบระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง เพื่อเป็นแนวทางการเสริมสร้างศักยภาพให้แก่ของผู้ประกอบการอุตสาหกรรมปูนขาวโดยใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องเพื่อใช้จริงในอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทยที่ใช้เตาแบบเผาทีละครั้ง

### 6.2.1 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางวิศวกรรม

การวิเคราะห์ความเป็นได้ทางวิศวกรรม จะต้องพิจารณาในเรื่องของพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนขาว พลังงานที่สูญเสีย (Energy Loss) ไปในกระบวนการผลิต ประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน (Thermal Efficiency) และข้อมูลทางเทคนิคของเตาปูนขาว เป็นต้น เพื่อนำข้อมูลที่ได้เหล่านี้มาทำการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมปูนขาวที่มีขนาดเล็กและกลางของประเทศไทย มาทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมที่จะเปลี่ยนมาใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องทดแทนเตาแบบเผาทีละครั้ง เพื่อให้ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมปูนขาวสามารถพิจารณาในการเลือกใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องทดแทนเตาแบบเผาทีละครั้งที่ใช้อยู่เดิม

**1) พลังงานที่ใช้ในการผลิต และประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน**

การวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ในการผลิตของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง พิจารณาถึงพลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัม พลังงานที่สูญเสีย (Energy Loss) ไปในกระบวนการผลิต และประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน (Thermal Efficiency) ซึ่งข้อมูลที่นำมาใช้ คือ กำลังการผลิตของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง ปริมาณและค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิงที่ใช้ เพื่อนำข้อมูลที่ได้เหล่านี้มาทำการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมปูนขาวที่มีขนาดเล็กและกลางของประเทศไทย

**(1) พลังงานที่ใช้และสูญเสียในกระบวนการผลิต**

การวิเคราะห์ด้านพลังงานที่ใช้และสูญเสียในกระบวนการผลิตของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง ซึ่งข้อมูลที่นำมาใช้ คือ กำลังการผลิต ปริมาณและค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิง เป็นต้น มาทำการคำนวณพลังงานที่ใช้และสูญเสียไปในกระบวนการผลิตของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (สูตรการคำนวณ แสดงไว้ในภาคผนวก ฉ) เพื่อนำข้อมูลที่ได้เหล่านี้มาทำการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมปูนขาวที่มีขนาดเล็กและกลางของประเทศไทย โดยข้อมูลของพลังงานที่ใช้และสูญเสียในกระบวนการผลิตของเตาแบบเผาทีละครั้งได้อ้างอิงจากผลการวิจัยของ Ad Dankers (1992) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานที่ใช้และสูญเสียไปในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้งในเขตพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย คือ จังหวัดราชบุรี และสระบุรี

พลังงานที่ใส่เข้าไปในการผลิตปูนสุก (Energy Input) จะคำนวณจากปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิต และค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิงที่ใช้ ซึ่งพลังงานที่ใส่เข้าไปนี้ไม่ได้ใช้ในการผลิตปูนสุกทั้งหมด แต่จะสูญเสียไปในระหว่างกระบวนการผลิต โดยจะพบว่าเตาปูนขาวส่วนใหญ่จะทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงประมาณ 1,000 – 1,300°C หินปูนจะถูกให้ความร้อนจนอุณหภูมิถึงจุดที่ทำให้เกิด Calcination ซึ่งพลังงานที่น้อยที่สุดที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนสุก (Minimum Energy Requirement: MER) เป็นพลังงานในทางทฤษฎีที่ทำให้เกิด Calcination แล้วได้ปูนสุก (Quicklime) แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะพบว่าพลังงานที่ใช้จะมากกว่าในทางทฤษฎี เพราะมีพลังงานที่สูญเสีย (Energy Loss) ซึ่งสาเหตุของพลังงานที่สูญเสียในกระบวนการผลิตปูนขาวมีดังนี้คือ

- การสูญเสียพลังงานไปในอากาศที่ปล่อย (Exhaust Gas) ออกจากเตาปูนขาว
- การสูญเสียพลังงานไปในช่วงที่ปล่อยปูนสุกออกมาจากเตาปูนขาว
- การสูญเสียพลังงานไปในการไล่ความชื้นของหินปูนและเชื้อเพลิง
- การสูญเสียพลังงานไปในการแผ่รังสีความร้อน การนำความร้อน และการพาความร้อนที่ผิวผนังของเตาปูนขาว

จากการคำนวณจะพบว่า พลังงานที่ใช้และสูญเสียในกระบวนการผลิตปูนสุก (Quicklime) ของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง ในการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัม จะใช้พลังงานที่ใส่เข้าไป (Energy Input) เท่ากับ 6.20 MJ โดยพลังงานที่น้อยที่สุดที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนสุก (Minimum Energy Requirement: MER) มีค่า 2.70 MJ คิดเป็นร้อยละ 43.54 ของพลังงานที่ใส่เข้าไป (Energy Input) ส่วนพลังงานที่สูญเสียในกระบวนการผลิต (Energy Loss) มีค่า 3.50 MJ คิดเป็นร้อยละ 56.46 ของพลังงานที่ใส่เข้าไป (Energy Input) ซึ่งพลังงานที่สูญเสียมากที่สุดในกระบวนการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัม คือ พลังงานที่สูญเสียไปกับก๊าซที่ถูกปล่อยจากเตาปูนขาวมากถึง 1.61 MJ คิดเป็นร้อยละ 25.97 ของพลังงานที่ใส่เข้าไป (Energy Input)

ข้อมูลของพลังงานที่ใช้และสูญเสียในกระบวนการผลิตของเตาแบบเผาทีละครั้งที่ได้อ้างอิงจากผลการวิจัยของ Ad Dankers (1992) จะพบว่า ในการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัม ใช้พลังงานที่ใส่เข้าไป (Energy Input) มีค่า 14.10 MJ โดยพลังงานที่น้อยที่สุดที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนสุก (Minimum Energy Requirement: MER) มีค่า 2.70 MJ คิดเป็นร้อยละ 19.15 ของพลังงานที่ใส่เข้าไป (Energy Input) ส่วนพลังงานที่สูญเสียในกระบวนการผลิต (Energy Loss) มีค่า 11.40 MJ คิดเป็นร้อยละ 80.85 ของพลังงานที่ใส่เข้าไป (Energy Input) ซึ่งพลังงานที่สูญเสียมากที่สุดในกระบวนการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัม คือ พลังงานที่สูญเสียไปกับก๊าซที่ถูกปล่อยจากเตาปูนขาวมากถึง 5.99 MJ คิดเป็นร้อยละ 42.48 ของพลังงานที่ใส่เข้าไป (Energy Input)

จากตารางที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้และสูญเสียไปในกระบวนการผลิตปูนสุกระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้งพบว่า พลังงานที่ใส่เข้าไป (Energy Input) ในการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัมของเตาแบบเผาทีละครั้งจะใช้มากกว่าเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องถึง 7.90 MJ ทำให้สิ้นเปลืองปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ ซึ่งสาเหตุเกิดจากมีพลังงานที่สูญเสียในกระบวนการผลิต (Energy Loss) มาก เนื่องจากปัญหาในเรื่องของประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาแบบเผาทีละครั้งที่มีค่าต่ำมาก โดยเฉพาะพลังงานที่สูญเสียไปกับก๊าซที่ถูกปล่อยจากเตาปูนขาวในกระบวนการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัมของเตาแบบเผาทีละครั้งจะใช้มากกว่าเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องถึง 4.38 MJ เนื่องจากระบบการเผาของเตาแบบเผาทีละครั้งเป็นระบบเปิด ทำให้ความร้อนออกมาพร้อมกับก๊าซถูกปล่อยจากเตาปูนขาวมาก ส่วนเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง จะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน 2 อย่างคือ หินปูนที่อยู่ด้านบนสุดของเตาปูนขาวจะถูกอุ่นให้ร้อนโดยความร้อนที่ได้จากอากาศที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตและอากาศที่เข้าสู่ด้านล่างของเตาปูนขาวได้รับความร้อนการทำให้เย็นตัว (Cooling Zone) ก่อนเข้าสู่การเผาหินปูน (Calcining Zone) จะลอยขึ้นด้านบนสุดของเตาปูนขาว จึงทำให้ความร้อนออกมาพร้อมกับก๊าซถูกปล่อยจากเตาปูนขาวน้อยกว่าเตาแบบเผาทีละครั้ง

**ตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้และสูญเสียไปในกระบวนการผลิตปูนสุกระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง**

| รายการ | เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (กำลังการผลิต 1,080 ตันต่อปี) | | เตาแบบเผาทีละครั้ง [1] (กำลังการผลิต 1,200 ตันต่อปี) | |
|---|---|---|---|---|
| | พลังงานที่ใช้ (MJ/kg Quicklime) | สัดส่วนต่อพลังงานที่ใช้ในการผลิต (%) | พลังงานที่ใช้ (MJ/kg Quicklime) | สัดส่วนต่อพลังงานที่ใช้ในการผลิต (%) |
| **พลังงานที่ใส่เข้าไปในการผลิตปูนสุก (Energy Input)** | **6.20** | **100.00** | **14.10** | **100.00** |
| | | | | |
| **พลังงานที่น้อยที่สุดที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนสุก (Minimum Energy Requirement: MER)** | | | | |
| - พลังงานที่ใช้ในการเผาหินปูน | 2.51 | 40.48 | 2.51 | 17.80 |
| - พลังงานที่ใช้สำหรับหินปูนที่ยังเผาไม่สุกและมลทิน | 0.16 | 2.58 | 0.16 | 1.14 |
| - พลังงานที่ใช้สำหรับความชื้นในหินปูนและอากาศ | 0.03 | 0.48 | 0.03 | 0.21 |
| **รวม** | **2.70** | **43.54** | **2.70** | **19.15** |
| | | | | |
| **พลังงานที่สูญเสียในกระบวนการผลิต (Energy Loss)** | | | | |
| - พลังงานที่สูญเสียไปกับก๊าซที่ปล่อยจากเตาปูนขาว | 1.61 | 25.97 | 5.99 | 42.48 |
| - พลังงานที่สูญเสียไปกับถ่านหินที่ไม่เผาไหม้ | 0.00 | 0.00 | 1.75 | 12.41 |
| - พลังงานที่สูญเสียของเมื่อปูนสุกถูกปล่อยให้เย็นตัว | 0.46 | 7.42 | 1.51 | 10.71 |
| - พลังงานที่สูญเสียไปกับการพาความร้อน | 0.31 | 5.00 | 0.46 | 3.26 |
| - พลังงานที่สูญเสียไปกับการนำความร้อน | 0.22 | 3.55 | 0.33 | 2.34 |
| - พลังงานที่สูญเสียไปกับการแผ่ความร้อน | 0.15 | 2.42 | 0.27 | 1.92 |
| - พลังงานที่สูญเสียอื่น ๆ | 0.75 | 12.10 | 1.09 | 7.73 |
| **รวม** | **3.50** | **56.46** | **11.40** | **80.85** |

ที่มา : [1] Ad Dankers, 1992

**(2) ประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน (Thermal Efficiency)**

ประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน (Thermal Efficiency) ขึ้นอยู่กับชนิดของหินปูนที่นำมาใช้ในการผลิต ประเภทของเตาปูนขาวที่นำมาใช้ ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ และทักษะของผู้ควบคุมเตาปูนขาว ซึ่งประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาปูนขาวจะเป็นค่าที่แปรผันตรงกับอัตราการใช้เชื้อเพลิง และพลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัม ซึ่งจะพบว่าในทางทฤษฎีพลังงานที่ใช้ในการเกิด Calcination แล้วได้ปูนสุก (Quicklime) 1 กิโลกรัมจะมีค่าเท่ากับ 770 kcal แต่ในทางปฏิบัติแล้ว พลังงานที่ใช้จะมากกว่าในทางทฤษฎี เนื่องจากมีพลังงานที่สูญเสีย (Energy Loss) ไปในกระบวนการผลิต ซึ่งสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพในการใช้พลังงานจากพลังงานที่ใช้ในมางทฤษฎีมาเทียบกับพลังงานที่ใช้จริงในทางปฏิบัติ โดยประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาปูนขาวสามารถที่คำนวณจาก

$$\text{Thermal Efficiency} = \frac{\text{Theoretical Energy Requirement x \%Available Oxide Content}}{\text{Heating Value per kg Fuel Used} \times \text{kg Fuel Used per kg Quicklime}}$$

จากการคำนวณพบว่า เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องมีอัตราการใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตเท่ากับ 330 กิโลกรัมต่อตันปูนสุก และพลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัมมีค่าเท่ากับ 1,683 kcal ส่วนประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน (Thermal Efficiency) น่าจะมีมีค่าสูงถึง 40.26 % ในขณะที่เตาแบบเผาทีละครั้งมีอัตราการใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตเท่ากับ 750 กิโลกรัมต่อตันปูนสุก และพลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัมมีค่าเท่ากับ 3,825 kcal ส่วนประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน (Thermal Efficiency) มีค่าเพียง 17.72 %

จากตารางที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบเรื่องของอัตราการใช้เชื้อเพลิง และประสิทธิภาพในการใช้พลังงานระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้งเมื่อใช้เชื้อเพลิงที่เป็นถ่านหินลิกไนต์ที่มีค่าความร้อน (Heating Value) เท่ากันคือ 5,100 kcal/kg จะพบว่าอัตราการใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตของเตาแบบเผาทีละครั้งที่มากกว่าเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องถึง 420 กิโลกรัมต่อตันปูนสุก (ซึ่งมากกว่าถึงร้อยละ 56) เนื่องจากเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องจะมีอัตราส่วนของหินปูนต่อถ่านหินลิกไนต์ที่ใช้เพียง 6 : 1 ในขณะที่เตาแบบเผาทีละครั้งจะใช้อัตราส่วนของหินปูนต่อถ่านหินลิกไนต์สูงถึง 2.68 : 1 ทำให้พลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัมของเตาแบบเผาทีละครั้งมีค่ามากกว่าเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องถึง 2,142 kcal (ซึ่งมากกว่าถึงร้อยละ 56) และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องน่าจะมีที่ดีกว่าเตาแบบเผาทีละครั้งถึงร้อยละ 56

**ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบอัตราการใช้เชื้อเพลิง และประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน ระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง**

| รายการ | เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง | เตาแบบเผาทีละครั้ง |
|---|---|---|
| 1. กำลังการผลิตปูนขาว | 1,080 ตัน/ปี | 1,200 ตัน/ปี |
| 2. อัตราส่วนของหินปูนต่อถ่านหินที่ใช้ | 6 : 1 | 2.68 : 1 |
| 3. ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ | 356.40 ตัน/ปี (ถ่านหินลิกไนต์) | 900 ตัน/ปี (ถ่านหินลิกไนต์) |
| 4. อัตราการใช้เชื้อเพลิง | 330 กก./ตันปูนสุก (ถ่านหินลิกไนต์) | 750 กก./ตันปูนสุก (ถ่านหินลิกไนต์) |
| 5. ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง | 5,100 kcal/kg | 5,100 kcal/kg |
| 6. พลังงานในการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัม | 1,683 kcal | 3,825 kcal |
| 7. ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาปูนขาว | 40.26 % | 17.72 % |

**2) ข้อมูลทางเทคนิค**

ข้อมูลทางเทคนิคของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง จะพิจารณาจากข้อมูลของกระบวนการผลิตและเทคโนโลยีเตาปูนขาวที่ได้รวบรวม มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับข้อมูลทางเทคนิคของเตาแบบเผาทีละครั้ง ไม่ว่าจะเป็นกำลังการผลิตปูนสุก ประเภทของเชื้อเพลิงที่ใช้ การควบคุมเตาปูนขาว เงินทุนเริ่มแรกในการก่อสร้าง แรงงานที่ใช้ในการผลิต ระบบในการผลิต ขนาดของหินปูนที่ป้อน และคุณภาพของปูนสุกที่ได้ เป็นต้น โดยตารางที่ 6.3 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิคระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง

จากการเปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิคระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้งจะพบว่า การควบคุมเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องจะต้องใช้คนงานที่มีทักษะพอสมควร เนื่องจากคนงานจะต้องคอยป้อนหินปูนสลับชั้นกันระหว่างถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง (Mixed Feed) เข้าไปในเตาปูนขาว โดยทำการป้อนหินปูนและถ่านหินเป็นช่วง ๆ และในระหว่าง

การผลิตจะต้องตรวจสอบและเก็บข้อมูลการผลิต เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ปริมาณของการป้อนหินปูนและถ่านหิน และการตรวจสอบคุณภาพของปูนสุกที่ได้ เป็นต้น

ขนาดของหินปูนที่ใช้ในการผลิตจะพบว่า เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องจะใช้หินปูนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 60 – 80 มิลลิเมตร ส่วนเตาแบบเผาทีละครั้งในประเทศไทยจะใช้หินปูนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 80 มิลลิเมตรขึ้นไป ซึ่งมีขนาดใหญ่มาก

คุณภาพของปูนสุกที่ได้จากเตาแบบเผาทีละครั้งเป็นปูนสุกแบบสุกมาก (Hard Burn) เนื่องจากการจัดเรียงหินปูนที่อยู่ในเตาแบบเผาทีละครั้งตั้งแต่ด้านล่างที่ใช้หินปูนขนาดใหญ่ไปถึงด้านบนที่เป็นหินปูนขนาดเล็ก ทำให้ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของถ่านหินไม่สามารถกระจายไปด้านบนได้อย่างทั่วถึง ส่งผลทำให้ปูนสุกที่ได้ส่วนใหญ่ซึ่งอยู่ด้านล่างเป็นปูนสุกแบบสุกมาก (Hard Burn) ส่วนปูนสุกที่อยู่ด้านบนจะเป็นแบบยังไม่สุก (Underburnt) ส่วนเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องจะเป็นปูนสุกแบบสุกมาก (Hard Burn) เหมือนเตาแบบเผาทีละครั้ง แต่จะพบว่าปูนสุกที่ได้จะมีเถ้า (Ash) ปนอยู่ด้วย จึงต้องทำการร่อนเถ้าที่ติดอยู่ออกไป หรืออาจจะใช้ถ่านหินที่มีส่วนประกอบของเถ้าอยู่น้อย

**ตารางที่ 6.3 การเปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิคระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง**

| รายการ | เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง | เตาแบบเผาทีละครั้ง |
|---|---|---|
| 1. ประเภทของเชื้อเพลิงที่ใช้ | ถ่านหินลิกไนต์ | ถ่านหินลิกไนต์ |
| 2. การควบคุมเตาปูนขาว | ต้องมีทักษะพอสมควร | ไม่ต้องมีทักษะมากนัก |
| 3. เงินลงทุนเริ่มแรก | ต่ำมาก (850,000 บาท) | ต่ำมาก (750,000 บาท) |
| 4. แรงงานที่ใช้ในการผลิต | มาก (5 คนต่อเตาต่อกะ) | มาก (5 คนต่อเตาต่อกะ) |
| 5. ระบบในการผลิต | ต่อเนื่อง | ไม่ต่อเนื่อง |
| 6. ขนาดของหินปูนที่ป้อน | ขนาดใหญ่ (60 –80 มิลลิเมตร) | ขนาดใหญ่มาก (80 – 150 มิลลิเมตร) |
| 7. ปูนสุกที่ได้ส่วนใหญ่ | Hard Burn | Hard Burn |

**6.2.2 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงิน**

การวิเคราะห์ความเป็นได้ทางการเงิน จะพิจารณาจากข้อมูลเกี่ยวกับต้นทุนในการผลิตของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง เช่น เงินลงทุนในก่อสร้าง ต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม และค่าแรงงาน เป็นต้น รวมถึงรายได้จากการขายปูนขาว นำมาคำนวณและวิเคราะห์หาต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนสุก และทำการวิเคราะห์กระแสเงิน (Cash Flow Analysis) แล้วนำวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับเตาแบบเผาทีละครั้ง โดยมีเกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ คือ

- มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV)
- อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR)
- ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

ผลของการวิเคราะห์กระแสเงิน (Cash Flow Analysis) ทำให้ได้เกณฑ์ในการตัดสินใจ ถึงกระนั้นก็ตามข้อมูลยังมีความไม่แน่นอน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลย่อมจะมีผลกระทบต่อเกณฑ์การตัดสินใจ ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาความเป็นไปได้ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ โดยการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)

**1) ต้นทุนในการผลิต**

การศึกษาและวิเคราะห์ในเรื่องต้นทุนการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง จะเป็นการนำข้อมูลบางค่าที่อ้างอิงมาจาก Kevin Mason (1997) ที่ได้ออกแบบและก่อสร้างไว้ที่ประเทศซิมบับเว โดยออกแบบเพิ่มให้มีกำลังการผลิตเป็น 2 เท่าคือ กำลังการผลิตปูนสุก 3 ตันต่อวัน (หรือ 1,080 ตันต่อปี) ซึ่งสามารถแบ่งต้นทุนในการผลิตปูนขาวออกเป็นหัวข้อได้ดังนี้

**(1) เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว** จะประมาณราคาของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง และค่าแรงงานในการก่อสร้าง โดยอ้างอิงจาก Kevin Mason (1997) ที่ได้ทำการออกแบบและก่อสร้างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง ออกแบบเพิ่มให้มีกำลังการผลิตเป็น 2 เท่าคือ กำลังการผลิตปูนสุก 3 ตันต่อวัน (หรือ 1,080 ตันต่อปี) ซึ่งจะมีเงินลงทุนในการก่อสร้างเพิ่มขึ้นอีกประมาณร้อยละ 48.50 เป็นเงินลงทุนในการก่อสร้างทั้งหมด

**(2) ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว** จะรวมถึงค่าแรงงาน และค่าวัสดุที่ใช้ซ่อมแซมเตาปูนขาว และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการผลิต ได้ประมาณการค่าใช้จ่ายแต่ละปีในการซ่อมแซมเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องไว้ประมาณร้อยละ 35 ของเงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว

**(3) ค่าแรงงาน** คิดเฉพาะค่าแรงงานที่เป็นคนงานขนวัตถุดิบและปูนขาว และผู้ที่ควบคุมเตาปูนขาว โดยจะทำการประมาณจำนวนคนงานที่ใช้ และค่าแรงงานเท่ากับข้อมูลของเตาแบบเผาทีละครั้ง

**(4) ค่าหินปูน** จะรวมถึงค่าขนส่งหินปูนถึงหน้าโรงงาน โดยการผลิตปูนสุก 1 ตัน จะต้องใช้หินปูนหนักประมาณ 2 ตันเพื่อนำมาเผา ซึ่งประมาณราคาหินปูน (รวมค่าขนส่ง) เท่ากับข้อมูลของเตาแบบเผาทีละครั้ง

**(5) ค่าเชื้อเพลิง** จะรวมถึงค่าขนส่งเชื้อเพลิงถึงหน้าโรงงาน โดยข้อมูลที่อ้างอิงจาก Kevin Mason (1997) ที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง (ค่าความร้อนประมาณ 5,100 kcal/kg) ซึ่งจะมีการป้อนหินปูนและถ่านหินเป็นช่วง ๆ ที่อัตราส่วนระหว่างหินปูนกับเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 6 : 1 คือ ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงประมาณ 0.33 ตันต่อตันปูนสุก โดยจะประมาณราคาถ่านหินลิกไนต์เท่ากับข้อมูลของเตาแบบเผาทีละครั้ง

**(6) ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ** จะรวมถึงค่าบริหารงาน และค่าไฟฟ้าที่ใช้ภายในโรงงาน เป็นต้น โดยประมาณค่าใช้จ่ายเท่ากับข้อมูลของเตาแบบเผาทีละครั้ง

โดยรายละเอียดการคำนวณต้นทุนต่าง ๆ ในการผลิตปูนสุกของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (แสดงไว้ในภาคผนวก ง) จากนั้นข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนสุก 1 ตัน เพื่อวิเคราะห์ว่าค่าใช้จ่ายในด้านใดที่มีผลต่อต้นทุนในการผลิตมากที่สุด โดยรูปที่ 6.2 แสดงสัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง ส่วนตารางที่ 6.4 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตปูนสุกระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง และรูปที่ 6.3 เป็นแผนภูมิแท่งแสดงต้นทุนการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง

จากการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตปูนสุกระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง (ตารางที่ 6.4) จะพบว่า ต้นทุนการผลิตของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง 1,224.38 บาทต่อตันปูนขาว และเตาแบบเผาทีละครั้งมีต้นทุนการผลิต 1,405.83 บาต่อตันปูนขาว เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงของเตาแบบเผาทีละครั้งมีค่ามากถึงร้อยละ 58.68 ของต้นทุนในการผลิต (825 บาทต่อตันปูนขาว) ดังนั้นจึงทำให้ต้นทุนในการผลิตนั้นสูง เป็นปัญหาใหญ่สำหรับ ผู้ประกอบการ เนื่องจากไม่สามารถทำให้ราคาขายของปูนขาวสูงกว่าราคาในขณะนี้ได้ และยังต้องแข่งขันกับผู้ผลิตอื่น ซึ่งใช้เตาแบบเผาต่อเนื่อง (Continuous Kiln) โดยเมื่อเทียบกับเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องพบว่า ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงในการผลิตปูนสุก 1 ตัน สามารถลดค่าใช้จ่ายในด้านนี้ถึง 462 บาทต่อตันปูนขาว (ซึ่งลดลงถึงร้อยละ 56) เมื่อพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องที่ค่าสูงกว่าเตาแบบเผาทีละครั้งคือ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องมีค่าสูงถึงร้อยละ 22.50 (275.46 บาทต่อตันปูนขาว) เพราะส่วนที่ต้องเปลี่ยนและซ่อมแซมตลอดทุกปีคือ ผนังของเตาปูนขาวที่เป็นอิฐทนไฟ (Refractory Brick) ที่มีราคาแพง

**ตารางที่ 6.4 การเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตปูนสุกระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง**

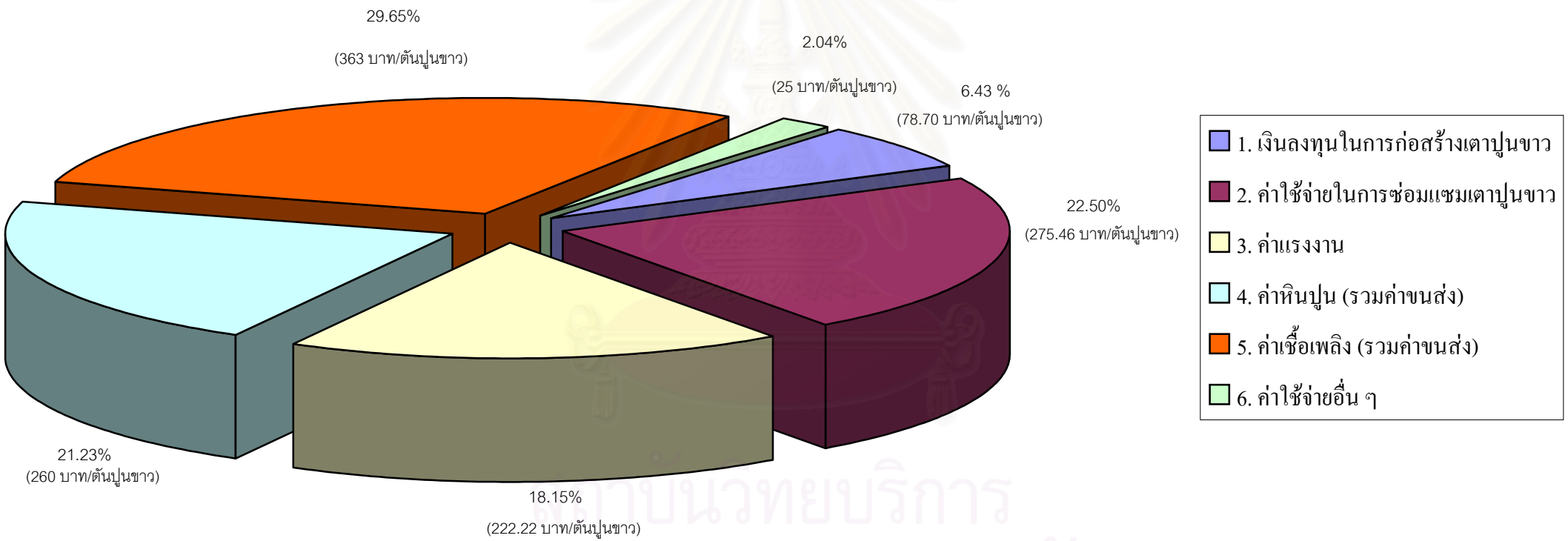
| รายการ | เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง | | เตาแบบเผาทีละครั้ง | |
|---|---|---|---|---|
| | (บาท/ตันปูนขาว) | (% ของต้นทุนรวม) | (บาท/ตันปูนขาว) | (% ของต้นทุนรวม) |
| 1. เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว | 78.70 | 6.43 | 62.50 | 4.45 |
| 2. ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว | 275.46 | 22.50 | 33.33 | 2.37 |
| 3. ค่าแรงงาน | 222.22 | 18.15 | 200.00 | 14.23 |
| 4. ค่าหินปูน (รวมค่าขนส่ง) | 260.00 | 21.23 | 260.00 | 18.49 |
| 5. ค่าเชื้อเพลิง (รวมค่าขนส่ง) | 363.00 | 29.65 | 825.00 | 58.68 |
| 6. ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ | 25.00 | 2.04 | 25.00 | 1.78 |
| **รวม** | **1,224.38** | **100.00** | **1,405.83** | **100.00** |

หมายเหตุ : ราคาถ่านหินลิกไนต์ 1,100 บาทต่อตัน

รายละเอียดต้นทุนในการผลิตปูนสุกของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง แสดงไว้ในภาคผนวก ง

รายละเอียดต้นทุนในการผลิตปูนสุกของเตาแบบเผาทีละครั้ง แสดงไว้ในภาคผนวก ค

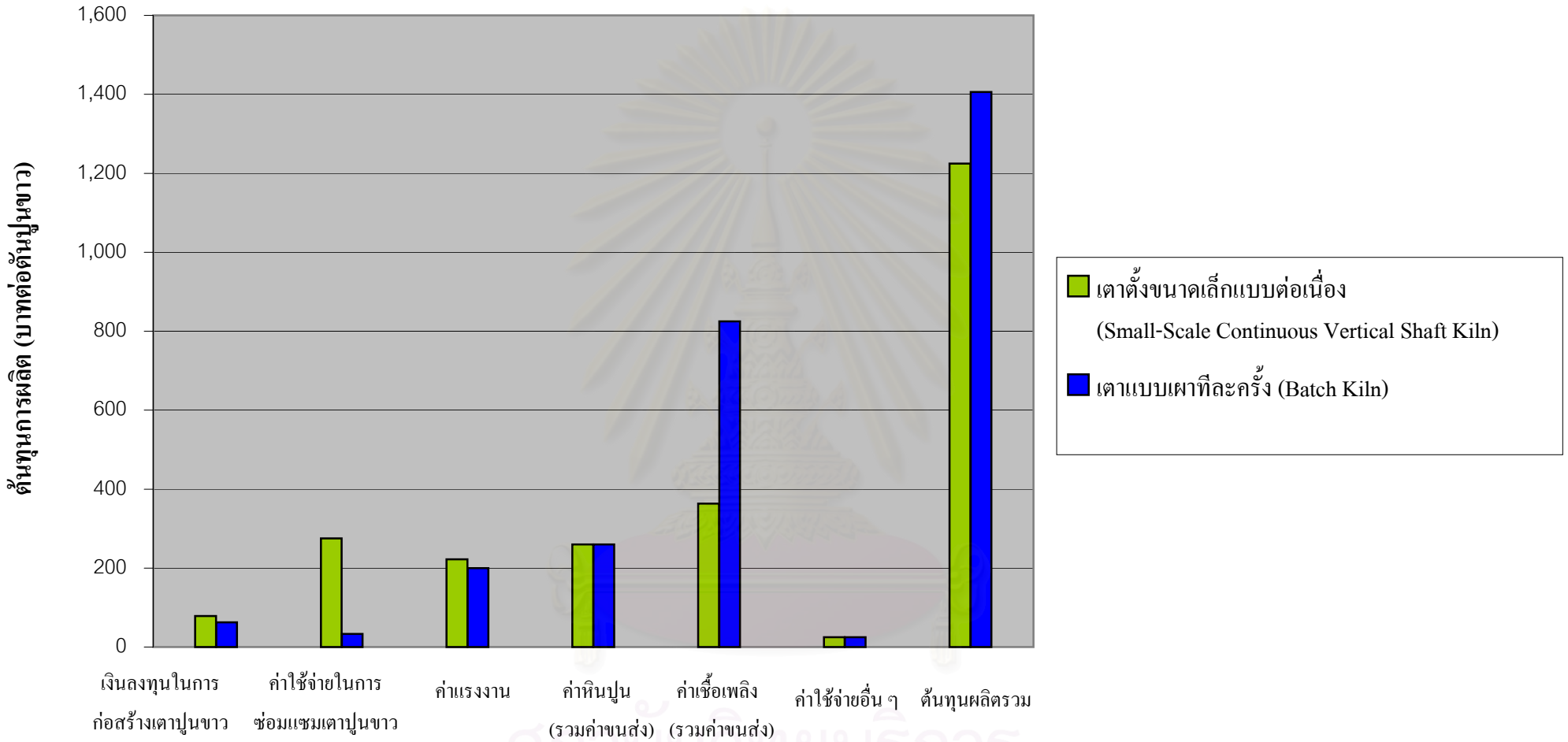
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**หมายเหตุ :** ต้นทุนผลิตรวม 1,224.38 บาทต่อตันปูนขาว

**รูปที่ 6.2 สัดส่วนของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Continuous Vertical Shaft Kiln)**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 6.3 แผนภูมิแท่งแสดงต้นทุนการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**2) การวิเคราะห์กระแสเงิน (Cash Flow Analysis)**

การศึกษาและวิเคราะห์กระแสเงิน (Cash Flow Analysis) ในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง เป็นการนำข้อมูลบางค่าที่อ้างอิงมาจาก Kevin Mason (1997) ที่ได้ออกแบบและก่อสร้างไว้ที่ประเทศซิมบับเว โดยออกแบบเพิ่มให้มีกำลังการผลิตเป็น 2 เท่าคือ กำลังการผลิตปูนสุก 3 ตันต่อวัน (หรือ 1,080 ตันต่อปี) ซึ่งการวิเคราะห์กระแสเงิน (Cash Flow Analysis) เป็นการจัดเรียงกระแสเงินเข้า และกระแสเงินที่ใช้จ่ายออกไปในกิจกรรมต่าง ๆ ทุกปี จนสิ้นอายุการใช้งานของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องประมาณ 10 ปี

จากนั้นนำผลวิเคราะห์ที่ได้มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์กระแสเงิน (Cash Flow Analysis) ของเตาแบบเผาทีละครั้ง โดยมีเกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

**(1) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV)** เป็นการวิเคราะห์ที่นิยมใช้กันมากเพื่อเปรียบเทียบโครงการที่มีระยะเวลาในการดำเนินงานไม่เท่ากัน สามารถทำโดยเปลี่ยนค่ากระแสเงินสดสุทธิ (Net Cash Flow) ของแต่ละปีไปเป็นมูลค่าเงินปัจจุบัน แล้วรวมผลลัพธ์ทั้งหมดเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ซึ่งอัตราลดค่า (Discount Rate) ที่ใช้ในการศึกษานี้คือ 8 % ถ้าหากมูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นบวก หมายความว่าเป็นโครงการที่มีผลตอบแทนมากกว่าความพอใจขั้นต่ำ โครงการนั้นสมควรลงทุน ส่วนโครงการที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นลบ หมายความว่า โครงการนั้นให้ผลตอบแทนน้อยกว่าผลตอบแทนขั้นต่ำที่กำหนดไว้

**(2) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR)** เป็นการวิเคราะห์หาอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยของโครงการ ซึ่งทำให้ผลรวมมูลค่าปัจจุบันของโครงการมีค่าเท่ากับศูนย์ (ผลรวมของกระแสเงินออกเท่ากับกระแสเงินได้) ถ้าผลวิเคราะห์ว่า อัตราผลตอบแทนภายในมากกว่าผลตอบแทนขั้นต่ำ โครงการนั้นสมควรลงทุน และถ้าอัตราผลตอบแทนภายในมีค่าน้อยกว่าผลตอบแทนขั้นต่ำ ก็จะเป็นโครงการที่ไม่น่าลงทุน

**(3) ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)** เป็นระยะเวลาที่ต้องใช้เพื่อให้มีผลตอบแทนคุ้มกับการลงทุน เป็นวิธีการที่ง่ายโดยไม่ต้องคิดค่าเงินปัจจุบัน ซึ่งในสภาวะที่ไม่แน่นอนการลงทุนที่มีระยะเวลาคุ้มทุนเร็วกว่าย่อมมีความเสี่ยงน้อยกว่าโครงการที่มีระยะเวลาการคืนทุนที่มากกว่า

โดยตารางที่ 6.5 กระแสเงินเข้าและออกของการผลิตปูนขาวที่ใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง และรูปที่ 6.4 เป็นแผนภูมิแท่งแสดง Cumulative Net Cash Flow ของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง

**ตารางที่ 4.4 กระแสเงินเข้าและออกของการผลิตปูนขาวที่ใช้เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)**

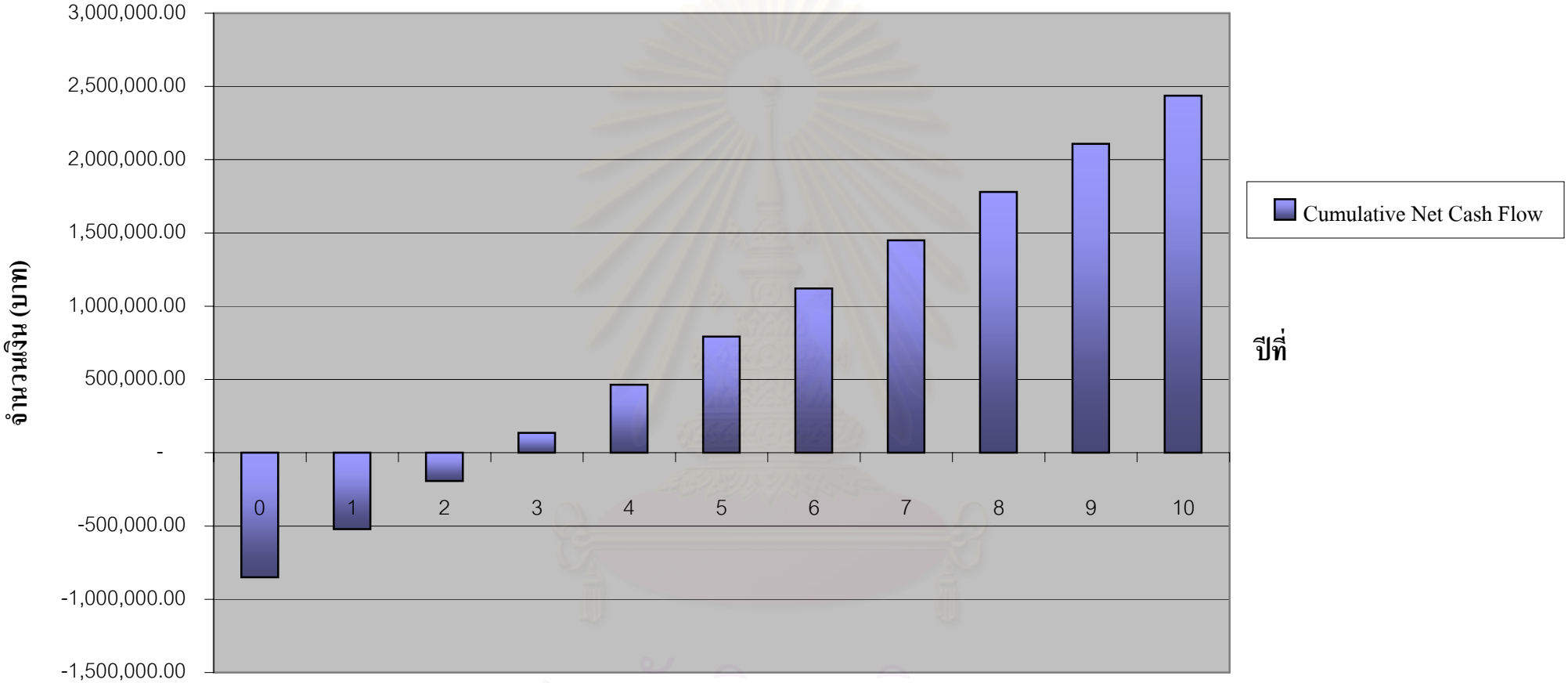
| รายการ | ปีที่ | | | | | | | | | | | รวม |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| **Cash In Flow :-** | | | | | | | | | | | | |
| รายได้จากการขายปูนขาว | | 1,653,000.00 | 1,653,000.00 | 1,653,000.00 | 1,653,000.00 | 1,653,000.00 | 1,653,000.00 | 1,653,000.00 | 1,653,000.00 | ########## | 1,653,000.00 | 16,530,000.00 |
| | | | | | | | | | | | | |
| **Cash Out Flow :-** | | | | | | | | | | | | |
| 1. เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว | - 750,000.00 | | | | | | | | | | | - 750,000.00 |
| 2. ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว | | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 40,000.00 | - 400,000.00 |
| 3. ค่าแรงงาน | | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 240,000.00 | - 2,400,000.00 |
| 4. ค่าหินปูน (รวมค่าขนส่ง) | | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 312,000.00 | - 3,120,000.00 |
| 5. ค่าเชื้อเพลิง (รวมค่าขนส่ง) | | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 990,000.00 | - 9,900,000.00 |
| 6. ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ | | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 30,000.00 | - 300,000.00 |
| **Total Cash Out Flow** | - 750,000.00 | -1,612,000.00 | -1,612,000.00 | - 1,612,000.00 | -1,612,000.00 | -1,612,000.00 | -1,612,000.00 | - 1,612,000.00 | -1,612,000.00 | ########## | -1,612,000.00 | -16,870,000.00 |
| | | | | | | | | | | | | |
| **Net Cash Flow** | - 750,000.00 | 41,000.00 | 41,000.00 | 41,000.00 | 41,000.00 | 41,000.00 | 41,000.00 | 41,000.00 | 41,000.00 | 41,000.00 | 41,000.00 | - 340,000.00 |
| **Cumulative Net Cash Flow** | - 750,000.00 | - 709,000.00 | - 668,000.00 | - 627,000.00 | - 586,000.00 | - 545,000.00 | - 504,000.00 | - 463,000.00 | - 422,000.00 | - 381,000.00 | - 340,000.00 | - 5,995,000.00 |
| **Present Value (@8%)** | - 750,000.00 | 37,961.90 | 35,149.30 | 32,545.80 | 30,135.00 | 27,904.60 | 25,838.20 | 23,923.50 | 22,152.30 | 20,508.20 | 18,991.20 | - 474,890.00 |

**หมายเหตุ :** มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV) = 108,880.00 บาท

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return : IRR) = 11.12 %

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) = 5.86 ปี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 6.4 แผนภูมิแท่งแสดง Cumulative Net Cash Flow ของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Continuous Vertical Shaft Kiln)**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ 6.6 การเปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง**

| รายการ | เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง | เตาแบบเผาทีละครั้ง |
|---|---|---|
| 1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) | 1,355,308.60 บาท | 108,880.00 บาท |
| 2. อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) | 37.01 % | 11.12 % |
| 3. ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) | 2.59 ปี | 5.86 ปี |

จากตารางที่ 6.6 เป็นการเปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง (เกณฑ์การตัดสินใจของเตาแบบเผาทีละครั้งดูตารางที่ 4.4 บทที่ 4 ประกอบ) ซึ่งจากการเปรียบเทียบเกณฑ์ในการตัดสินใจพบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) ของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องมีค่าเป็นบวก (1,355,308.60 บาท) จึงมีความเป็นไปได้ในการลงทุน เมื่อเปรียบเทียบกับเตาแบบเผาทีละครั้งที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) น้อยกว่าคือ 108,880.00 บาท ส่วนอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) ของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องมีค่าถึง 37.01 % เมื่อเปรียบเทียบกับเตาแบบเผาทีละครั้งที่มีอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) เพียง 11.12 % อีกทั้งเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องมีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ภายใน 2.59 ปี ซึ่งเร็วกกว่าเตาแบบเผาทีละครั้งที่ใช้ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ที่นานกว่าถึง 5.86 ปี ซึ่งทำให้มีความเสี่ยงน้อยกว่า

ดังนั้นจากการเปรียบเทียบเกณฑ์ในการตัดสินทั้งมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง พบว่าน่าจะมีความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนมาใช้เตาตั้งขนาดเล็กทดแทนเตาแบบเผาทีละครั้ง และน่าจะมีความเสี่ยงในการลงทุนน้อยกว่า

**3) การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)**

การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) สามารถทำได้โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขครั้งละน้อย เพื่อดูผลกระทบต่อเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจ คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV), อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ตัวแปรที่ให้ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจมากที่สุด ควรได้รับการพิจารณาในรายละเอียดถึงความเหมาะสมของข้อมูล และเงื่อนไขที่กำหนดขึ้น ซึ่งตัวแปรที่นำทำการวิเคราะห์ความไวคือ ราคาขายของปูนขาว เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว ค่าแรงงาน ราคาของหินปูน และราคาของเชื้อเพลิง

โดยตารางที่ 6.7 แสดงการวิเคราะห์ความไวของราคาขายของปูนขาวและต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง และรูปที่ 6.5 เป็นกราฟวิเคราะห์ความไวรายได้จากการขายปูนขาวและต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง ส่วนตารางที่ 6.8 แสดงการวิเคราะห์ความไวของราคาขายของปูนขาวและต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้ง และรูปที่ 6.6 เป็นกราฟวิเคราะห์ความไวรายได้จากการขายปูนขาวและต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้ง

จากการวิเคราะห์ความไวของของราคาขายของปูนขาวและต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (ตารางที่ 6.7) พบว่า ตัวแปรที่มีความไวที่สุดคือ ราคาขายของปูนขาว จึงจำเป็นต้องพิจารณาในด้านนี้เป็นพิเศษ ซึ่งถ้าราคาขายปูนขาวลดลง 15 % จะทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) มีค่าเป็นลบ (- 220,870.40 บาท) และมีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ถึง 9.07 ปี นั่นคือไม่น่าจะลงทุน ส่วนต้นทุนในการผลิตที่มีความไวที่สุดคือ ราคาของเชื้อเพลิง ซึ่งถ้าเพิ่มขึ้น 15 % จะทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) เหลือเพียง 960,720.34 บาท อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) เหลือเพียง 29.32 % และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) นานถึง 3.15 ปี และต้นทุนที่มีความไวรองลงจากมากไปน้อยคือ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว ราคาของหินปูน ค่าแรงงาน และเงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว ตามลำดับ

ส่วนการวิเคราะห์ความไวของของราคาขายของปูนขาวและต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้ง (ตารางที่ 6.8) พบว่า ตัวแปรที่มีความไวที่สุดคือ ราคาขายของปูนขาว จึงจำเป็นต้องพิจารณาในด้านนี้เป็นพิเศษ ซึ่งถ้าราคาขายปูนขาวลดลง 5 % จะทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) มีค่าเป็นลบ และไม่มีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) นั่นคือขาดทุน ส่วนต้นทุนในการผลิตที่มีความไวที่สุดคือ ราคาของเชื้อเพลิง ซึ่งถ้าเพิ่มขึ้น 5 % จะทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) มีค่าเป็นลบ อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) เหลือเพียง 0.84 % และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) นานถึง 9.55 ปี และถ้าราคาของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นอีก 10 % ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) มีค่า

เป็นลบ และไม่มีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) นั่นคือขาดทุน และต้นทุนที่มีความไวรองลงจากมากไปน้อยคือ ราคาของหินปูน ค่าแรงงานเงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว และค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ความไวของของราคาขายของปูนขาวและต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้งที่พบว่า ราคาของเชื้อเพลิงเป็นต้นทุนในการผลิตที่มีความไวที่สุด ดังนั้นถ้าเตาแบบเผาทีละครั้งยังไม่ปรับปรุงประสิทธิภาพในการใช้พลังงานให้ดีขึ้น เพื่อลดอัตราในการใช้เชื้อเพลิงลง หากราคาของเชื้อเพลิงขึ้น จะทำให้อุตสาหกรรมปูนขาวขนาดเล็กที่ใช้เตาแบบเผาทีละครั้งไม่สามารถอยู่รอดได้ จึงควรที่จะปรับเปลี่ยนมาใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องในการผลิตแทนเตาแบบเผาทีละครั้ง ซึ่งเสียเงินลงทุนเริ่มแรกก่อสร้างเตาปูนขาวไม่แพง (ประมาณ 850,000 บาท) ทำให้ผู้ประกอบการสามารถลงทุนก่อสร้างเพื่อใช้แทนเตาแบบเผาทีละครั้งที่มีอยู่เดิม อีกทั้งมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานที่สูงกว่า จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลงได้มาก จากต้นทุนค่าเชื้อเพลิง 825 บาทต่อตันปูนขาว (ร้อยละ 58.68 ของต้นทุนในการผลิต) เมื่อใช้เตาแบบเผาทีละครั้ง เมื่อเปลี่ยนมาใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง จะเหลือต้นทุนค่าเชื้อเพลิงเพียง 363 บาทต่อตันปูนขาว (ร้อยละ 29.65 ของต้นทุนในการผลิต) สามารถลดค่าใช้จ่ายในด้านนี้ถึง 462 บาทต่อตันปูนขาว (ซึ่งลดลงถึงร้อยละ 56) และจากลักษณะการทำงานของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องมีการป้อนหินปูนสลับชั้นกันระหว่างถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง (Mixed Feed) เข้าไปในเตาปูนขาว ทำให้ถ่านหินเผาไหม้แล้วให้ความร้อนกับหินปูนในแต่ละชั้นโดยตรง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น ทั้งยังลดปัญหาเรื่องมลภาวะทางอากาศ เช่น ลดปัญหาของก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์ ($SO_x$) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากปริมาณการใช้ถ่านหินที่น้อยลง และลดปัญหาของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ 6.7 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของราคาขายของปูนขาวและต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง**

| ราคาขายของปูนขาว | | | |
|---|---|---|---|
| เปลี่ยนแปลง | NPV (บาท) | IRR (%) | Payback Period (ปี) |
| -15 % | - 220,870.40 | 1.82% | 9.07 |
| -10% | 304,522.60 | 15.42% | 4.94 |
| -5 % | 829,915.60 | 26.69% | 3.40 |
| 0 % | 1,355,308.60 | 37.01% | 2.59 |
| 5 % | 1,880,701.60 | 46.85% | 2.09 |
| 10 % | 2,406,094.60 | 56.44% | 1.75 |
| 15 % | 2,931,487.60 | 65.88% | 1.51 |

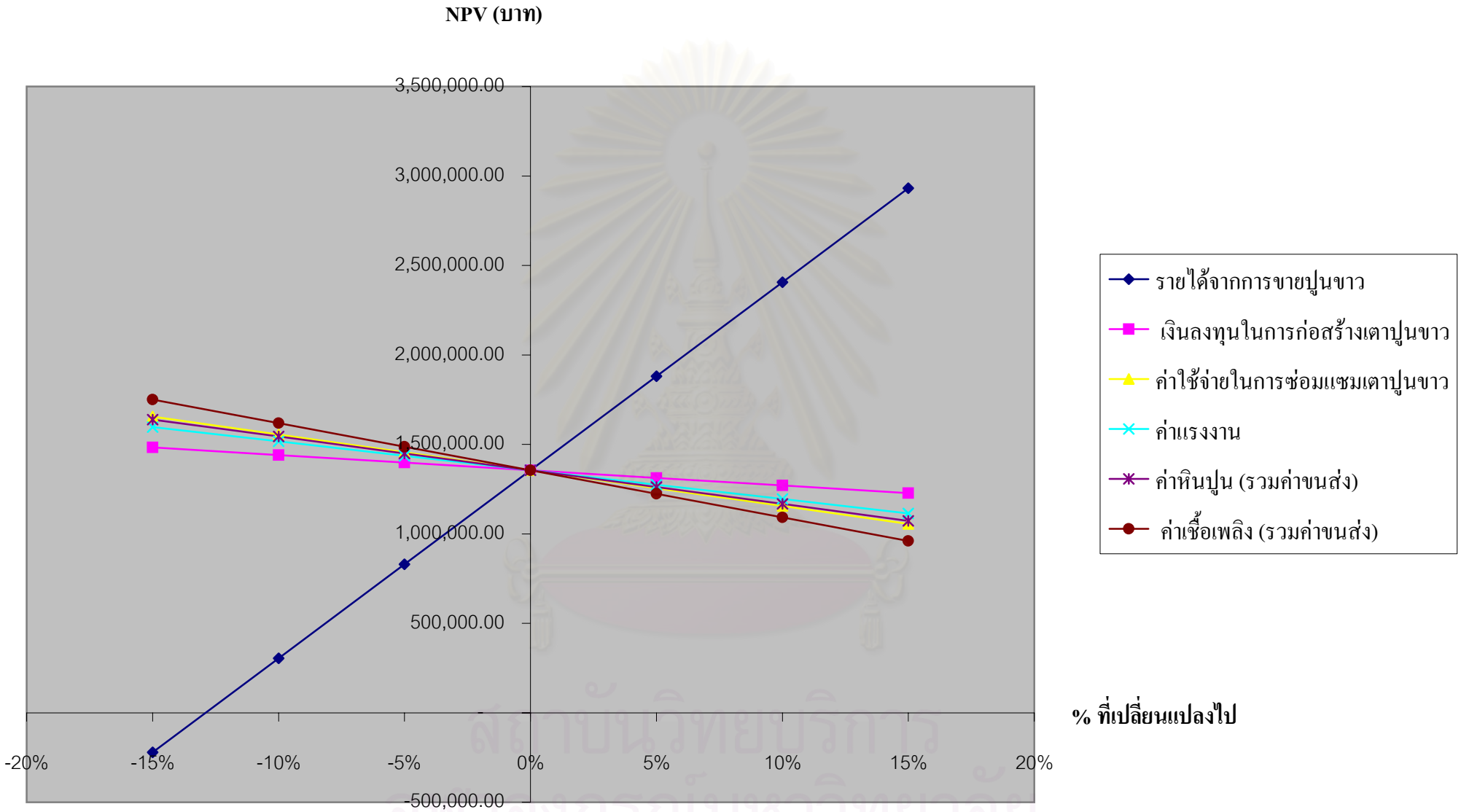
| เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว | | | |
|---|---|---|---|
| เปลี่ยนแปลง | NPV (บาท) | IRR (%) | Payback Period (ปี) |
| -15 % | 1,482,808.60 | 44.33% | 2.20 |
| -10% | 1,440,308.60 | 41.64% | 2.33 |
| -5 % | 1,397,808.60 | 39.21% | 2.46 |
| 0 % | 1,355,308.60 | 37.01% | 2.59 |
| 5 % | 1,312,808.60 | 34.99% | 2.72 |
| 10 % | 1,270,308.60 | 33.14% | 2.84 |
| 15 % | 1,227,808.60 | 31.44% | 2.97 |

| ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว | | | |
|---|---|---|---|
| เปลี่ยนแปลง | NPV (บาท) | IRR (%) | Payback Period (ปี) |
| -15 % | 1,654,742.35 | 42.66% | 2.28 |
| -10% | 1,554,931.10 | 40.79% | 2.37 |
| -5 % | 1,455,119.85 | 38.90% | 2.47 |
| 0 % | 1,355,308.60 | 37.01% | 2.59 |
| 5 % | 1,255,497.35 | 35.09% | 2.71 |
| 10 % | 1,155,686.10 | 33.16% | 2.84 |
| 15 % | 1,055,874.85 | 31.21% | 2.99 |

| ค่าแรงงาน | | | |
|---|---|---|---|
| เปลี่ยนแปลง | NPV (บาท) | IRR (%) | Payback Period (ปี) |
| -15 % | 1,596,868.60 | 41.57% | 2.33 |
| -10% | 1,516,348.60 | 40.06% | 2.41 |
| -5 % | 1,435,828.60 | 38.54% | 2.50 |
| 0 % | 1,355,308.60 | 37.01% | 2.59 |
| 5 % | 1,274,788.60 | 35.46% | 2.68 |
| 10 % | 1,194,268.60 | 33.91% | 2.79 |
| 15 % | 1,113,748.60 | 32.34% | 2.90 |

| ค่าหินปูน (รวมค่าขนส่ง) | | | |
|---|---|---|---|
| เปลี่ยนแปลง | NPV (บาท) | IRR (%) | Payback Period (ปี) |
| -15 % | 1,637,933.80 | 42.34% | 2.29 |
| -10% | 1,543,725.40 | 40.58% | 2.38 |
| -5 % | 1,449,517.00 | 38.80% | 2.48 |
| 0 % | 1,355,308.60 | 37.01% | 2.59 |
| 5 % | 1,261,100.20 | 35.20% | 2.70 |
| 10 % | 1,166,891.60 | 33.38% | 2.83 |
| 15 % | 1,072,683.40 | 31.54% | 2.97 |

| ค่าเชื้อเพลิง (รวมค่าขนส่ง) | | | |
|---|---|---|---|
| เปลี่ยนแปลง | NPV (บาท) | IRR (%) | Payback Period (ปี) |
| -15 % | 1,749,896.86 | 44.43% | 2.19 |
| -10% | 1,618,367.44 | 41.98% | 2.31 |
| -5 % | 1,486,838.02 | 39.50% | 2.44 |
| 0 % | 1,355,308.60 | 37.01% | 2.59 |
| 5 % | 1,223,779.18 | 34.48% | 2.75 |
| 10 % | 1,092,249.76 | 31.92% | 2.94 |
| 15 % | 960,720.34 | 29.32% | 3.15 |




**รูปที่ 6.5 กราฟวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของรายได้จากการขายปูนขาวและต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง**

**ตารางที่ 6.8 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของราคาขายของปูนขาวและต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้ง**

| ราคาขายของปูนขาว | | | |
|---|---|---|---|
| เปลี่ยนแปลง | NPV (บาท) | IRR (%) | Payback Period (ปี) |
| -15 % | -1,642,430.00 | - | - |
| -10% | -1,058,660.00 | - | - |
| -5 % | -478,890.00 | - | - |
| 0 % | 108,880.00 | 11.12% | 5.86 |
| 5 % | 692,650.00 | 25.77% | 3.49 |
| 10 % | 1,276,420.00 | 38.74% | 2.48 |
| 15 % | 1,860,190.00 | 51.03% | 1.93 |

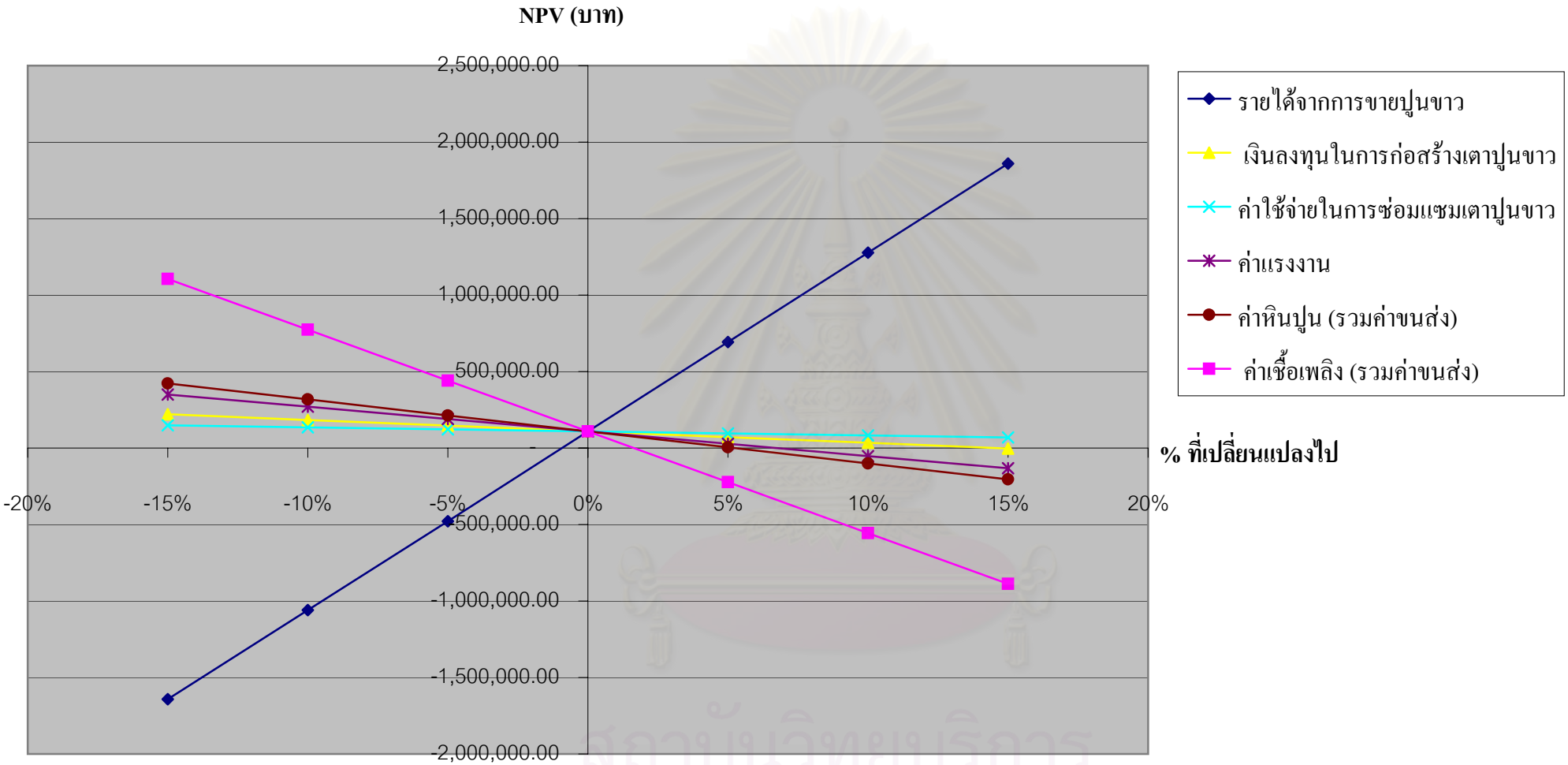
| เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว | | | |
|---|---|---|---|
| เปลี่ยนแปลง | NPV (บาท) | IRR (%) | Payback Period (ปี) |
| -15 % | 221,380.00 | 15.20% | 4.98 |
| -10% | 183,880.00 | 13.72% | 5.27 |
| -5 % | 146,380.00 | 12.37% | 5.57 |
| 0 % | 108,880.00 | 11.12% | 5.86 |
| 5 % | 71,380.00 | 9.97% | 6.15 |
| 10 % | 33,880.00 | 8.90% | 6.45 |
| 15 % | -3,620.00 | 7.91% | 7.91 |

| ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว | | | |
|---|---|---|---|
| เปลี่ยนแปลง | NPV (บาท) | IRR (%) | Payback Period (ปี) |
| -15 % | 149,140.00 | 12.23% | 5.60 |
| -10% | 135,720.00 | 11.86% | 5.68 |
| -5 % | 122,300.00 | 11.49% | 5.77 |
| 0 % | 108,880.00 | 11.12% | 5.86 |
| 5 % | 95,460.00 | 10.75% | 5.95 |
| 10 % | 82,040.00 | 10.37% | 6.05 |
| 15 % | 68,620.00 | 9.99% | 6.15 |

| ค่าแรงงาน | | | |
|---|---|---|---|
| เปลี่ยนแปลง | NPV (บาท) | IRR (%) | Payback Period (ปี) |
| -15 % | 350,440.00 | 17.51% | 4.57 |
| -10% | 269,920.00 | 15.45% | 4.93 |
| -5 % | 189,400.00 | 13.32% | 5.36 |
| 0 % | 108,880.00 | 11.12% | 5.86 |
| 5 % | 28,360.00 | 8.83% | 6.47 |
| 10 % | -52,160.00 | 6.43% | 7.21 |
| 15 % | -132,680.00 | 3.90% | 8.15 |

| ค่าหินปูน (รวมค่าขนส่ง) | | | |
|---|---|---|---|
| เปลี่ยนแปลง | NPV (บาท) | IRR (%) | Payback Period (ปี) |
| -15 % | 422,908.00 | 19.32% | 4.29 |
| -10% | 318,232.00 | 16.69% | 4.71 |
| -5 % | 213,556.00 | 13.97% | 5.22 |
| 0 % | 108,880.00 | 11.12% | 5.86 |
| 5 % | 4,204.00 | 8.12% | 6.67 |
| 10 % | -100,472.00 | 4.93% | 7.75 |
| 15 % | -205,148.00 | 1.47% | 9.24 |

| ค่าเชื้อเพลิง (รวมค่าขนส่ง) | | | |
|---|---|---|---|
| เปลี่ยนแปลง | NPV (บาท) | IRR (%) | Payback Period (ปี) |
| -15 % | 1,105,315.00 | 35.04% | 2.71 |
| -10% | 773,170.00 | 27.63% | 3.30 |
| -5 % | 441,025.00 | 19.77% | 4.23 |
| 0 % | 108,880.00 | 11.12% | 5.86 |
| 5 % | -223,265.00 | 0.84% | 9.55 |
| 10 % | -555,410.00 | - | - |
| 15 % | -887,555.00 | - | - |




**รูปที่ 6.6 กราฟวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของรายได้จากการขายปูนขาวและต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้ง**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 7

# สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

## 7.1 สรุปผลการวิจัย

อุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทยพบว่า ส่วนใหญ่จะเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กถึงกลาง จะมีกำลังการผลิตไม่สูงนัก (กำลังการผลิตปูนสุกไม่เกิน 10,000 ตันต่อปี) ซึ่งใช้เตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบทางวิศวกรรม และทางการเงินของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย (แสดงไว้ในบทที่ 4) พบว่ามีข้อได้เปรียบในเรื่องของ เงินลงทุนเริ่มแรกในการก่อสร้างเตาปูนขาวที่ไม่สูง และเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนทำให้ง่ายในการก่อสร้างเตาปูนขาว การควบคุมเตาปูนขาวไม่จำเป็นต้องใช้คนงานที่มีทักษะสูง แต่จะพบว่าประสิทธิภาพของเตาปูนขาวประเภทนี้มีค่าต่ำมาก เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนมาก ทำให้สิ้นเปลืองการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งกระบวนการผลิตปูนขาวจะพบว่าร้อยละ 58.68 ของต้นทุนในการผลิต (825 บาทต่อตันปูนขาว) จะเป็นค่าใช้จ่ายในด้านเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงทำให้ต้นทุนในการผลิตนั้นสูง ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่สำหรับผู้ประกอบการ เพื่อแก้ปัญหานี้จึงน่าจะมีความเป็นไปได้ในการสร้างประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและอัตราการใช้เชื้อเพลิงให้ดีขึ้น โดยทำการเปลี่ยนมาใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Continuous Vertical Shaft Kiln) ทดแทนเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีเตาปูนขาวที่ยังไม่มีผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทยนำมาใช้เหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่มีกำลังการผลิตที่ไม่สูงนัก โดยลักษณะเป็นเตาแบบเผาต่อเนื่อง (Continuous Kiln) ที่มีการป้อนหินปูนสลับชั้นกันระหว่างถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง (Mixed Feed) เข้าไปในเตาปูนขาว ทำให้ถ่านหินเผาไหม้แล้วให้ความร้อนกับหินปูนในแต่ละชั้นโดยตรงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้ดีขึ้น

การวิเคราะห์ความเป็นได้ทางวิศวกรรมของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องพบว่า พลังงานที่ใส่เข้าไป (Energy Input) ในการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัมของเตาแบบเผาทีละครั้งจะใช้มากกว่าเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องถึง 7.90 MJ ทำให้สิ้นเปลืองปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ ซึ่งสาเหตุเกิดจากมีพลังงานที่สูญเสียในกระบวนการผลิต (Energy Loss) มาก เนื่องจากปัญหาประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาแบบเผาทีละครั้งที่มีค่าต่ำมาก โดยเฉพาะพลังงานที่สูญเสียไปกับก๊าซที่ถูกปล่อยจากเตาปูนขาวในกระบวนการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัมของเตาแบบเผาทีละครั้งจะใช้มากกว่าเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องถึง 4.38 MJ เนื่องจากระบบการเผาของเตาแบบเผาทีละครั้งเป็นระบบเปิดทำให้ความร้อนออกมาพร้อมกับก๊าซถูกปล่อยจากเตาปูนขาวมาก ส่วนเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องจะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน 2 อย่างคือ หินปูนที่อยู่ด้านบนสุดของเตาปูนขาวจะถูกอุ่นให้ร้อน

โดยความร้อนที่ได้จากอากาศที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตและอากาศที่เข้าสู่ด้านล่างของเตาปูนขาวได้รับความร้อนการทำให้เย็นตัว (Cooling Zone) ก่อนเข้าสู่การเผาหินปูน (Calcining Zone) จะลอยขึ้นด้านบนสุดของเตาปูนขาว จึงทำให้ความร้อนออกมาพร้อมกับก๊าซถูกปล่อยจากเตาปูนขาวน้อยกว่าเตาแบบเผาทีละครั้ง

ส่วนอัตราการใช้พลังงาน และประสิทธิภาพในการใช้พลังงานระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้ง เมื่อใช้เชื้อเพลิงที่เป็นถ่านหินลิกไนต์ที่มีค่าความร้อน (Heating Value) เท่ากันคือ 5,100 kcal/kg จะพบว่า อัตราการใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตของเตาแบบเผาทีละครั้ง (750 กิโลกรัมต่อตันปูนสุก) เมื่อเปรียบเทียบกับเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (330 กิโลกรัมต่อตันปูนสุก) จะมากกว่าถึง 420 กิโลกรัมต่อตันปูนสุก (ซึ่งมากกว่าถึงร้อยละ 56) ทำให้พลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนสุก 1 กิโลกรัมของเตาแบบเผาทีละครั้ง (3,825 kcal) เมื่อเปรียบเทียบกับเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (1,683 kcal)จะมากกว่า ถึง 2,142 kcal (ซึ่งมากกว่าถึงร้อยละ 56) และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องน่าจะมีที่ดีกว่าเตาแบบเผาทีละครั้งถึงร้อยละ 56

จากการเปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิคระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้งจะพบว่า ขนาดของหินปูนที่ใช้ในการผลิตจะพบว่า เตาแบบเผาทีละครั้งจะใช้หินปูนที่มีขนาดใหญ่กว่าเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง ในเรื่องของคุณภาพของปูนสุกที่ได้จากเตาแบบเผาทีละครั้งเป็นปูนสุกแบบสุกมาก (Hard Burn) เนื่องจากความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของถ่านหินไม่สามารถกระจายไปด้านบนได้อย่างทั่วถึง ส่งผลทำให้ปูนสุกที่ได้ส่วนใหญ่ซึ่งอยู่ด้านล่างเป็นปูนสุกแบบสุกมาก (Hard Burn) ส่วนปูนสุกที่อยู่ด้านบนจะเป็นแบบยังไม่สุก (Underburnt) ส่วนเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องจะเป็นปูนสุกแบบสุกมาก (Hard Burn) แต่คุณภาพสม่ำเสมอ และจะพบว่าปูนสุกที่ได้จะมีเถ้า (Ash) ปนอยู่ด้วย จึงต้องทำการร่อนเถ้าที่ติดอยู่ออก หรืออาจจะใช้ถ่านหินที่มีส่วนประกอบของเถ้าอยู่น้อย

การวิเคราะห์ความเป็นได้ทางการเงินของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องพบว่า ต้นทุนการผลิตของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง 1,224.38 บาทต่อตันปูนขาว และเตาแบบเผาทีละครั้งมีต้นทุนการผลิต 1,405.83 บาต่อตันปูนขาว เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องมีต้นทุนในการผลิตต่อหน่วยน้อยกว่าเตาแบบเผาทีละครั้ง 181.45 บาทโดยเฉพาะค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงพบว่า โดยเมื่อเทียบกับเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องพบว่า ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงในการผลิตปูนสุก 1 ตัน สามารถลดค่าใช้จ่ายในด้านนี้ถึง 462 บาทต่อตันปูนขาว (ซึ่งลดลงถึงร้อยละ 56) ส่วนการเปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจระหว่างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องกับเตาแบบเผาทีละครั้งพบว่า เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องมีเกณฑ์ในการตัดสินใจคือมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) 1,355,308.60 บาท และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) 37.01 % อีกทั้งมีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) 2.59 ปี เมื่อเทียบกับเตาแบบเผาทีละครั้ง จะมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present

Value: NPV) 108,880.00 บาท อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) 11.12 % และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) 5.86 ปี ดังนั้นจากเกณฑ์ในการตัดสินใจที่เปรียบเทียบเหล่านี้ จึงทำให้มีความเป็นไปได้ในการนำเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องมาใช้ทดแทนเตาแบบเผาทีละครั้ง ซึ่งทำให้มีความเสี่ยงน้อยกว่า

จากการวิเคราะห์ความไวของของราคาขายของปูนขาวและต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง พบว่า ตัวแปรที่มีความไวที่สุดคือ ราคาขายของปูนขาว จึงจำเป็นต้องพิจารณาในด้านนี้เป็นพิเศษ ซึ่งถ้าราคาขายปูนขาวลดลง 15 % จะทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) มีค่าเป็นลบ (-220,870.40 บาท) และมีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ถึง 9.07 ปี นั่นคือไม่น่าจะลงทุน ส่วนต้นทุนในการผลิตที่มีความไวที่สุดคือ ราคาของเชื้อเพลิง ซึ่งถ้าเพิ่มขึ้น 15 % จะทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) เหลือเพียง 960,720.34 บาท อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) เหลือเพียง 29.32 % และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) นานถึง 3.15 ปี และต้นทุนที่มีความไวรองลงมาจากมากไปน้อยคือ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว ราคาของหินปูน ค่าแรงงาน และเงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว ตามลำดับ

ส่วนการวิเคราะห์ความไวของของราคาขายของปูนขาวและต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้ง (ตารางที่ 6.8) พบว่า ตัวแปรที่มีความไวที่สุดคือ ราคาขายของปูนขาว จึงจำเป็นต้องพิจารณาในด้านนี้เป็นพิเศษ ซึ่งถ้าราคาขายปูนขาวลดลง 5 % จะทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) มีค่าเป็นลบ และไม่มีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) นั่นคือขาดทุน ส่วนต้นทุนในการผลิตที่มีความไวที่สุดคือ ราคาของเชื้อเพลิง ซึ่งถ้าเพิ่มขึ้น 5 % จะทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) มีค่าเป็นลบ อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) เหลือเพียง 0.84 % และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) นานถึง 9.55 ปี และถ้าราคาของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นอีก 10 % ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) มีค่าเป็นลบ และไม่มีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) นั่นคือขาดทุน และต้นทุนที่มีความไวรองลงจากมากไปน้อยคือ ราคาของหินปูน ค่าแรงงานเงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว และค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ความไวของของราคาขายของปูนขาวและต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้งที่พบว่า ราคาของเชื้อเพลิงเป็นต้นทุนในการผลิตที่มีความไวที่สุด ดังนั้นถ้าเตาแบบเผาทีละครั้งยังไม่ปรับปรุงประสิทธิภาพในการใช้พลังงานให้ดีขึ้น เพื่อลดอัตราในการใช้เชื้อเพลิงลง หากราคาของเชื้อเพลิงขึ้น จะทำให้อุตสาหกรรมปูนขาวขนาดเล็กที่ใช้เตาแบบเผาทีละครั้งไม่สามารถอยู่รอดได้ จึงควรที่จะปรับเปลี่ยนมาใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องในการผลิตแทนเตาแบบเผาทีละครั้ง ซึ่งเสียเงินลงทุนเริ่มแรกก่อสร้างเตาปูนขาวไม่แพง (ประมาณ 850,000 บาท) ทำให้ผู้ประกอบการสามารถลงทุนก่อสร้างเพื่อใช้แทนเตาแบบเผาทีละครั้งที่มีอยู่เดิม อีกทั้งพบว่า

ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานที่สูงกว่า จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลงได้มากจากต้นทุนค่าเชื้อเพลิง 825 บาทต่อตันปูนขาว (ร้อยละ 58.68 ของต้นทุนในการผลิต) เมื่อใช้เตาแบบเผาทีละครั้ง เมื่อเปลี่ยนมาใช้เตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง จะเหลือต้นทุนค่าเชื้อเพลิงเพียง 363 บาทต่อตันปูนขาว (ร้อยละ 29.65 ของต้นทุนในการผลิต) สามารถลดค่าใช้จ่ายในด้านนี้ถึง 462 บาทต่อตันปูนขาว (ซึ่งลดลงถึงร้อยละ 56)

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

จากลักษณะการทำงานของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องมีการป้อนหินปูนสลับชั้นกันระหว่างถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง (Mixed Feed) เข้าไปในเตาปูนขาว ทำให้ถ่านหินเผาไหม้แล้วจะให้ความร้อนกับหินปูนในแต่ละชั้นโดยตรง ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น ทั้งยังลดปัญหาเรื่องมลภาวะทางอากาศ เช่น ลดปัญหาของก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์ ($SO_x$) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากปริมาณการใช้ถ่านหินที่น้อยลง และลดปัญหาของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) แต่จะพบว่าปูนสุกที่ได้จะมีเถ้า (Ash) ปนอยู่ด้วย จึงต้องทำการร่อนเถ้าที่ติดอยู่ออก หรืออาจจะใช้ถ่านหินที่มีส่วนประกอบของเถ้าอยู่น้อย

จากปัญหาและอุปสรรคสำคัญคือ ค่าเชื้อเพลิงสำหรับอุตสาหกรรมปูนขาวที่ปรับตัวสูงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ สวนทางกับเศรษฐกิจของโลกที่ตกต่ำดังกล่าวข้างต้น จึงควรมีการใช้เทคโนโลยีในการผลิตก๊าซจากถ่านหิน (Coal Gasification) มาใช้ประโยชน์ ซึ่งอาจจะเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน โดยเทคโนโลยีของการผลิตก๊าซจากถ่านหิน (Coal Gasification) สามารถประยุกต์ใช้กับถ่านหินที่มีค่าความร้อนที่แตกต่างกันตามแหล่งต่าง ๆ ได้ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาหินปูน (Calcination) ใช้ตั้งแต่ 1,000 – 1,200$^0$C ตามช่วงการใช้งานที่แตกต่างกันก๊าซที่ผลิตได้จากถ่านหิน การควบคุมการเผาไหม้จะมีประสิทธิภาพดีขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้ลดต้นทุนในการผลิตได้ ดังนั้นจึงมีการศึกษาการจากถ่านหิน (Coal Gasification) เพื่อนำมาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตปูนขาวต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# รายการอ้างอิง


**ภาษาไทย**

พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรม. การศึกษาความเหมาะสมการใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดในโรงงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร, 2547.

โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. ทำเนียบผู้ประกอบการ ประเภทอุตสาหกรรมการทำซีเมนต์ ปูนขาว หรือปูนปลาสเตอร์, 2546. แหล่งที่มา : http://www.oie.go.th [14 มีนาคม 2546].

อุตสาหกรรม, กระทรวง. มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 202 เล่ม 1-2522. กรุงเทพมหานคร, 2522.

**ภาษาอังกฤษ**

Agevi, E., Ruskulis, O. and Schilderman, T. Lime and Alternative Binders in East Africa. London: Intermediate Technology Publications, 1995.

Azbe, V. J. ASTM Symposium on Lime. (n.p.): National Lime Association, 1939.

Azbe, V. J. Rock Production. (n.p.): National Lime Association, 1944.

Azbe, V. J. Theory and Practice of Lime Manufacture. (n.p.): National Lime Association, 1953.

Barriga, A., et al. Brick and Lime Kilns in Ecuador : An Example of Woodfuel Use in Third World Small-Scale Industry. (n.p.): SEI, 1992.

Boynton, R. S. Chemistry and Technology of Lime and Limestone. New York: John Wiley & Sons., 1980.

Bush, A. Balaka Lime Kiln: Report of Trials Conducted in April 1989. London: Intermediate Technology Publications, June 1989.

Cartmel, P. UK Lime Plant 1 : British Steel's Shapfell Plant. (n.p.): World Cement, June 1994.

Cengel, Y. A. Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer. New York: International Edition. McGraw-Hill, 1997.

Dankers, A. Energy Use in Thai Lime Industries: A Study on Energy Conservation Opportunities in Central Region Lime Industries in Thailand. (n.p.):, August 1992.

Environment Agency. Integrated Pollution Prevention and Control (IPCC) Guidance for the Cement and Lime Sector. Available from : http://www.environment-agengy.gov.uk [25 January 2003].

Gibbs, R. Thermodynamics of Lime Manufacture. (n.p.): Rock Products, 1950.

# รายการอ้างอิง (ต่อ)

Harrison, D. J. Industrial Minerals Laboratory Manual Limestone. Nottingham: Technical Report WG/92/29 British Geological Survey, 1992.

Hedin, R. Changes Occurring in the Limestone During Heating Before Carbonation. (n.p.): Swed. Cem. Conc. Res. Inst. Bull., 1954.

Linzell, H. K., et al. Lime: The Loss in Weight of Limestone as a Function of Time and Temperature of Burning. (n.p.): Proc. Am. Inst. Chem. Eng., 1926.

Mason, K. Lime Technologies Research Project: Literature Review. London: ITDG Report, April 1996.

Mason, K. The Small-Scale Vertical Shaft Kiln: A Practical Guide to Design Construction and Operation. London: Intermediate Technology Publications, 1997.

Murray, J. A. J. Am. Ceram. Soc. (n.p.): National Lime Association, 1954.

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

Nhachi, P. The Lime Industry in Zimbabwe: Lime and Other Alternative Cements. (n.p.): Ed. Neville Hill IT Publications, 1992.

Searle, A. B. Limestone and Its Products. (n.p.): Ernest Benn Ltd., 1935.

Spence, R. Lime in Industrial Development: A UNIDO Guide and Manufacture in Developing Country. (n.p.): Intermediate Technology Consultant: UNIDO, 1985.

Spiropoulos, J. Small Scale Production of Lime. (n.p.): Friedr. Vieweg & Sonh Braunschweig, 1985.

Spiropoulos, J. Chenkumbi Lime Fuel-Efficient High-Quality Production. London: Intermediate Technology Publications, 1992.

Stanley, J. L. Industrial Minerals and Rocks. New York: Society of Mining Engineer., 1983.

Stevens, C. and Mason, K. How to Build a Small Intermittent Lime Kiln : An Example of an Inexpensive Versatile Kiln from Malawi. London: IT Technical Brief, 1998.

Taggart, A. F. Handbook of Mineral Dressing. New York: John Wiley & Sons., 1945.

White, J. E. Lime Manufacture. London: Intermediate Technology Publications, 1981.

Wingate, M. Small-Scale Lime Burning: A Practical Introduction. London: Intermediate Technology Publications, 1988.

# ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ก

# รายชื่อของโรงงานปูนขาวในประเทศไทย

**ตารางที่ ก.1 รายชื่อของโรงงานปูนขาวในประเทศไทย**

| ลำดับที่ | โรงงาน | จังหวัด | กำลังการผลิต (ตัน/ปี) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง |
|---|---|---|---|---|
| 1. | หจก. เกษมปูนมาร์ลและปูนขาว | สระบุรี | 2,000 | |
| 2. | โรงงานสิริโสภาเคมีคอล | สระบุรี | 320 | |
| 3. | โรงงานปูนขาวสมเจริญ | สระบุรี | 1,600 | ถ่านหิน 2,000 ตัน/ปี |
| 4. | หจก. ฮงธงชัยปูนขาวสระบุรี | สระบุรี | 2,520 | ถ่านหิน 3,600 ตัน/ปี |
| 5. | หจก. ฮงธงชัยปูนขาวสระบุรี 2 | สระบุรี | 1,260 | ถ่านหิน 1,800 ตัน/ปี |
| 6. | โรงงานโค้วเจริญ | สระบุรี | 1,200 | |
| 7. | บริษัท รุ่งอรุณศิลา จำกัด | สระบุรี | 5,000 | ถ่านหิน 7,200 ตัน/ปี |
| 8. | บริษัท ศิลาทิพย์สระบุรี จำกัด | สระบุรี | 2,400 | ถ่านหิน 3,400 ตัน/ปี |
| 9. | หจก. เอกทวีคูณ | สระบุรี | 8,000 | |
| 10. | โรงงานพงษ์เพชรอุตสาหกรรมปูนขาว | สระบุรี | 3,600 | |
| 11. | บริษัท สระบุรีเคมิคอลไลม์ จำกัด | สระบุรี | 5,000 | |
| 12. | โรงงานปูนขาวภิรดี | สระบุรี | 1,164 | ถ่านหิน 1,400 ตัน/ปี |
| 13. | โรงงานปูนขาวพรพันธ์ | สระบุรี | 1,920 | ถ่านหิน 2,400 ตัน/ปี |
| 14. | โรงงานสุรพลพานิช 1 | สระบุรี | 8,400 | ถ่านหิน 9,200 ตัน/ปี |
| 15. | โรงงานสุรพลพานิช 2 | สระบุรี | 2,520 | ถ่านหิน 3,600 ตัน/ปี |
| 16. | บริษัท ไทยไฮเดรเตทไลม์ จำกัด | สระบุรี | 18,000 | น้ำมันเตา 576,000 ลิตร/ปี |
| 17. | โรงงานสัมพันธ์ | สระบุรี | 6,000 | |
| 18. | โรงงานศรีโสภา | สระบุรี | 1,200 | |
| 19. | บริษัท สระบุรีปูนขาว จำกัด | สระบุรี | 3,150 | |
| 20. | หจก. ศรีแสงไทยสระบุรี | สระบุรี | 2,400 | ถ่านหิน 6,000 ตัน/ปี |
| 21. | นาย สุรินทร์ อยู่เป็นหลัก | สระบุรี | 1,520 | ถ่านหิน 2,000 ตัน/ปี |
| 22. | บริษัท ศิลาสานนท์ จำกัด | สระบุรี | 4,2000 | |
| 23. | นาง ประยูร พุทธพนม | สระบุรี | 1,240 | ถ่านหิน 1,320 ตัน/ปี |

ที่มา : ข้อมูลมาดัดแปลงจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2546

**ตารางที่ ก.1 รายชื่อของโรงงานปูนขาวในประเทศไทย (ต่อ)**

| ลำดับที่ | โรงงาน | จังหวัด | กำลังการผลิต (ตัน/ปี) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง |
|---|---|---|---|---|
| 24. | หจก. ปูนขาวลือพงษ์สระบุรี | สระบุรี | 1,080 | |
| 25. | บริษัท ไลม์มาสเตอร์ จำกัด | สระบุรี | 54,000 | |
| 26. | นาย อ่อง จิระกิจ | สระบุรี | 360 | |
| 27. | โรงงานศรีชัยพานิช | สระบุรี | 200 | ถ่านหิน 350 ตัน/ปี |
| 28. | นาง สำราญ เอี่ยมง้วน | สระบุรี | 840 | ถ่านหิน 960 ตัน/ปี |
| 29. | หจก. ชุมแพอุตสาหกรรมปูนขาว | สระบุรี | 2,400 | |
| 30. | บริษัท สยามผลิตภัณฑ์ปูนขาว จำกัด | สระบุรี | 6,800 | |
| 31. | บริษัท กรุงเทพ ซี.เอ.โอ. จำกัด | สระบุรี | 8,400 | |
| 32. | โรงงานเนรมิตปูนขาว | ราชบุรี | 1,200 | ถ่านหิน 1,920 ตัน/ปี |
| 33. | โรงงานอำนวยลาภ | ราชบุรี | 420 | |
| 34. | นาง เจริญศรี วงศ์พินิจวโรดม | ราชบุรี | 500 | ถ่านหิน 680 ตัน/ปี |
| 35. | นาย ศรีชัย ศรีภิรมย์รักษ์ | ราชบุรี | 1,200 | ถ่านหิน 1,980 ตัน/ปี |
| 36. | นาง ทิพภาภรณ์ อาศนสุวรรณ | ราชบุรี | 350 | |
| 37. | หจก. ปูนขาวศรสุพรชัย 1992 | ราชบุรี | 840 | ถ่านหิน 1,400 ตัน/ปี |
| 38. | นาง เทพรัตน์ อินทรบุตร | ราชบุรี | 800 | ถ่านหิน 1,000 ตัน/ปี |
| 39. | โรงงานราชบุรีปูนขาว | ราชบุรี | 660 | |
| 40. | บริษัท แอล.เอส.เอ็ม (1999) จำกัด | ราชบุรี | 3,600 | ถ่านหิน 2,700 ตัน/ปี |
| 41. | นางสาว จงกล กันนิกา | ราชบุรี | 300 | |
| 42. | โรงงานศรีอุดมชัย | ราชบุรี | 800 | ถ่านหิน 1,200 ตัน/ปี |
| 43. | โรงงานสำราญการค้า | ราชบุรี | 700 | ถ่านหิน 1,000 ตัน/ปี |
| 44. | นาง ศิริเพ็ญ สุดแสนสง่า | ราชบุรี | 320 | |
| 45. | โรงงานบุญประเสริฐ | ราชบุรี | 660 | ถ่านหิน 720 ตัน/ปี |
| 46. | โรงงานปูนขาวธงชัยการค้า | ราชบุรี | 500 | |
| 47. | นาย เกรียงศักดิ์ บูรณสิน | ราชบุรี | 450 | ถ่านหิน 520 ตัน/ปี |
| 48. | โรงงานปูนขาวยกยอด | ราชบุรี | 2,500 | ถ่านหิน 3,200 ตัน/ปี |
| 49. | หจก. ราชบุรีปูนขาวผาเอก | ราชบุรี | 2,000 | |
| 50. | โรงงาน ส. รัตนเสนีย์ | ราชบุรี | 450 | |
| 51. | โรงงานศิริชัย | ราชบุรี | 240 | |

ที่มา : ข้อมูลมาดัดแปลงจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2546

**ตารางที่ ก.1 รายชื่อของโรงงานปูนขาวในประเทศไทย (ต่อ)**

| ลำดับที่ | โรงงาน | จังหวัด | กำลังการผลิต (ตัน/ปี) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง |
|---|---|---|---|---|
| 52. | โรงงานอารีย์รัตน์ | ราชบุรี | 120 | |
| 53. | โรงงานปูนขาวพรประเสริฐ | ราชบุรี | 330 | |
| 54. | โรงงานชัยชนะ | ราชบุรี | 800 | ถ่านหิน 1,000 ตัน/ปี |
| 55. | บริษัท ไทยสถาปนา จำกัด | ราชบุรี | 6,000 | ถ่านหิน 4,800 ตัน/ปี |
| 56. | นาง ตี่ แซ่ฉัน | ราชบุรี | 180 | |
| 57. | นาง เทียบ วานิชกุล | ราชบุรี | 1,440 | |
| 58. | นาย พร องอาจ | ราชบุรี | 400 | ถ่านหิน 600 ตัน/ปี |
| 59. | นาย ถาวร สินสมุทร | ราชบุรี | 600 | ถ่านหิน 720 ตัน/ปี |
| 60. | นาย เจริญ พรหมมนัส | ราชบุรี | 360 | ถ่านหิน 600 ตัน/ปี |
| 61. | โรงงานเจริญปูนขาว | ราชบุรี | 700 | ถ่านหิน 960 ตัน/ปี |
| 62. | บริษัท อัญชนา จำกัด | ราชบุรี | 3,200 | |
| 63. | โรงงานพรศิริชัย | ราชบุรี | 600 | |
| 64. | บริษัท ปูนคุณภาพ จำกัด | ลพบุรี | 58,000 | น้ำมันเตา 7,560,000 ลิตร/ปี |
| 65. | หจก. ศิลาแผ่นดินทองเขาตำบล | ลพบุรี | 780 | ถ่านหิน 980 ตัน/ปี |
| 66. | โรงงานเขาตำบลปูนขาว | ลพบุรี | 550 | ถ่านหิน 680 ตัน/ปี |
| 67. | หจก. ศิลานิยม | ลพบุรี | 450 | ถ่านหิน 560 ตัน/ปี |
| 68. | โรงงานไทยแสงสิน | สมุทรสาคร | 150 | |
| 69. | โรงงานปูนสวนอุตสาหกรรม | สมุทรสาคร | 1,000 | |
| 70. | โรงงานรุ่งวนิช | สมุทรสาคร | 360 | |
| 71. | โรงงานปูนขาวนำชัย | สมุทรสาคร | 760 | |
| 72. | นางสาว ไพลิน มงคลสุวรรณ | สมุทรสงคราม | 300 | |
| 73. | โรงงงานส. โชคกิตติศักดิ์ | เพชรบุรี | 130 | |
| 74. | โรงงานปูนขาวโชคพูนผล | ชลบุรี | 360 | ถ่านหิน 640 ตัน/ปี |
| 75. | นาง สุรีย์ ทองแดง | ชลบุรี | 1,800 | |
| 76. | บริษัท อโศกเคมีคอล จำกัด | นครราชสีมา | 240,000 | ถ่านหิน 15,000 ตัน/ปี |
| 77. | บริษัท สายจำรัสปูนขาว จำกัด | นครราชสีมา | 7,000 | |
| 78. | โรงงานปูนขาวแม่เลี่ยงกี่ | พังงา | 336 | ฟืน 576 ลบ.ม./ปี |
| 79. | นาง สองค์ รักษา | พังงา | 3,600 | ฟืน 1,200 ลบ.ม./ปี |

ที่มา : ข้อมูลมาดัดแปลงจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2546

**ตารางที่ ก.1 รายชื่อของโรงงานปูนขาวในประเทศไทย (ต่อ)**

| ลำดับที่ | โรงงาน | จังหวัด | กำลังการผลิต (ตัน/ปี) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง |
|---|---|---|---|---|
| 80. | โรงงานปิยะพลอุตสาหกรรม | พังงา | 1,750 | ถ่านหิน 2,400 ตัน/ปี |
| 81. | โรงงานอรุณปูนขาว | พังงา | 200 | ฟืน 100 ลบ.ม./ปี |
| 82. | โรงงานปูนขาวเทพบำรุง | พังงา | 240 | ฟืน 120 ลบ.ม./ปี |
| 83. | โรงงานปูนขาวเขาทะลุ | พังงา | 600 | |
| 84. | นาย ชัยวัฒน์ บำรุง | พังงา | 240 | |
| 85. | นาย อดิศัย ภูสุวรรณ | พังงา | 150 | ฟืน 450 ลบ.ม./ปี |
| 86. | โรงงานปูนขาวปิยะผล | พังงา | 1,750 | |
| 87. | นาง พยอม โพธิ์น้อยงาม | พังงา | 200 | ฟืน 100 ลบ.ม./ปี |
| 88. | นาย สุพจน์ ศรีพรหม | พังงา | 600 | |
| 89. | โรงงานสหมิตรปูนขาว | พังงา | 140 | ฟืน 1,800 ลบ.ม./ปี |
| 90. | นางสาว ไพรัตน์ ศรีจันทร์ | นครศรีธรรมราช | 220 | ฟืน 1,500 ลบ.ม./ปี |
| 91. | นาย น้อย ปานแก้ว | นครศรีธรรมราช | 420 | ฟืน 2,440 ลบ.ม./ปี |
| 92. | โรงงานปูนขาวรัญเสวะ | นครศรีธรรมราช | 720 | |
| 93. | โรงงานปูนขาวเขาหมาก | นครศรีธรรมราช | 420 | |
| 94. | โรงงานสินสมทรง | นครศรีธรรมราช | 450 | ฟืน 900 ลบ.ม./ปี |
| 95. | นาย ประยูร สุวรรณรัตน์ | นครศรีธรรมราช | 420 | ฟืน 1,440 ลบ.ม./ปี |
| 96. | โรงงานโชคอนันต์ | นครศรีธรรมราช | 720 | |
| 97. | นาย สวาสดิ์ ตันติวัฒนสิทธิ์ | นครศรีธรรมราช | 180 | |
| 98. | โรงงานปูนขาวสี่พี่น้อง | นครศรีธรรมราช | 540 | |
| 99. | โรงงานปูนขาวสี่พี่น้อง 2 | นครศรีธรรมราช | 1,000 | ฟืน 1,800 ลบ.ม./ปี |
| 100. | โรงงานปูนขาวสี่พี่น้อง 3 | นครศรีธรรมราช | 900 | ฟืน 1,720 ลบ.ม./ปี |
| 101. | นาย สง่า สุขยืน | นครศรีธรรมราช | 330 | ฟืน 8400 ลบ.ม./ปี |
| 102. | โรงงานปูนขาวสามร้อยกล้า | นครศรีธรรมราช | 960 | |
| 103. | โรงงานทรัพย์สุนทร | นครศรีธรรมราช | 1,200 | ฟืน 4,200 ลบ.ม./ปี |
| 104. | โรงงานศุภรัตน์ 1 | นครศรีธรรมราช | 720 | |
| 105. | โรงงานศุภรัตน์ 2 | นครศรีธรรมราช | 720 | |
| 106. | โรงงานศุภรัตน์ 3 | นครศรีธรรมราช | 650 | ฟืน 1,200 ลบ.ม./ปี |
| 107. | นาย ภิญโญ แซ่เตียว | นครศรีธรรมราช | 192 | ฟืน 720 ลบ.ม./ปี |

ที่มา : ข้อมูลมาดัดแปลงจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2546

**ตารางที่ ก.1 รายชื่อของโรงงานปูนขาวในประเทศไทย (ต่อ)**

| ลำดับที่ | โรงงาน | จังหวัด | กำลังการผลิต (ตัน/ปี) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง |
|---|---|---|---|---|
| 108. | โรงงานปูนขาวม่วงงาม | นครศรีธรรมราช | 2,500 | ฟืน 38,400 ลบ.ม./ปี |
| 109. | นาย โวหาร เวชสุนทร | นครศรีธรรมราช | 1,200 | |
| 110. | นาย วินิจ ฑียาพงศ์ | นครศรีธรรมราช | 96 | |
| 111. | โรงงานกาญจนี | นครศรีธรรมราช | 105 | |
| 112. | โรงงานปูนขาวสมศักดิ์ | นครศรีธรรมราช | 180 | ฟืน 2,880 ลบ.ม./ปี |
| 113. | โรงงานปูนขาวสุวรรณ | นครศรีธรรมราช | 7,200 | |
| 114. | นาย สาย รูปพร้อม | นครศรีธรรมราช | 180 | |
| 115. | โรงงานทุ่งสงปูนขาว | นครศรีธรรมราช | 720 | ฟืน 1,560 ลบ.ม./ปี |
| 116. | นาย บุญฤทธิ์ ชุมทอง | นครศรีธรรมราช | 180 | |
| 117. | โรงงานปูนขาวโกเขียว | นครศรีธรรมราช | 768 | ฟืน 1,440 ลบ.ม./ปี |
| 118. | โรงงานร่อนพิบูลย์ปูนขาว | นครศรีธรรมราช | 180 | |
| 119. | นาบ สุทิน จันทร์พร้อย | นครศรีธรรมราช | 750 | |
| 120. | โรงงานปูนขาวแสนเสนาะ | นครศรีธรรมราช | 780 | |
| 121. | หจก. เอส. วี. | นครศรีธรรมราช | 108 | |
| 122. | นาย ทวี นาคนุกูล | นครศรีธรรมราช | 700 | ฟืน 1,080 ลบ.ม./ปี |
| 123. | โรงงานอินทัชปูนขาว | นครศรีธรรมราช | 1,200 | |
| 124. | นาย ประเทือง ชูทอง | นครศรีธรรมราช | 400 | ฟืน 900 ลบ.ม./ปี |
| 125. | นาย พรเทพ เพชรมนต์ | นครศรีธรรมราช | 900 | |
| 126. | โรงงานปูนขาวเสรี | นครศรีธรรมราช | 840 | |
| 127. | นาย มณฑล สินสิริ | นครศรีธรรมราช | 1,200 | |
| 128. | โรงงานปูนขาวผลใหม่ | นครศรีธรรมราช | 648 | |
| 129. | โรงงานปูนขาวท้ายสำเภา | นครศรีธรรมราช | 600 | ฟืน 1,600 ลบ.ม./ปี |
| 130. | หจก. ฟุกเทียนนครการเกษตร | นครศรีธรรมราช | 2,500 | |
| 131. | นาง เสาวภา ฤกษ์จำนงค์ | สุราษฎร์ธานี | 1,000 | |
| 132. | โรงงานปูนขาวทวีศักดิ์ | สุราษฎร์ธานี | 4,000 | |
| 133. | นาย สมัคร โรจน์รุ่งไพศาล | สุราษฎร์ธานี | 7,200 | ฟืน 7,200 ลบ.ม./ปี |
| 134. | โรงงานเนตรมุกดา | สุราษฎร์ธานี | 4,800 | |
| 135. | โรงงานพรพระสังข์ | สุราษฎร์ธานี | 160 | |

ที่มา : ข้อมูลมาดัดแปลงจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2546

**ตารางที่ ก.1 รายชื่อของโรงงานปูนขาวในประเทศไทย (ต่อ)**

| ลำดับที่ | โรงงาน | จังหวัด | กำลังการผลิต (ตัน/ปี) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง |
|---|---|---|---|---|
| 136. | นาย วินิต ปุวารักษา | สุราษฎร์ธานี | 150 | ฟืน 450 ลบ.ม./ปี |
| 137. | นาย นพพร ลำใยทอง | สุราษฎร์ธานี | 6,000 | |
| 138. | นาย พิทยา ทองตำลึง | สุราษฎร์ธานี | 1,000 | |
| 139. | โรงงานสุวรรณพานิช | สุราษฎร์ธานี | 125 | |
| 140. | บริษัท สุราษฎร์ธานีสยามโดโลไมต์ จำกัด | สุราษฎร์ธานี | 14,000 | |
| 141. | หจก. แพรุ่งเจริญกิจ | สุราษฎร์ธานี | 2,250 | |
| 142. | โรงงานรุ่งโรจน์ 3 | สุราษฎร์ธานี | 150 | |
| 143. | นาย อภิชัย วานนท์วงศ์ | ตรัง | 125 | |
| 144. | โรงงานถาวรปูนขาว | ตรัง | 320 | ถ่านไม้ 600 ลบ.ม./ปี |
| 145. | โรงงานเรืองโรจน์ | ตรัง | 110 | |
| 146. | นาย ทวี รงค์รักษ์ | ตรัง | 500 | |
| 147. | โรงงานปูนขาวจรูญศักดิ์ | ตรัง | 448 | |
| 148. | โรงงานสิริปูนขาว | ตรัง | 500 | |
| 149. | นาย สุวิทย์ คงนคร | ตรัง | 4,700 | |
| 150. | โรงงานสมเดชปูนขาว | ตรัง | 90 | |
| 151. | โรงงานเพิ่มทรัพย์ | พัทลุง | 100 | ฟืน 80 ลบ.ม./ปี |
| 152. | นาย วรวุฒิ เอี่ยวเล็ก | สตูล | 175 | |
| 153. | นาย ขวัญดี สานิ่ง | สตูล | 250 | |
| 154. | นาย สัมฤทธิ์ เลียงประสิทธิ์ | สตูล | 175 | |
| 155. | นาย อ๋า แซ่ลิ้ม | สตูล | 648 | |
| 156. | นาย มาโนชญ์ รอดบุญ | สตูล | 200 | |
| 157. | หจก. เอส พี เกษตรภัณฑ์ | สงขลา | 1,500 | |
| 158. | หจก. พิบูลย์วัฒนาชุมพร | ชุมพร | 180 | |
| 159. | โรงงานปูนขาวศิลา ยู.ดี. | อุตรดิตถ์ | 25,000 | |
| 160. | หจก. เขาสว่างปูนขาว | กำแพงเพชร | 1,420 | |
| 161. | นายประสิทธิ์ อ่อนไทย | กำแพงเพชร | 540 | ถ่านหิน 100 ตัน/ปี |
| 162. | โรงงานประยงค์ปูนขาว | กำแพงเพชร | 432 | |
| 163. | นาง พัดชา สาริกะภูติ | เพชรบูรณ์ | 1,825 | |

ที่มา : ข้อมูลมาดัดแปลงจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2546

**ตารางที่ ก.1 รายชื่อของโรงงานปูนขาวในประเทศไทย (ต่อ)**

| ลำดับที่ | โรงงาน | จังหวัด | กำลังการผลิต (ตัน/ปี) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง |
|---|---|---|---|---|
| 164. | โรงงานปูนขาวพิสมัย | ตาก | 1,200 | ถ่านหิน 2,400 ตัน/ปี |
| 165. | โรงงานปูนขาวสุชาติ | ตาก | 2,280 | |
| 166. | นาย ปรีชา ย้อยดี | ตาก | 8,400 | ถ่านหิน 9,200 ตัน/ปี |
| 167. | นาย สมชาย ปัญญา | ตาก | 618 | ถ่านหิน 720 ตัน/ปี |
| 168. | บริษัท เอส แอล ที จำกัด | ตาก | 7,200 | |
| 169. | นาง ปราณี ประภาจิตสุนทร | ตาก | 2,400 | |
| 170. | นาย ไพฑูรย์ เฟื่องดี | ตาก | 3,960 | ถ่านหิน 4,800 ตัน/ปี |
| 171. | หจก. เอ็ม. พี. ซี. อุตสาหกรรมปูนขาว | ตาก | 3,500 | ถ่านหิน 3,600 ตัน/ปี |
| 172. | นาย วัชรชัย กลิ่นหอม | ตาก | 2,400 | ถ่านหิน 3,120 ตัน/ปี |
| 173. | โรงงานปูนขาวลานสอ | ตาก | 4,800 | ถ่านหิน 4,800 ตัน/ปี |
| 174. | นาง ทองหยิบ เฟื่องดี | ตาก | 300 | ถ่านหิน 500 ตัน/ปี |
| 175. | นาย จวน วุ่นสุก | ตาก | 2,400 | ถ่านหิน 3,200 ตัน/ปี |
| 176. | บริษัท พี. แอนด์ เอส. โคโลไลน์ จำกัด | ตาก | 3,000 | |
| 177. | หจก. สหปูนขาว | ตาก | 1,520 | ถ่านหิน 2,000 ตัน/ปี |
| 178. | บริษัท บีอาร์-เคม จำกัด | อุทัยธานี | 1,250 | |
| 179. | บริษัท โชคอนันต์ก่อสร้าง จำกัด | หนองบัวลำภู | 3,000 | น้ำมันเตา 960 ลิตร/ปี |
| 180. | บริษัท อนงค์ศิลาไลม์ จำกัด | เลย | 3,400 | |
| 181. | โรงงานแสงสวาทผลิตปูนขาว | นครพนม | 168 | |
| 182. | นาย เพี้ยม ฟักเฟือง | สุโขทัย | 5,700 | |
| 183. | นาย เทียม พรหมมี | สุโขทัย | 5,700 | |
| 184. | นาย แถม พรหมมี | สุโขทัย | 4,750 | |

ที่มา : ข้อมูลมาดัดแปลงจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2546

# ภาคผนวก ค

# ต้นทุนการผลิตปูนขาวของเตาปูนขาวแต่ละแบบในประเทศไทย

การศึกษาและวิเคราะห์ในเรื่องต้นทุนการผลิตปูนขาวของเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทย จะเป็นการนำข้อมูลดิบที่ได้มาจากการสอบถามและรวบรวมข้อมูลจากผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมปูนขาวของประเทศไทย ซึ่งต้นทุนในการผลิตปูนขาวสามารถแบ่งหัวข้อได้ดังนี้

**1) เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว** จะรวมถึงค่าติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการผลิต เช่น ระบบลำเลียงวัสดุ ระบบการขนส่งวัสดุ และระบบการย่อยวัตถุดิบ เป็นต้น

**2) ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว** จะรวมถึงค่าแรงงาน และค่าวัสดุที่ใช้ซ่อมแซมเตาปูนขาวและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการผลิต

**3) ค่าแรงงาน** จะรวมถึงค่าแรงงานที่เป็นคนงานขนวัตถุดิบและปูนขาว และผู้ที่ควบคุมเตาปูนขาว

**4) ค่าหินปูน** จะรวมถึงค่าขนส่งหินปูนถึงหน้าโรงงาน

**5) ค่าเชื้อเพลิง** จะรวมถึงค่าขนส่งเชื้อเพลิงถึงหน้าโรงงาน

**6) ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ** จะรวมถึงค่าบริหารงาน และค่าไฟฟ้าที่ใช้ภายในโรงงาน เป็นต้น

จากข้อมูลดิบของต้นทุนในการผลิตปูนขาวของเทคโนโลยีเตาปูนขาวแต่ละแบบที่ใช้ในประเทศไทยนำมาคำนวณหาต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว ซึ่งจะแสดงไว้ดังนี้

## ค.1 ต้นทุนการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln)

ข้อมูลของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) จากบริษัท แอล. เอส .เอ็ม. (1999) จำกัด มีกำลังการผลิตปูนสุกประมาณ 120 ตันต่อเตาต่อครั้ง ซึ่งขั้นตอนการผลิตปูนสุกตั้งแต่การนำหินปูนใส่เข้าไปในเตาปูนขาว การเผาหินปูน (Calcination) และการปล่อยให้ปูนสุกที่ได้เย็นตัวลงใช้ระยะเวลาประมาณ 13 – 18 วัน (คิดเป็นอัตราการในผลิตปูนสุกปีละประมาณ 1,200 ตันต่อปี)

**1) เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว** จะรวมถึงพัดลม (Blower) ใช้ในการเป่าลมเข้าไปในเตาปูนขาว ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการคิดเป็นค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้นประมาณ 750,000 บาท โดยสมมติอายุในการใช้งานของเตาแบบเผาทีละครั้งประมาณ 10 ปี และคิดค่าเสื่อมราคาตลอดอายุการใช้งานเท่ากันทุกปี

ดังนั้นคิดเป็นค่าเสื่อมราคาของเตาปูนขาวปีละ $\frac{750,000}{10}$ = 75,000 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{75,000}{1,200}$ = 62.50 บาทต่อตันปูนขาว

**2) ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว** จะรวมถึงค่าแรงงาน และค่าวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซมเตาปูนขาวและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการผลิต ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการคิดเป็นค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้นประมาณปีละ 40,000 บาท

ดังนั้นคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{40,000}{1,200}$ = 33.33 บาทต่อตันปูนขาว

**3) ค่าแรงงาน** จะรวมถึงค่าแรงงานที่เป็นคนงานขนวัตถุดิบและปูนขาว และผู้ที่ควบคุมเตาปูนขาว ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการใช้คนงานทั้งสิ้น 5 คนต่อเตา โดยคิดเป็นค่าแรงงานคนละ 4,000 บาทต่อเดือน

ดังนั้นคิดเป็นค่าแรงงานทั้งสิ้นปีละ 5 x 4,000 x 12 = 240,000 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{240,000}{1,200}$ = 200 บาทต่อตันปูนขาว

**4) ค่าหินปูน** จะรวมถึงค่าขนส่งหินปูนถึงหน้าโรงงาน โดยการผลิตปูนสุก 1 ตัน จะต้องใช้หินปูนหนักประมาณ 2 ตันเพื่อนำมาเผา ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการคิดเป็นราคาหินปูน (รวมค่าขนส่ง) ตันละ 130 บาท

ดังนั้นคิดเป็นค่าหินปูน (รวมค่าขนส่ง) ปีละ 2 x 130 x 1,200 = 312,000 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{312,000}{1,200}$ = 260 บาทต่อตันปูนขาว

**5) ค่าเชื้อเพลิง** จะรวมถึงค่าขนส่งเชื้อเพลิงถึงหน้าโรงงาน ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการ พบว่าใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง (ค่าความร้อนประมาณ 5,100 kcal/kg) ซึ่งราคาถ่านหินลิกไนต์ตันละ 1,100 บาท โดยใช้ถ่านหินลิกไนต์ประมาณ 90 ตันต่อเตาต่อครั้ง คิดเป็นปริมาณถ่านหินลิกไนต์ที่ใช้ประมาณ 900 ตันต่อปี

ดังนั้นคิดเป็นค่าเชื้อเพลิง (รวมค่าขนส่ง) ปีละ 900 x 1,100 = 990,000 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{990,000}{1,200}$ = 825 บาทต่อตันปูนขาว

**6) ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ** จะรวมถึงค่าบริหารงาน และค่าไฟฟ้าที่ใช้ภายในโรงงาน เป็นต้น ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการคิดเป็นค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้นประมาณปีละ 30,000 บาท

ดังนั้นคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{30,000}{1,200}$ = 25 บาทต่อตันปูนขาว

จากต้นทุนทั้งหมดข้างต้น คิดเป็นต้นทุนรวมในการผลิตปูนขาวของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) ปีละ 1,687,000 บาท และต้นทุนรวมต่อหน่วยในการผลิตปูนขาวเท่ากับ 1,405.83 บาทต่อตันปูนขาว

## ค.2 ต้นทุนการผลิตปูนขาวของเตาตั้งแบบ Parallel Flow

ข้อมูลของเตาตั้งแบบ Parallel Flow จากบริษัท ปูนคุณภาพ จำกัด มีกำลังการผลิตปูนสุกประมาณ 150 ตันต่อวัน (คิดเป็นอัตราการในผลิตปูนสุกปีละประมาณ 54,000 ตันต่อปี)

**1) เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว** จะรวมถึงค่าติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการผลิต เช่น ระบบลำเลียงวัสดุ ระบบการขนส่งวัสดุ และระบบการย่อยวัตถุดิบ เป็นต้น ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการคิดเป็นค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้นประมาณ 150,000,000 บาท โดยสมมติอายุในการใช้งานของเตาตั้งแบบ Parallel Flow ประมาณ 20 ปี และคิดค่าเสื่อมราคาตลอดอายุการใช้งานเท่ากันทุกปี

ดังนั้นคิดเป็นค่าเสื่อมราคาประมาณปีละ $\frac{150,000,000}{20}$ = 7,500,000 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{7,500,000}{54,000}$ = 138.88 บาทต่อตันปูนขาว

**2) ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว** จะรวมถึงค่าแรงงาน และค่าวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซมเตาปูนขาวและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการผลิต ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการคิดเป็นค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้นประมาณปีละ 1,500,000 บาท

ดังนั้นคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{1,500,000}{54,000}$ = 27.78 บาทต่อตันปูนขาว

**3) ค่าแรงงาน** จะรวมถึงค่าแรงงานที่เป็นคนงานขนวัตถุดิบและปูนขาว และผู้ที่ควบคุมเตาปูนขาว ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการใช้คนงานทั้งสิ้น 3 คนต่อเตาต่อกะ (เวลาการทำงานวันละ 3 กะ) โดยแต่ละกะมีวิศวกรควบคุมเตาปูนขาว 1 คน และมีคนงานอีก 2 คน คิดเป็นค่าแรงงานทั้งสิ้นเดือนละ 115,500 บาท

ดังนั้นคิดเป็นค่าแรงงานทั้งสิ้นปีละ 115,500 x 12 = 1,386,000 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{1,386,000}{54,000}$ = 25.67 บาทต่อตันปูนขาว

**4) ค่าหินปูน** จะรวมถึงค่าขนส่งหินปูนถึงหน้าโรงงาน โดยการผลิตปูนสุก 1 ตัน จะต้องใช้หินปูนหนักประมาณ 2 ตันเพื่อนำมาเผา ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการคิดเป็นราคาหินปูน (รวมค่าขนส่ง) ตันละ 130 บาท

ดังนั้นคิดเป็นค่าหินปูน (รวมค่าขนส่ง) ปีละ 2 x 130 x 54,000 = 14,040,000 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{14,040,000}{54,000}$ = 260 บาทต่อตันปูนขาว

**5) ค่าเชื้อเพลิง** จะรวมถึงค่าขนส่งเชื้อเพลิงถึงหน้าโรงงาน ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการ พบว่าใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง (ค่าความร้อนประมาณ 9,900 kcal/l) ซึ่งราคาน้ำมันเตาลิตรละ 8 บาท โดยอัตราการใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงประมาณ 93 ลิตรต่อตันปูนสุก

ดังนั้นคิดเป็นปริมาณน้ำมันเตาที่ใช้ประมาณ 93 x 54,000 = 5,022,000 ลิตรต่อปี

ซึ่งคิดเป็นค่าเชื้อเพลิง (รวมค่าขนส่ง) ปีละ 8 x 5,022,000 = 40,176,000 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{40,176,000}{54,000}$ = 744 บาทต่อตันปูนขาว

**6) ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ** จะรวมถึงค่าบริหารงาน และค่าไฟฟ้าที่ใช้ภายในโรงงาน เป็นต้น ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการคิดเป็นค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้นประมาณปีละ 1,620,000 บาท

ดังนั้นคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{1,620,000}{54,000}$ = 30 บาทต่อตันปูนขาว

จากต้นทุนทั้งหมดข้างต้น คิดเป็นต้นทุนรวมในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งแบบ Parallel Flow ปีละ 66,222,000 บาท และต้นทุนรวมต่อหน่วยในการผลิตปูนขาวเท่ากับ 1,226.33 บาทต่อตันปูนขาว

## ค.3 ต้นทุนการผลิตปูนขาวของเตาตั้งแบบ Mixed Feed

ข้อมูลของเตาตั้งแบบ Mixed Feed จากบริษัท อโศกเคมีคอล จำกัด มีกำลังการผลิตปูนสุกประมาณ 250 ตันต่อวัน (คิดเป็นอัตราการในผลิตปูนสุกปีละประมาณ 90,000 ตันต่อปี)

**1) เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว** จะรวมถึงค่าติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการผลิต เช่น ระบบลำเลียงวัสดุ ระบบการขนส่งวัสดุ และระบบการย่อยวัตถุดิบ เป็นต้น ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการคิดเป็นค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้นประมาณ 250,000,000 บาท โดยสมมติอายุในการใช้งานของเตาตั้งแบบ Mixed Feed ประมาณ 10 ปี และคิดค่าเสื่อมราคาตลอดอายุการใช้งานเท่ากันทุกปี

ดังนั้นคิดเป็นค่าเสื่อมราคาประมาณปีละ $\frac{250,000,000}{10}$ = 25,000,000 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{25,000,000}{90,000}$ = 138.88 บาทต่อตันปูนขาว

**2) ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว** จะรวมถึงค่าแรงงาน และค่าวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซมเตาปูนขาวและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการผลิต ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการคิดเป็นค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้นประมาณปีละ 9,000,000 บาท

ดังนั้นคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{9,000,000}{90,000}$ = 100 บาทต่อตันปูนขาว

**3) ค่าแรงงาน** จะรวมถึงค่าแรงงานที่เป็นคนงานขนวัตถุดิบและปูนขาว และผู้ที่ควบคุมเตาปูนขาว ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการใช้คนงานทั้งสิ้น 5 คนต่อเตาต่อกะ (เวลา

การทำงานวันละ 3 กะ) โดยแต่ละกะมีวิศวกรควบคุมเตาปูนขาว 2 คน และมีคนงานอีก 3 คน คิดเป็นค่าแรงงานทั้งสิ้นเดือนละ 234,750 บาท

ดังนั้นคิดเป็นค่าแรงงานทั้งสิ้นปีละ $234,750 \times 12 = 2,817,000$ บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{2,817,000}{90,000} = 31.30$ บาทต่อตันปูนขาว

**4) ค่าหินปูน** จะรวมถึงค่าขนส่งหินปูนถึงหน้าโรงงาน โดยการผลิตปูนสุก 1 ตัน จะต้องใช้หินปูนหนักประมาณ 2 ตันเพื่อนำมาเผา ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการคิดเป็นราคาหินปูน (รวมค่าขนส่ง) ตันละ 130 บาท

ดังนั้นคิดเป็นค่าหินปูน (รวมค่าขนส่ง) ปีละ $2 \times 130 \times 90,000 = 23,400,000$ บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{23,400,000}{90,000} = 260$ บาทต่อตันปูนขาว

**5) ค่าเชื้อเพลิง** จะรวมถึงค่าขนส่งเชื้อเพลิงถึงหน้าโรงงาน ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการ พบว่าใช้ถ่านหินแอนทราไซต์เป็นเชื้อเพลิง (ค่าความร้อนประมาณ 7,000 kcal/kg) ซึ่งราคาถ่านหินแอนทราไซต์ตันละ 1,600 บาท โดยอัตราการใช้ถ่านหินแอนทราไซต์เป็นเชื้อเพลิงประมาณ 0.27 ตันต่อตันปูนสุก

ดังนั้นปริมาณถ่านหินแอนทราไซต์ที่ใช้ $0.27 \times 90,000 = 24,300$ ตันต่อปี

ซึ่งคิดเป็นค่าเชื้อเพลิง (รวมค่าขนส่ง) ปีละ $1,600 \times 24,300 = 38,880,000$ บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{38,880,000}{90,000} = 432$ บาทต่อตันปูนขาว

**6) ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ** จะรวมถึงค่าบริหารงาน และค่าไฟฟ้าที่ใช้ภายในโรงงาน เป็นต้น ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการคิดเป็นค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้นประมาณปีละ 2,700,000 บาท

ดังนั้นคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{2,700,000}{90,000} = 30$ บาทต่อตันปูนขาว

จากต้นทุนทั้งหมดข้างต้น คิดเป็นต้นทุนรวมในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งแบบ Mixed Feed ปีละ 101,797,000 บาท และต้นทุนรวมต่อหน่วยในการผลิตปูนขาวเท่ากับ 1,131.08 บาทต่อตันปูนขาว

## ค.4 ต้นทุนการผลิตปูนขาวของเตาแบบหมุน (Rotary Kiln)

ข้อมูลของเตาแบบหมุน (Rotary Kiln) จากบริษัท อโศกเคมีคอล จำกัด มีกำลังการผลิตปูนสุกประมาณ 200 ตันต่อวัน (คิดเป็นอัตราการในผลิตปูนสุกปีละประมาณ 72,000 ตันต่อปี)

**1) เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว** จะรวมถึงค่าติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการผลิต เช่น ระบบลำเลียงวัสดุ ระบบการขนส่งวัสดุ และระบบการย่อยวัตถุดิบ เป็นต้น ซึ่งจากการสอบถาม

ข้อมูลจากผู้ประกอบการคิดเป็นค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้นประมาณ 800,000,000 บาท โดยสมมติอายุในการใช้งานของเตาแบบหมุน (Rotary Kiln) ประมาณ 20 ปี และคิดค่าเสื่อมราคาตลอดอายุการใช้งานเท่ากันทุกปี

ดังนั้นคิดเป็นค่าเสื่อมราคาประมาณปีละ $\frac{800,000,000}{20}$ = 40,000,000 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{40,000,000}{72,000}$ = 555.56 บาทต่อตันปูนขาว

**2) ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว** จะรวมถึงค่าแรงงาน และค่าวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซมเตาปูนขาวและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการผลิต ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการคิดเป็นค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้นประมาณปีละ 5,760,000 บาท

ดังนั้นคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{5,760,000}{72,000}$ = 80 บาทต่อตันปูนขาว

**3) ค่าแรงงาน** จะรวมถึงค่าแรงงานที่เป็นคนงานขนวัตถุดิบและปูนขาว และผู้ที่ควบคุมเตาปูนขาว ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการใช้คนงานทั้งสิ้น 6 คนต่อเตาต่อกะ (เวลาการทำงานวันละ 3 กะ) โดยแต่ละกะมีวิศวกรควบคุมเตาปูนขาว 2 คน และมีคนงานอีก 4 คน คิดเป็นค่าแรงงานทั้งสิ้นเดือนละ 258,000 บาท

ดังนั้นคิดเป็นค่าแรงงานทั้งสิ้นปีละ 258,000 x 12 = 3,096,000 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{3,096,000}{72,000}$ = 43 บาทต่อตันปูนขาว

**4) ค่าหินปูน** จะรวมถึงค่าขนส่งหินปูนถึงหน้าโรงงาน โดยการผลิตปูนสุก 1 ตัน จะต้องใช้หินปูนหนักประมาณ 2 ตันเพื่อนำมาเผา ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการคิดเป็นราคาหินปูน (รวมค่าขนส่ง) ตันละ 130 บาท

ดังนั้นคิดเป็นค่าหินปูน (รวมค่าขนส่ง) ปีละ 2 x 130 x 72,000 = 18,720,000 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{18,720,000}{72,000}$ = 260 บาทต่อตันปูนขาว

**5) ค่าเชื้อเพลิง** จะรวมถึงค่าขนส่งเชื้อเพลิงถึงหน้าโรงงาน ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการ พบว่าใช้ถ่านหินบิทูมินัสเป็นเชื้อเพลิง (ค่าความร้อนประมาณ 6,000 kcal/kg) ซึ่งราคาถ่านหินบิทูมินัสตันละ 1,300 บาท โดยอัตราการใช้ถ่านบิทูมินัสเป็นเชื้อเพลิงประมาณ 0.25 ตันต่อตันปูนสุก

ดังนั้นปริมาณถ่านหินบิทูมินัสที่ใช้ประมาณ 0.25 x 72,000 = 18,000 ตันต่อปี

ซึ่งคิดเป็นค่าเชื้อเพลิง (รวมค่าขนส่ง) ปีละ 1,300 x 18,000 = 23,400,000 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{23,400,000}{72,000}$ = 325 บาทต่อตันปูนขาว

**6) ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ** จะรวมถึงค่าบริหารงาน และค่าไฟฟ้าที่ใช้ภายในโรงงาน เป็นต้น ซึ่งจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ประกอบการคิดเป็นค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้นประมาณปีละ 3,960,000 บาท

ดังนั้นคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{3,960,000}{72,000}$ = 55 บาทต่อตันปูนขาว

จากต้นทุนทั้งหมดข้างต้น คิดเป็นต้นทุนรวมในการผลิตปูนขาวของเตาแบบหมุน (Rotary Kiln) ปีละ 94,936,320 บาท และต้นทุนรวมต่อหน่วยในการผลิตปูนขาวเท่ากับ 1,318.56 บาทต่อตันปูนขาว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ง

# ต้นทุนการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง

การศึกษาและวิเคราะห์ในเรื่องต้นทุนการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Vertical Shaft Kiln) ที่จะนำมาทดแทนเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) จะเป็นการออกแบบให้มีกำลังการผลิตปูนสุกประมาณ 3 ตันต่อวัน (คิดเป็นอัตราการในผลิตปูนสุกปีละประมาณ 1,080 ตันต่อปี) ซึ่งสามารถแบ่งต้นทุนในการผลิตปูนขาวออกเป็นหัวข้อได้ดังนี้

**1) เงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว** จะประมาณราคาของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง และค่าแรงงานในการก่อสร้าง โดยราคาของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างจะได้จากราคาต่อหน่วยของวัสดุที่จำหน่ายในประเทศไทยเป็นเกณฑ์ นอกจากนี้ยังมีค่าแรงงานในการก่อสร้าง ซึ่งใช้คนงาน 6 คน และมีระยะเวลาในการก่อสร้างประมาณ 32 วัน จากนั้นจึงนำมารวมกับราคาของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง จะได้เป็นเงินลงทุนในการก่อสร้างเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่องทั้งสิ้น 850,000 บาท โดยสมมติอายุในการใช้งานของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Vertical Shaft Kiln) ประมาณ 10 ปี และคิดค่าเสื่อมราคาตลอดอายุการใช้งานเท่ากันทุกปี

ดังนั้นคิดเป็นค่าเสื่อมราคาประมาณปีละ $\frac{850,000}{10}$ = 85,000 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{85,000}{1,080}$ = 78.70 บาทต่อตันปูนขาว

**2) ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาว** จะรวมถึงค่าแรงงาน และค่าวัสดุที่ใช้ซ่อมแซมเตาปูนขาว และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการผลิต ได้ประมาณการค่าใช้จ่ายแต่ละปีในการซ่อมแซมเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Vertical Shaft Kiln) ไว้ประมาณร้อยละ 35 ของเงินลงทุนในการก่อสร้างเตาปูนขาว

ดังนั้นคิดเป็นค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเตาปูนขาวปีละ 0.35 x850,000 = 297,500 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{297,500}{1,080}$ = 275.46 บาทต่อตันปูนขาว

**3) ค่าแรงงาน** คิดเฉพาะค่าแรงงานที่เป็นคนงานขนวัตถุดิบและปูนขาว และผู้ที่ควบคุมเตาปูนขาว โดยประมาณจำนวนคนงานที่ใช้ และค่าแรงงานเท่ากับข้อมูลของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) ซึ่งใช้คนงานทั้งสิ้น 5 คนต่อเตา โดยคิดเป็น ค่าแรงงานคนละ 4,000 บาทต่อเดือน

ดังนั้นคิดเป็นค่าแรงงานทั้งสิ้นปีละ 5 x 4,000 x 12 = 240,000 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{240,000}{1,080}$ = 222.22 บาทต่อตันปูนขาว

**4) ค่าหินปูน** จะรวมถึงค่าขนส่งหินปูนถึงหน้าโรงงาน โดยการผลิตปูนสุก 1 ตัน จะต้องใช้หินปูนหนักประมาณ 2 ตันเพื่อนำมาเผา ซึ่งประมาณราคาหินปูน (รวมค่าขนส่ง) เท่ากับข้อมูลของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) คือ 130 บาทต่อตัน

ดังนั้นคิดเป็นค่าหินปูน (รวมค่าขนส่ง) ปีละ 2 x 130 x 1,080 = 280,800 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{280,800}{1,080}$ = 260 บาทต่อตันปูนขาว

**5) ค่าเชื้อเพลิง** จะรวมถึงค่าขนส่งเชื้อเพลิงถึงหน้าโรงงาน โดยเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Vertical Shaft Kiln) ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง (ค่าความร้อนประมาณ 5,100 kcal/kg) ซึ่งจะมีการป้อนหินปูนและถ่านหินเป็นช่วง ๆ ที่อัตราส่วนระหว่างหินปูนกับเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 6 : 1 คือ ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงประมาณ 0.33 ตันต่อตันปูนสุก โดยประมาณราคาถ่านหินลิกไนต์เท่ากับข้อมูลของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) คือ 1,100 บาทต่อตัน

ดังนั้นปริมาณถ่านหินลิกไนต์ที่ใช้ 0.33 x 1,080 = 356.40 ตันต่อปี

ซึ่งคิดเป็นค่าเชื้อเพลิง (รวมค่าขนส่ง) ปีละ 1,100 x 356.40 = 392,040 บาท

และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตปูนขาว $\frac{392,040}{1,080}$ = 363 บาทต่อตันปูนขาว

**6) ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ** จะรวมถึงค่าบริหารงาน และค่าไฟฟ้าที่ใช้ภายในโรงงาน เป็นต้น โดยประมาณค่าใช้จ่ายเท่ากับข้อมูลของเตาแบบเผาทีละครั้ง (Batch Kiln) คือ 25 บาทต่อตันปูนขาว

ดังนั้นคิดเป็นค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ทั้งสิ้นปีละ 25 x 1,080 = 27,000 บาท

จากต้นทุนทั้งหมดข้างต้น คิดเป็นต้นทุนรวมในการผลิตปูนขาวของเตาตั้งขนาดเล็กแบบต่อเนื่อง (Small-Scale Vertical Shaft Kiln) ปีละ 1,322,330.40 บาท และต้นทุนรวมต่อหน่วยในการผลิตปูนขาวเท่ากับ 1,224.38 บาทต่อตันปูนขาว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก จ

# การทดสอบคุณภาพของปูนขาว

กระบวนการผลิตปูนขาว จะต้องทำการทดสอบคุณภาพของปูนขาวที่ได้อยู่ตลอดเวลา เพื่อควบคุมคุณภาพของปูนขาวที่ได้ว่ามีคุณภาพตรงกับความต้องการของการนำไปใช้งานในประเภทต่าง ๆ หรือไม่ ซึ่งจะมีการทดสอบอยู่หลายวิธี เช่น การทดสอบหาอัตราของการเกิด Calcination, การทดสอบหาปริมาณปูนขาวที่ทำปฏิกิริยาได้ (Available Lime) และการทดสอบหาความสามารถในการทำปฏิกิริยาของปูนขาว เป็นต้น

## จ.1 การทดสอบหาอัตราของการเกิด Calcination

เป็นการทดสอบที่มีวิธีการไม่ซับซ้อน และทำได้รวดเร็ว โดยทำการทดสอบหาอัตราของการเกิด Calcination ซึ่งจะทำการกำหนดให้น้ำหนักหรือปริมาตรของปูนสุกที่ได้มาเปรียบเทียบกับน้ำหนักหรือปริมาตรของหินปูนที่นำมาเป็นวัตถุดิบ ในกระบวนการผลิตปูนขาวนั้นควรที่จะทำการเก็บตัวอย่างและชั่งน้ำหนักปูนสุกที่ได้อย่างน้อยวันละ 3 ครั้ง เพื่อที่จะให้ค่าที่ได้ไม่เบี่ยงเบียนไป และการทดสอบวิธีนี้เหมาะกับปูนสุกที่ยังเป็นก้อน (Lump Quicklime) แต่ไม่เหมาะกับปูนสุกที่มีรอยแตกหรือมีลักษณะเป็นผง ซึ่งจะทำให้ผลวิเคราะห์ที่ได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง

**1) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ**

(1) ภาชนะที่ใช้บรรจุตัวอย่าง ที่มีความจุประมาณ 20 ลิตร

(2) เครื่องชั่งน้ำหนัก

**2) วิธีการทดสอบ**

(1) ชั่งน้ำหนักเปล่าของภาชนะที่ใช้บรรจุตัวอย่าง แล้วทำการบันทึกค่าที่ได้

(2) เติมหินปูนที่ใช้เป็นวัตถุดิบลงในภาชนะที่ใช้บรรจุตัวอย่างจนเต็ม แล้วทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าที่ได้

(3) เติมปูนสุกที่ได้จากการเผาลงในภาชนะที่ใช้บรรจุตัวอย่างจนเต็ม แล้วทำการชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าที่ได้

(4) ทำขั้นตอนที่ 1 และ 2 ซ้ำอีก 3 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณ

**เมื่อได้ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบแล้ว จึงนำมาคำนวณหาค่าต่าง ๆ เช่น ร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (Loss On Ignition : LOI) อัตราของการเกิด Calcination และร้อยละของหินปูนที่ยังไม่ได้ถูกเผา เป็นต้น**

**3) การคำนวณ**

จากค่าที่ได้จากการทดสอบ นำมาคำนวณหาร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (Loss On Ignition : LOI) จากสูตรดังนี้คือ

$$W_L = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_B} \times 100$$

โดยที่ $W_L$ = ร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (Loss On Ignition : LOI)

$W_1$ = น้ำหนักของหินปูนที่ชั่งได้

$W_2$ = น้ำหนักของปูนสุกที่ชั่งได้

$W_B$ = น้ำหนักของภาชนะที่ใช้บรรจุตัวอย่าง

จากค่าของร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (Loss On Ignition : LOI) ที่คำนวณได้นี้ สามารถที่จะนำมาเปรียบเทียบผลของตัวแปรที่เปลี่ยนไป เช่น ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ หรือขนาดของหินปูนที่ใช้เป็นวัตถุดิบ เป็นต้น เมื่อลดปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ลง จะมีผลทำให้ค่าของร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (Loss On Ignition : LOI) ลดลงด้วย ส่วนขนาดของหินปูนที่ใช้เป็นวัตถุดิบเล็กลง จะมีผลทำให้ค่าของร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (Loss On Ignition : LOI) เพิ่มขึ้น

ในการหาอัตราของการเกิด Calcination และร้อยละของหินปูนที่ยังไม่ได้ถูกเผา โดยนำค่าของร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (Loss On Ignition : LOI) มาใช้ในการคำนวณที่ได้จากสูตรดังนี้คือ

$$D_C = \frac{W_L}{C_C}$$

$$U_C = C_C - W_L$$

โดยที่ $D_C$ = อัตราของการเกิด Calcination

$W_L$ = ร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (Loss On Ignition : LOI)

$C_C$ = ร้อยละของปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และ/หรือแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ในหินปูน

$U_C$ = ร้อยละของหินปูนที่ยังไม่ได้ถูกเผา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## จ.2 การทดสอบหาปริมาณปูนขาวที่ทำปฏิกิริยาได้ (Available Lime)

เป็นการทดสอบที่ใช้พื้นที่ในการทดสอบไม่มาก อาจจะใช้เพียงพื้นที่บนโต๊ะเล็ก ๆ ในการทดสอบ โดยจะให้ทราบว่า ปูนขาวที่ได้จะมีปริมาณปูนขาวที่ทำปฏิกิริยาได้ (Available Lime) มากหรือน้อยเท่าใด ซึ่งการทดสอบนี้สามารถทำได้ 2 วิธีโดยใช้สารเคมีต่างกันคือ วิธีแรกที่นิยมใช้กันมาก จะใช้กรดเกลือ (HCl) เป็นสารเคมีในการทดสอบ ซึ่งเรียกการทดสอบนี้ว่า Rapid Sugar Test และวิธีที่ 2 จะใช้กรดกำมะถัน ($H_2SO_4$) เป็นสารเคมีในการทดสอบ

### จ.2.1 การทดสอบหาปริมาณปูนขาวที่ทำปฏิกิริยาได้โดยใช้กรดเกลือ (HCl)

**1) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ**

(1) ขวดแก้วสำหรับบรรจุสารเคมีขนาด 300 มิลลิลิตร

(2) บิวเร็ต (Burette) ขนาด 100 มิลลิลิตร

(3) เครื่องชั่งน้ำหนัก

(4) ตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh

**2) สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ**

(1) น้ำกลั่นบริสุทธิ์

(2) กรดเกลือ (HCl)

(3) Anhydrous Sodium Carbonate ($Na_2CO_3$)

(4) Methyl Orange Indicator

(5) Phenolphthalein Indicator

(6) ซูโครส (Sucrose) หรืออาจจะใช้น้ำตาลทรายเม็ดเล็ก ๆ

**3) วิธีการทดสอบ**

(1) เตรียมสารละลายกรดเกลือ (HCl) ทำให้เจือจางโดยใช้กรดเกลือ (HCl) 15.70 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 1 ลิตร

(2) นำสารละลายกรดเกลือ (HCl) ที่ได้มาเติมAnhydrous Sodium Carbonate ($Na_2CO_3$) ที่มีปริมาณ 0.85 กรัม โดยใช้ Methyl Orange Indicator ทำการทดสอบความเป็นกลาง โดยทั่วไปจะใช้สารละลายกรดเกลือ (HCl) ประมาณ 90 มิลลิลิตร

(3) นำปูนขาวมาร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh แล้วเก็บตัวอย่างของปูนขาวที่ได้ผ่านตะแกรงร่อนประมาณ 500 มิลลิกรัม

(4) นำปูนขาวที่ผ่าตะแกรงร่อนนี้ใส่ลงในขวดแก้ว จากนั้นแล้วเติมน้ำกลั่นบริสุทธิ์ ในปริมาณ 20 มิลลิลิตร

(5) ปิดจุกขวดแก้วที่ผสมปูนขาวกับน้ำกลั่น นำมาเขย่า และอุ่นให้ร้อนในระยะเวลาประมาณ 2 นาที

(6) จากนั้นเปิดจุกขวดแก้ว แล้วเติมน้ำ 150 มิลลิลิตร และซูโครส (Sucrose) 15 กรัมลงในขวดแก้ว

(7) ปิดจุกขวดแก้วอีกครั้ง และเขย่าประมาณ 5 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้อีกประมาณ 30 – 60 นาที

(8) จากนั้นเปิดจุกขวดแก้ว แล้วเติม Phenolphthalein Indicator ปริมาณ 2 หยด ฉีดน้ำที่ด้านข้างของขวดแก้วและเขย่า เพื่อทำความสะอาด

(9) ทำการไทเทรต (Titration) ในขวดแก้ว โดยเติมสารละลายมาตรฐานของกรดเกลือ (HCl) ประมาณ 90 % ของปริมาณที่คาดเอาไว้ จากนั้นเขย่าขวดแก้ว เมื่อเกิดการไทเทรต (Titration) ใกล้สมบูรณ์ จึงค่อย ๆ เติมสารละลายมาตรฐานของกรดเกลือ (HCl) ที่เหลือ 10 % ของปริมาณที่คาดเอาไว้ จนกระทั่งสารละลายสีชมพูจางหายไป

(10) บันทึกค่าของปริมาณสารละลายมาตรฐานของกรดเกลือ (HCl) ที่ใช้ในบิวเร็ต (Burette) ซึ่งปริมาณสารละลายมาตรฐานของกรดเกลือ (HCl) ที่ใช้ 1 มิลลิลิตร จะทีค่าเทียบเท่ากับปริมาณปูนขาวที่ทำปฏิกิริยาได้ (Available Lime) เท่ากับ 1 %

**จ.2.2 การทดสอบหาปริมาณปูนขาวที่ทำปฏิกิริยาได้โดยใช้กรดกำมะถัน ($H_2SO_4$)**

**1) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ**

(1) ขวดแก้วสำหรับบรรจุสารเคมีขนาด 300 มิลลิลิตร

(2) บิวเร็ต (Burette) ขนาด 100 มิลลิลิตร

(3) ปิเป็ต (Pipette)

(4) เครื่องชั่งน้ำหนัก

(5) ตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh

(6) กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1

**2) สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ**

(1) น้ำกลั่นบริสุทธิ์

(2) กรดกำมะถัน ($H_2SO_4$)

(3) Phenolphthalein Indicator

(4) ซูโครส (Sucrose) หรืออาจจะใช้น้ำตาลทรายเม็ดเล็ก ๆ

**3) วิธีการทดสอบ**

(1) เตรียมสารละลายกรดกำมะถัน ($H_2SO_4$) 0.375 N ทำให้เจือจางโดยใช้กรดกำมะถัน ($H_2SO_4$) 36.98 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 1 ลิตร

(2) นำปูนขาว 2.50 กรัมใส่ลงในขวดแก้ว จากนั้นแล้วเติมน้ำกลั่นบริสุทธิ์ในปริมาณ 40 มิลลิลิตร

(3) ปิดจุกขวดแก้วที่ผสมปูนขาวกับน้ำกลั่น นำมาเขย่า และอุ่นให้ร้อนในระยะเวลาประมาณ 3 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงในอุณหภูมิห้อง

(4) จากนั้นเปิดจุกขวดแก้ว แล้วเติมน้ำ 20 มิลลิลิตร และซูโครส (Sucrose) 20 กรัมลงในขวดแก้ว

(5) ปิดจุกขวดแก้วอีกครั้ง และเขย่าประมาณ 30 นาที

(6) จากนั้นเปิดจุกขวดแก้ว แล้วเติมน้ำลงไปประมาณ 250 มิลลิลิตร

(7) นำสารละลายที่ได้ผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 แล้วทำการทิ้งสารละลายที่ผ่านการกรองปริมาณ 15 –30 มิลลิลิตรแรก

(8) จากนั้นดูดสารละลายที่ผ่านการกองที่เหลือด้วยปิเป็ต (Pipette) ปริมาณ 25 มิลลิลิตรลงในขวดแก้ว แล้วเติม Phenolphthalein Indicator ปริมาณ 5 หยด ฉีดน้ำที่ด้านข้างของขวดแก้วและเขย่า เพื่อทำความสะอาด

(9) ทำการไทเทรต (Titration) ในขวดแก้ว โดยเติมสารละลายกรดกำมะถัน ($H_2SO_4$) ประมาณ 90 % ของปริมาณที่คาดเอาไว้ จากนั้นเขย่าขวดแก้ว เมื่อเกิดการไทเทรต (Titration) ใกล้สมบูรณ์ จึงค่อย ๆ เติมสารละลายกรดกำมะถัน ($H_2SO_4$) ที่เหลือ 10 % ของปริมาณที่คาดเอาไว้ จนกระทั่งสารละลายสีชมพูจางหายไป

(10) บันทึกค่าของปริมาณสารละลายกรดกำมะถัน ($H_2SO_4$) ที่ใช้ในบิวเร็ต (Burette) ซึ่งปริมาณสารละลายกรดกำมะถัน ($H_2SO_4$) ที่ใช้ 1 มิลลิลิตร จะทีค่าเทียบเท่ากับปริมาณปูนขาวที่ทำปฏิกิริยาได้ (Available Lime) เท่ากับ 4 %

**จ.3 การทดสอบหาความสามารถในการทำปฏิกิริยาของปูนขาว**

เป็นการทดสอบเพื่อหาความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเกิด Hydration ซึ่งจะมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการทำปฏิกิริยาของปูนสุกที่ได้ โดยปูนสุกแบบเผาสุกพอดี (Soft Burn) จะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าปูนสุกแบบเผาสุกมาก (Hard Burn) ดังนั้นการทดสอบนี้จะช่วยให้ทราบว่าการเผาหินปูน (Calcination) จะต้องมีอุณหภูมิในการเผาประมาณเท่าใด จึงทำให้ปูนสุกที่ได้เป็นแบบเผาสุกพอดี (Soft Burn)

**1) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ**

(1) ตะแกรงร่อนขนาด 7 mesh

(2) ขวดแก้วทนความร้อน

(3) ปรอทวัดอุณหภูมิ

(4) นาฬิกาจับเวลา

(5) เครื่องชั่งน้ำหนัก

(6) เครื่องบด

**2) วิธีการทดสอบ**

(1) นำตัวอย่างปูนสุกที่เป็นก้อน (Lump Quicklime) ประมาณ 2 กิโลกรัม มาบดด้วยเครื่องบดให้มีขนาดเล็ก

(2) นำปูนสุกที่ผ่านการบดแล้ว มาร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 7 mesh แล้วเก็บตัวอย่างของปูนขาวที่ได้ผ่านตะแกรงร่อนประมาณ 200 กรัม

(3) เติมน้ำลงในขวดแก้วทนความร้อนปริมาณ 170 มิลลิลิตร จากนั้นชั่งปูนสุกที่ผ่านการร่อนแล้วประมาณ 50 กรัม แล้วเติมลงในขวดแก้วทนความร้อน

(4) บันทึกอุณหภูมิของสารละลายในขวดแก้วทนความร้อนที่เพิ่มขึ้น ทุก ๆ 1 นาที และทำการบันทึกต่อไปจนครบ 24 นาที

(5) นำค่าที่บันทึกได้ทั้งหมด มาเขียนกราฟระหว่างอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ และทำการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน ถ้าปูนสุกที่ได้เป็นแบบเผาสุกพอดี (Soft Burn) มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้รวดเร็ว จะมีอุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นประมาณ 50°C ในระยะเวลา 1 นาที ส่วนปูนสุกแบบเผาสุกมาก (Hard Burn) มีอุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นประมาณ 50°C ใช้ระยะเวลานานถึง 5 นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ฉ

# พลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนสุก

การผลิตปูนสุก (Quicklime) จะเริ่มด้วยการป้อนวัตถุดิบ (คือ หินปูน) และพลังงานเข้าไปในกระบวนการผลิต ซึ่งเมื่อผ่าน Calcination แล้วผลผลิตที่ได้จากกระบวนการคือ ปูนสุก (Quicklime) หินปูนที่ยังเผาไม่สุก (Uncalcined Limestone) ก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากเตาปูนขาว (Exhausted Gases) และความร้อน ซึ่งในทางทฤษฎีจะไม่มีพลังงานสูญเสีย (Energy Loss) เกิดขึ้น แต่ในทางปฏิบัติแล้วพลังงานที่ใช้จะมากกว่าในทางทฤษฎี เพราะมีพลังงานที่สูญเสีย (Energy Loss) เกิดจากประสิทธิภาพในการใช้พลังงานที่ใช้มีค่าต่ำ ซึ่งสาเหตุของการสูญเสียไปในการผลิตปูนขาว เช่น การสูญเสียพลังงานไปในอากาศที่ปล่อย (Exhaust Gas) ออกมาจากเตาปูนขาว การสูญเสียพลังงานไปในช่วงที่ปล่อยปูนสุกที่ได้ออกมาจากเตาปูนขาว การสูญเสียพลังงานไปในการไล่ความชื้นของหินปูนและเชื้อเพลิง รวมถึงการสูญเสียพลังงานไปในการแผ่รังสีความร้อน การนำความร้อน และการพาความร้อนที่ผิวผนังของเตาปูนขาว เป็นต้น

## ฉ.1 พลังงานที่ใส่เข้าไปในการผลิตปูนสุก

พลังงานที่ใส่เข้าไปในการผลิตปูนสุก จะได้มาจากพลังงานขั้นต้น (Primary Energy) ที่เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความร้อน (Heating Value) และความชื้นของเชื้อเพลิงที่ใช้ โดยสามารถคำนวณหาพลังงานที่ใส่เข้าไปในการผลิตปูนสุกคือ

$$E_{input} = M\left\{ HHV\left(\frac{100 - m_c}{100}\right) - \frac{m_c}{100}\left[C_{pw}(100 - T_{atm}) + LH + C_{pwv}(T_{exh} - 100)\right]\right\}$$

โดยที่ $E_{input}$ = พลังงานที่ใส่เข้าไปในการผลิตปูนสุก, มีหน่วยเป็น MJ

$M$ = น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิต, มีหน่วยเป็น kg

$HHV$ = ค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิงที่ใช้, มีหน่วยเป็น MJ/kg

$m_c$ = ปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงที่ใช้, มีหน่วยเป็น %

$C_{pw}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ, มีหน่วยเป็น MJ/kg $^{\circ}C$

$C_{pwv}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ, มีหน่วยเป็น MJ/kg $^{\circ}C$

$T_{atm}$ = อุณหภูมิบรรยากาศ, มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$

$T_{exh}$ = อุณหภูมิของก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากเตาปูนขาว, มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$

$LH$ = ค่าความร้อนแฝง (Latent Heat) ในกลายเป็นไอ, มีหน่วยเป็น MJ/kg

## ฉ.2 พลังงานที่น้อยที่สุดที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนสุก

พลังงานที่น้อยที่สุดที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนสุก (Minimum Energy Requirement: MER) จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ พลังงานที่ใช้ในการเผาหินปูน พลังงานที่ใช้สำหรับหินปูนที่ยังเผาไม่สุก (Uncalcined Limestone) และมลทิน (Impurity) และพลังงานที่ใช้สำหรับความชื้นในหินปูนและอากาศ

### ฉ.2.1 พลังงานที่ใช้ในการเผาหินปูน

$$E_{CaO} = m_{CaO}\left[C_{pCaCO}\left(T_{dis} - T_{atm}\right) + 2.265\right]$$

โดยที่ $E_{CaO}$ = พลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนสุกบริสุทธิ์, มีหน่วยเป็น MJ

$m_{CaO}$ = น้ำหนักของปูนสุกบริสุทธิ์ที่ได้, มีหน่วยเป็น kg

$C_{pCaCO3}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของหินปูน, มีหน่วยเป็น MJ/kg $^{\circ}$C

$T_{atm}$ = อุณหภูมิบรรยากาศ, มีหน่วยเป็น $^{\circ}$C

$T_{dis}$ = อุณหภูมิในการแยกตัว, มีหน่วยเป็น $^{\circ}$C

### ฉ.2.2 พลังงานที่ใช้สำหรับหินปูนที่ยังเผาไม่สุกและมลทิน

$$E_{h.u.} = \left[\left(m_{unc}C_{pCaCO_3}\right) + \left(m_{imp}C_{pimp}\right)\right]\left(T_{dis} - T_{atm}\right)$$

โดยที่ $E_{h.u.}$ = พลังงานที่ใช้สำหรับหินปูนที่ยังเผาไม่สุก และมลทิน, มีหน่วยเป็น MJ

$m_{unc}$ = น้ำหนักของหินปูนที่ยังเผาไม่สุก, มีหน่วยเป็น kg

$C_{pCaCO3}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของหินปูน, มีหน่วยเป็น MJ/kg $^{\circ}$C

$m_{imp}$ = น้ำหนักของมลทิน, มีหน่วยเป็น kg

$C_{p\,imp}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของมลทิน, มีหน่วยเป็น MJ/kg $^{\circ}$C

$T_{dis}$ = อุณหภูมิในการแยกตัว, มีหน่วยเป็น $^{\circ}$C

$T_{atm}$ = อุณหภูมิบรรยากาศ, มีหน่วยเป็น $^{\circ}$C

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ฉ.2.3 พลังงานที่ใช้สำหรับความชื้นในหินปูนและอากาศ**

$$E_{water} = m_{H_2O}\left[C_{pw}(100 - T_{atm}) + LH + C_{pwv}(T_{exh} - 100)\right]$$

โดยที่ $E_{water}$ = พลังงานที่ใช้สำหรับความชื้นในหินปูนและอากาศ, มีหน่วยเป็น MJ

$m_{H2O}$ = น้ำหนักของความชื้นในหินปูนและอากาศ, มีหน่วยเป็น kg

$C_{pw}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ, มีหน่วยเป็น MJ/kg $^{\circ}$C

$C_{pwv}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ, มีหน่วยเป็น MJ/kg $^{\circ}$C

LH = ค่าความร้อนแฝงในกลายเป็นไอ, มีหน่วยเป็น MJ/kg

$T_{exh}$ = อุณหภูมิของก๊าซที่ถูกปล่อยจากเตาปูนขาว, มีหน่วยเป็น $^{\circ}$C

$T_{atm}$ = อุณหภูมิบรรยากาศ, มีหน่วยเป็น $^{\circ}$C

## ฉ.3 พลังงานที่สูญเสียในการผลิตปูนสุก

ในทางปฏิบัติแล้วพลังงานที่ใช้จะมากกว่าในทางทฤษฎี เพราะมีพลังงานที่สูญเสีย (Energy Loss) ซึ่งสาเหตุของการสูญเสียไปในการผลิตปูนขาว เช่น การสูญเสียพลังงานไปในอากาศที่ปล่อย (Exhaust Gas) ออกมาจากเตาปูนขาว การสูญเสียพลังงานไปในช่วงที่ปล่อยปูนสุกออกมาจากเตาปูนขาว การสูญเสียพลังงานไปในการไล่ความชื้นของหินปูนและเชื้อเพลิง รวมถึงการสูญเสียพลังงานไปในการแผ่รังสีความร้อน การนำความร้อน และการพาความร้อนที่ผิวผนังของเตาปูนขาว

**ฉ.3.1 พลังงานที่สูญเสียไปกับก๊าซที่ถูกปล่อยจากเตาปูนขาว**

$$EL_{flue} = m_{flue}\left[C_{pflue}\left(T_{exh} - T_{atm}\right)\right]$$

โดยที่ $EL_{flue}$ = พลังงานที่สูญเสียไปกับก๊าซที่ถูกปล่อยจากเตาปูนขาว, มีหน่วยเป็น MJ

$m_{flue}$ = น้ำหนักของก๊าซที่ถูกปล่อยจากเตาปูนขาว, มีหน่วยเป็น kg

$C_{pflue}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซที่ถูกปล่อยจากเตาปูนขาว, มีหน่วยเป็น MJ/kg $^{\circ}$C

$T_{atm}$ = อุณหภูมิบรรยากาศ, มีหน่วยเป็น $^{\circ}$C

$T_{exh}$ = อุณหภูมิของก๊าซที่ถูกปล่อยจากเตาปูนขาว, มีหน่วยเป็น °C

**ฉ.3.2 พลังงานที่สูญเสียไปกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น**

$$EL_{CO_2} = m_{CO_2}\left[C_{pCO_2}\left(T_{exh} - T_{atm}\right)\right]$$

โดยที่ $EL_{CO2}$ = พลังงานที่สูญเสียไปกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น, มีหน่วยเป็น MJ

$m_{CO2}$ = น้ำหนักของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น, มีหน่วยเป็น kg

$C_{pCO2}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, มีหน่วยเป็น MJ/kg °C

$T_{atm}$ = อุณหภูมิบรรยากาศ, มีหน่วยเป็น °C

$T_{exh}$ = อุณหภูมิของก๊าซที่ถูกปล่อยจากเตาปูนขาว, มีหน่วยเป็น °C

**ฉ.3.3 พลังงานที่สูญเสียไปกับถ่านหินที่ไม่เผาไหม้**

$$EL_{refuse} = \left(\frac{Ash}{100 - C}\right) m_{lignite} \left(\frac{C}{100}\right) \times 33$$

โดยที่ $EL_{refuse}$ = พลังงานสูญเสียไปกับถ่านหินที่ไม่เผาไหม้, มีหน่วยเป็น MJ

Ash = ปริมาณของเถ้าในถ่านหิน, มีหน่วยเป็น %

$m_{lignite}$ = น้ำหนักของถ่านหินที่ใช้, มีหน่วยเป็น kg

C = ปริมาณของคาร์บอนในถ่านหิน, มีหน่วยเป็น %

**ฉ.3.4 พลังงานที่สูญเสียของผนังเตาปูนขาวเมื่อปูนสุกถูกปล่อยให้เย็นตัว**

$$EL_{Cool} = m_B\left[C_{pB}\left(T_{emp} - T_{atm}\right)\right]$$

โดยที่ $EL_{Cool}$ = พลังงานที่สูญเสียของผนังเตาปูนขาวเมื่อปูนสุกถูกปล่อยให้เย็นตัว, มีหน่วยเป็น MJ

$m_B$ = น้ำหนักของผนังเตาปูนขาว, มีหน่วยเป็น kg

$C_{pB}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของผนังเตาปูนขาว, มีหน่วยเป็น MJ/kg $^{\circ}C$

$T_{atm}$ = อุณหภูมิบรรยากาศ, มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$

$T_{emp}$ = อุณหภูมิของผนังเตาปูนขาว, มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$

**ฉ.3.5 พลังงานที่สูญเสียไปกับถ่านหินเผาไหม้ภายนอกเตาปูนขาว**

$$EL_B = \frac{frac}{100} \times E_{input}$$

โดยที่ $EL_B$ = พลังงานที่สูญเสียไปกับถ่านหินเผาไหม้ภายนอกเตาปูนขาว, มีหน่วยเป็น MJ

frac = ปริมาณถ่านหินเผาไหม้ภายนอกเตาปูนขาว, มีหน่วยเป็น %

$E_{input}$ = พลังงานที่ใส่เข้าไปในการผลิตปูนสุก, มีหน่วยเป็น MJ

**ฉ.3.6 พลังงานที่สูญเสียไปกับการพาความร้อน**

$$EL_{conv} = A_{conv} t_{conv} (T_{out} - T_{atm}) \left[ 2 (T_{out} - T_{atm})^{0.25} \right] \times 10^{-6}$$

โดยที่ $EL_{conv}$ = พลังงานที่สูญเสียไปกับการพาความร้อน, มีหน่วยเป็น MJ

$A_{vonv}$ = พื้นที่ของผนังเตาปูนขาวที่พาความร้อน, มีหน่วยเป็น $m^2$

$t_{conv}$ = เวลาในการพาความร้อน, มีหน่วยเป็น sec

$T_{out}$ = อุณหภูมิที่ผนังเตาปูนขาวด้านนอก, มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$

$T_{atm}$ = อุณหภูมิบรรยากาศ, มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$

**ฉ.3.7 พลังงานที่สูญเสียไปกับการนำความร้อน**

$$EL_{cond} = A_{cond}\, t_{cond}\, (T_{in} - T_{out}) \left(\frac{k}{l}\right) \times 10^{-6}$$

โดยที่ $EL_{conv}$ = พลังงานที่สูญเสียไปกับการนำความร้อน, มีหน่วยเป็น MJ

$A_{vonv}$ = พื้นที่ของผนังเตาปูนขาวที่นำความร้อน, มีหน่วยเป็น $m^2$

$t_{conv}$ = เวลาในการนำความร้อน, มีหน่วยเป็น sec

$T_{in}$ = อุณหภูมิที่ผนังเตาปูนขาวด้านใน, มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$

$T_{out}$ = อุณหภูมิที่ผนังเตาปูนขาวด้านนอก, มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$

K = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผนังเตาปูนขาว, มีหน่วยเป็น $W/m^2K$

l = ความหนาของผนังเตาปูนขาว, มีหน่วยเป็น m

**ฉ.3.8 พลังงานที่สูญเสียไปกับการแผ่ความร้อน**

$$EL_{rad} = A_{rad} t_{rad} T_{rad}^{4} K \times 10^{-6}$$

โดยที่ $EL_{rad}$ = พลังงานที่สูญเสียไปกับการแผ่ความร้อน, มีหน่วยเป็น MJ

$A_{rad}$ = พื้นที่ของผนังเตาปูนขาวที่แผ่ความร้อน, มีหน่วยเป็น $m^2$

$t_{rad}$ = เวลาในการแผ่ความร้อน, มีหน่วยเป็น sec

$T_{rad}$ = อุณหภูมิในการแผ่ความร้อน, มีหน่วยเป็น K

K = ค่าคงที่ของแพลงค์ (Planck's Constant) เท่ากับ $5.77 \times 10^{-8}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย นนทชัย อึ้งชัยพาณิชย์ เกิดเมื่อวันที่ 4 สิงหาคม พ.ศ. 2522 สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเซนต์คาเบรียล เมื่อพ.ศ. 2540 และจบการศึกษาระดับอุดมศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเหมืองแร่ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อพ.ศ. 2544 และเข้าศึกษาต่อปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเหมืองแร่ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2544

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย