

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

สมชาย รัศมีมาน. Cement Data Book. ฉบับที่ 1. สระบุรี : บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน), 2532.

### ภาษาอังกฤษ

Christensen, N. H. Burnability of cement raw mixes at 1400<sup>o</sup>C : the effect of the fineness. Cement and Concrete Research 9 ( 1979 ) : 285-294.

F.L. Smidth. International Cement Production Seminar. Fuel and Firing System. (n.p.) : 1993.

Holderbank. Cement Seminar Process Technology. Flame and Burner. (n.p.) : 1990.

Holderbank. Kiln Operation Seminar. Introduction to Materials Technology. (n.p.) : 1990.

Holderbank. Kiln Operation Seminar. Circulation Phenomena. (n.p.) : 1990.

Johansen, V. Burnability of raw mixes. A theoretical approach to the size of Cao-Particles. 74<sup>th</sup> Annual meet. Am. Cer. Soc. WASHINGTON, 1972.

Johansen, V. Burning of PC-clinker in Rotary Kilns. F.L. Smidth & Co., Laboratories. 1980.

Konopicky, K. Beitrag zur Frage der Ansatzbildung in Drehrohrofen. Zement-Kalk-Gips 4 ( 1951 ) : 240-245.

Lea, F. M. and Parker, T. W. The Quaternary system  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ .  
Building Research Yechnology Paper. No. 16 1935.

Sastry, K. V. S. and Fuerstenau, D. W. Size distribution of agglomerate in  
coalescing dispersed phase system. I & EG Fundamentals. 9  
(1970): 145 – 149.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก.

### การระเหยของธาตุหมุนเวียน

ธาตุระเหย (Volatile Element) ในวัตถุดิบและเชื้อเพลิงที่ใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบ อัลคาไล (Alkali) ซัลเฟอร์ (Sulfur) และคลอรีน (Chlorine) ซึ่งถ้าสารประกอบเหล่านี้เข้าระบบในปริมาณมากเกินไป จะทำให้เกิดปัญหาในการเดินเตาเนื่องจากมีโค้ดพอกสะสมบริเวณ หอบความร้อน (Preheater) และทางเข้าเตา (Kiln Inlet) โดยบางครั้งอาจจำเป็นต้องหยุดเตาเพื่อเคลียร์โค้ดออก

#### ก.1 กลไกการเกิด Circulation Phenomena

ธาตุระเหยจะระเหยกลายเป็นไอในโซนการเผาไหม้ (Burning Zone) ภายในเตาเผา และจะถูกก๊าซร้อน (Hot Gas) ที่ไหลผ่านเตาเผาพัดพาไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และจะเกิดการควบแน่นผสมกับสารป้อน (Kiln Feed) ซึ่งจะกลับเข้าไปในโซนการเผาไหม้อีกครั้ง โดยมีเพียงบางส่วนของธาตุระเหยอีกครั้งที่ขึ้นอยู่กับระดับความสามารถในการกลายเป็นไอ (Degree of Volatility) เราเรียกวัฏจักรนี้ว่า วัฏจักรภายใน (Internal Cycle) โดยวัฏจักรนี้จะเข้าสู่สภาวะสมดุลซึ่งหมายความว่าธาตุระเหยที่เข้าระบบสมดุลกับธาตุระเหยที่ออกจากระบบ

ธาตุระเหยที่ควบแน่นเรียกว่า เกลือหลอมเหลว (Molten Salt) เมื่อรวมตัวกับสารป้อนจะทำให้จุดหลอมเหลวของสารป้อนสูงขึ้น ดังนั้นความสามารถในการไหลของสารป้อน (Fluidibility) จะลดลง ถ้าระบบมีเกลือหลอมเหลวมากเกินไปหรือระดับความสามารถในการกลายเป็นไอสูงจำเป็นต้องมีการติดตั้งท่อแยกสำหรับก๊าซจากเตาเพื่อดึงธาตุระเหยส่วนเกินออกจากระบบ

ธาตุระเหยบางส่วนจะออกไปกับฝุ่นที่แขวนลอยอยู่ในก๊าซทิ้ง ซึ่งจะถูกลดจับอีกครั้งโดยอุปกรณ์แยกฝุ่น และถูกลำเลียงกลับไซโลเก็บสารป้อน วัฏจักรนี้เรียกว่า วัฏจักรภายนอก (External Cycle) โดยปกติปริมาณธาตุระเหยจำนวนเล็กน้อยจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศ ซึ่งจะอยู่ในรูปของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

(SO<sub>2</sub>) แต่จะมีปริมาณมากขึ้นถ้าซัลเฟอร์ในสารป้อนซึ่งอยู่ในรูปของซัลไฟด์ (Sulfide) โดยจะมีอุณหภูมิของการกลายเป็นไอในช่วง 400 – 600 °C

## ก.2 ธาตุระเหยในระบบเตา

### 1 ธาตุระเหยที่เข้าระบบ

ธาตุระเหยเข้าระบบโดยการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิง ซึ่งจะแบ่งตามสภาวะปัญหาการพอกสะสม และการอุดตัน ค่าควบคุมสำหรับการเกิดโค้ตพอกสะสมและการอุดตันในระบบขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ดังนี้

- ระดับความสามารถกลายเป็นไอ (Degree of Volatility)
- การกระจายอุณหภูมิ (Temperature Profile)
- การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (Completeness of Combustion)
- อากาศส่วนเกิน (Excess Air)

#### 1.1 ซัลเฟอร์ จะพบอยู่ในหลายรูปแบบ

- ซัลเฟต (Sulfate) : ยิปซัม (CaSO<sub>4</sub>\*2H<sub>2</sub>O)  
แอนไฮไดรต์ (CaSO<sub>4</sub>)
- ซัลไฟด์ (Sulfide) : ไพไรต์ (Pyrite) , FeS<sub>2</sub>

ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะซัลเฟตเท่านั้น

#### 1.2 อัลคาไล จะพบในดินเหนียว และหินฟันม้า (Feldspar)

#### 1.3 คลอรีน

#### ค่าควบคุมของธาตุระเหยในวัตถุดิบ

คลอรีน น้อยกว่า 0.02 % ระบบอยู่ในสภาวะปกติ

มากกว่า 0.05 % ระบบมีปัญหาการพอกสะสมอย่างรุนแรง

ซัลเฟต น้อยกว่า 0.5 % ระบบอยู่ในสภาวะปกติ

มากกว่า 1.25 % ระบบมีปัญหาการพอกสะสมอย่างรุนแรง

โดยขึ้นอยู่กับปริมาณอัลคาไลและซัลเฟอร์

โปแตสเซียมไดออกไซด์ น้อยกว่า 1.0% ระบบอยู่ในสภาวะปกติ  
มากกว่า 1.5% ระบบมีปัญหาการอุดตันอย่าง  
รุนแรง โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอัลคาไลต่อซัลเฟอร์

โซเดียมไดออกไซด์ โดยปกติมีความสามารถในการระเหยน้อยมาก  
ค่าควบคุมของธาตุดังกล่าวในเชื้อเพลิง

1 ปริมาณซัลเฟอร์ในถ่านหินน้อยกว่า 1.5% ระบบอยู่ในสภาวะปกติ แต่ถ้ามี  
ปริมาณซัลเฟอร์มากกว่า 3.0% จะทำให้เกิดการอุดตันอย่างรุนแรง

2 ปริมาณซัลเฟอร์ในน้ำมันเตาปกติต่ำกว่า 2.5% แต่ถ้ามีปริมาณมากกว่า  
5.0% จะทำให้เกิดการอุดตันในระบบอย่างรุนแรง

3 ปริมาณซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงก๊าซมีน้อยมาก

จุดควบแน่น (Condensing Point) ของธาตุดังกล่าวแต่ละตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 650–1000 °C

- คลอรีน และสารประกอบคลอไรด์ : 650–800 °C

- ซัลเฟต และสารประกอบซัลเฟต : 800–1000 °C

2 ธาตุที่ออกจากระบบ

2.1 คลอไรด์ โดยมากจะกลายเป็นไอ จะไม่มีออกมาพร้อมกับปูนเม็ดซึ่ง  
ปกติวัฏจักรของคลอไรด์เป็นวัฏจักรภายใน ยกเว้นกรณีที่เกิดรั่วและหลุดออกนอกระบบ

2.2 ซัลเฟอร์และอัลคาไล ออกจากระบบโดยรวมในปูนเม็ดในรูปของสาร  
ประกอบได้แก่ โปแตสเซียมซัลเฟต ( $K_2SO_4$ ) โซเดียมซัลเฟต ( $Na_2SO_4$ ) และแคลเซียมซัลเฟต ( $CaSO_4$ )  
แคลเซียมซัลเฟตพบน้อยมากเนื่องจากจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000°C และจะเข้าสู่วัฏจักร  
ของซัลเฟอร์ในระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องใช้อัลคาไลที่มากพอที่จะรวมตัวกับซัลเฟอร์เป็นสาร  
ประกอบอัลคาไลซัลเฟอร์ออกจากระบบ

### ก.3 ความสามารถในการระเหยของธาตุดังกล่าว

ความสามารถในการระเหย (Volatility) เป็นส่วนของธาตุดังกล่าวที่กลายเป็นไอในเตาเผา  
โดยไม่ออกจากระบบ

$$Volatility \approx 1 - \frac{C_{CI}}{C_{HM}} \quad (ก3.1)$$

เมื่อ  $C_{CL}$  : เปอร์เซ็นต์ธาตุระเหยในปูนเม็ด  
 $C_{HM}$  : เปอร์เซ็นต์ธาตุระเหยในสารป้อนร้อน

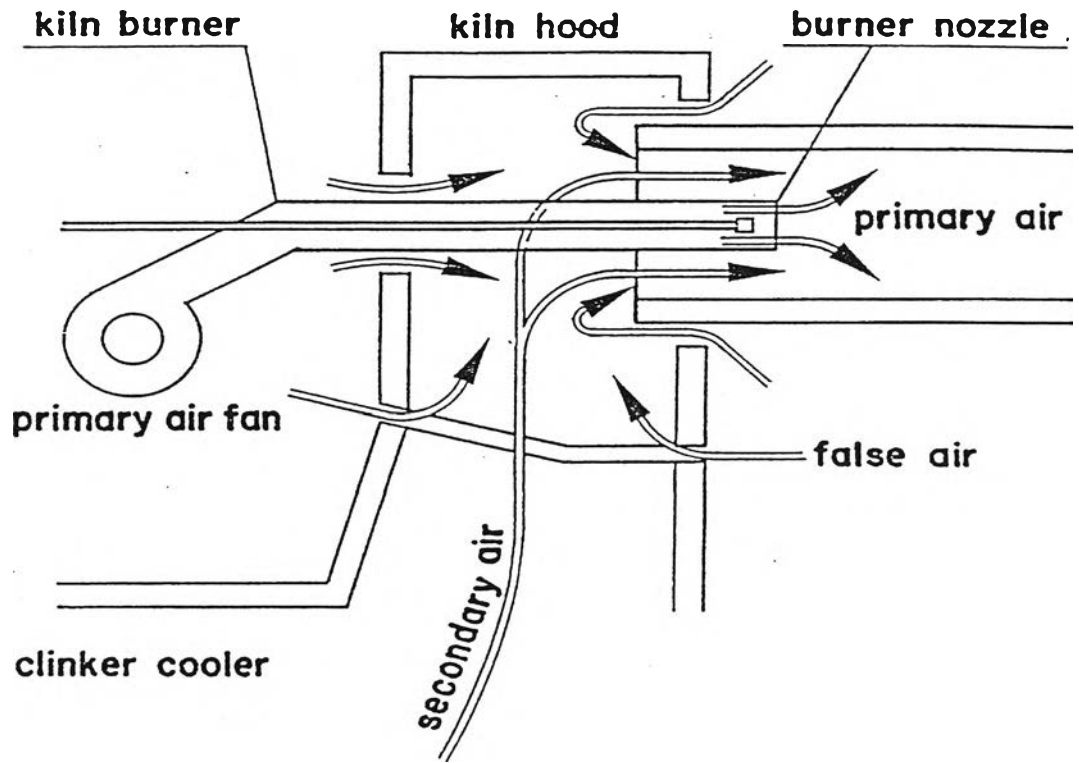
อัลคาไลซัลเฟตในระบบจะระเหยได้น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมซัลเฟต ดังนั้นข้อจำกัดของการระเหยของซัลเฟอร์ก็คือ อัตราส่วนของอัลคาไลต่อซัลเฟอร์ (Molar Alkali / Sulfur Ratio)

$$\text{Molar Alkali / Sulfur Ratio} \approx \frac{\frac{K_2O}{94} + \frac{Na_2O}{62} - \frac{Cl}{71}}{\frac{SO_3}{80}} \quad (ก3.2)$$

กรณีที่มีอัลคาไลในระบบพอเพียงที่จะรวมตัวกับซัลเฟอร์ทั้งหมดที่เข้าระบบจะพบว่า ความสามารถในการระเหยของซัลเฟอร์จะมีค่าประมาณ 0.3 – 0.5 แต่อย่างไรก็ตามหากปริมาณซัลเฟอร์มากกว่าปริมาณอัลคาไลจะเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต ซึ่งจะกลายเป็นไอได้ง่าย ดังนั้นความสามารถในการระเหยของซัลเฟอร์จะสูงประมาณ 0.9 – 1.0 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพปูน

ภาคผนวก ข.

อากาศในการสันดาป



รูปที่ ข.1 แสดงทิศทางการไหลของอากาศในการสันดาป

(Holderbank , 1995 : 1)

จากรูปที่ ข.1 อากาศในการสันดาปประกอบด้วย

- 1 ไพรมาเรียร์ หรืออากาศปฐมภูมิ เป็นอากาศจากพัดลมไพรมาเรียร์ผ่านหัวเผา
- 2 อากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) เป็นอากาศร้อนที่นำมาจากคลูลเลอร์มาใช้ในการเผาไหม้
- 3 อากาศรั่วเข้า เรียกว่า False Air



ภาคผนวก ค.

คุณสมบัติปูนซีเมนต์

ค. 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาประเภทหนึ่ง

คุณสมบัติทางเคมี	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1 - 2532	มาตรฐาน ASTM C 150 ประเภทหนึ่ง	ปูนซีเมนต์ตรา เพชร
ซิลิกอนไดออกไซด์ ต่ำสุดร้อยละ	-	-	-
อะลูมินาออกไซด์ สูงสุดร้อยละ	-	-	-
เฟอร์ริกออกไซด์ สูงสุดร้อยละ	-	-	-
แมกเนเซียมออกไซด์ สูงสุดร้อยละ	6.0	6.0	1.5
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์			
เมื่อมี C <sub>3</sub> A ร้อยละ 8	3.0	3.0	-
เมื่อมี C <sub>3</sub> A มากกว่าร้อยละ 8	3.5	3.5	2.5
การสูญเสียน้ำหนักจากการเผา สูงสุดร้อยละ	3.0	3.0	1.0
กากที่ไม่ละลายในกรดค้าง ร้อยละ	0.75	0.75	0.3
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต สูงสุดร้อยละ	-	-	8.5

ก. 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาประเภทหนึ่ง (ต่อ)

คุณสมบัติทางฟิสิกส์	มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1 - 2532	มาตรฐาน ASTM C 150 ประเภทหนึ่ง	ปูนซีเมนต์ตรา เพชร
ความละเอียด ตารางเซนติเมตร ต่อกรัม สูงสุดร้อยละ	2800	2800	3000
ความอยู่ตัว (Soundness) ร้อยละ	0.8	0.8	0.02
ระยะเวลาการแข็งตัว			
ระยะต้น ไม่น้อยกว่า ชม.:นาทึ	0:45	0:45	1:45
ระยะปลาย ไม่มากกว่า ชม.:นาทึ	6:15	6:15	2:30
แรงอัด (Compressive Strength) กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร			
1 วันในอากาศชื้น 2 วันในน้ำ	ต่ำสุด 85	126	180
1 วันในอากาศชื้น 6 วันในน้ำ	ต่ำสุด 150	197	240
การก่อตัวผิดปกติ (False Set) ต่ำสุดร้อยละ	50	50	85



ค. 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้แรงสูงเร็วประเภทสาม (ต่อ)

คุณสมบัติทางฟิสิกส์	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1 - 2532	มาตรฐาน ASTM C 150 ประเภทสาม	ปูนซีเมนต์ตราสามเพชร
ความอยู่ตัว (Soundness) สูงสุดร้อยละ	0.8	0.8	0.03
ระยะเวลาการเซ็ตตัว			
ระยะคั้น ไม่น้อยกว่า ชม.:นาที่	0:45	0:45	1:15
ระยะปลาย ไม่มากกว่า ชม.:นาที่	6:15	6:15	2:00
แรงอัด (Compressive Strength) กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร			
1 วันในอากาศขึ้น 2 วันในน้ำ	ต่ำสุด 120	126	190
1 วันในอากาศขึ้น 6 วันในน้ำ	ต่ำสุด 210	246	290
การก่อตัวผิดปกติ (False Set) ต่ำสุดร้อยละ	50	50	80



## ประวัติผู้เขียน

นายสมโภชน์ ขธิกุล เกิดวันที่ 13 พฤษภาคม 2507 ที่จังหวัดกระบี่ สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรีเกียรตินิยมอันดับสอง วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาพยาบาลและผดุงครรภ์ จากมหาวิทยาลัย เชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2530 เริ่มทำงานฝ่ายการพยาบาล โรงพยาบาลมหาราชนครเชียงใหม่ 2 ปี ต่อมาได้ศึกษาต่อระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เมื่อ พ.ศ. 2532 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2539 ปัจจุบันทำงานตำแหน่งหัวหน้าแผนกเผาปูน ส่วนผลิตปูนเม็ด บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) โรงงาน 2 สระบุรี

