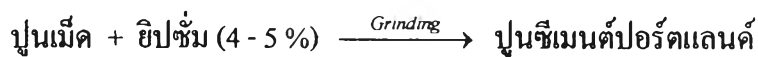


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสารยึดเกาะ (Hydraulic Binder) ที่ได้จากการนำปูนเม็ด ผสมกับยิปซั่ม 4-5 % พร้อมทั้งบดเข้าด้วยกันให้ละเอียด



วัตถุดิบที่ใช้ผลิตปูนเม็ดเป็นสารจำพวกแคลคาเรียส (Calcareous Material) และ อาร์จิลลาเซียส (Argillaceous Material) ซึ่งนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1450 °C ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเคมีในวัตถุดิบไปเป็นสารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติเฉพาะคือ เมื่อรวมตัวกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถขึ้นรูปและรับแรงอัดได้

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในการผลิตปูนเม็ดขึ้นอยู่กับ

- 1 ปริมาณสารประกอบที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา
- 2 พื้นที่ผิวของวัตถุดิบ
- 3 การสัมผัสกันอย่างใกล้ชิดของอนุภาคที่ต่างชนิดกัน
- 4 ส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่เหมาะสม
- 5 ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาปูนสูงเพียงพอ

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของวัตถุดิบไปเป็นปูนเม็ดเกิดขึ้น โดยปฏิกิริยาของแข็ง กับของแข็ง (Solid - Solid Reaction) เรียกว่า Sintering หรือ Clinkering ซึ่งจะทำให้วัตถุดิบเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1450°C อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับของแข็ง และระหว่างของแข็งกับของเหลวจะขึ้นกับเวลาของการทำปฏิกิริยามากกว่าปฏิกิริยาทางเคมีในสารละลาย หรือก๊าซทั่วไป เนื่องจากปฏิกิริยาของแข็งกับของแข็งเกิดยากกว่า ดังนั้นปัจจัยของเวลา (จลนศาสตร์ของปฏิกิริยา)

จึงเป็นสิ่งสำคัญ หนึ่งการเผาปูนที่อุณหภูมิสูงมากเกินไป (มากกว่า 1450 °C) เป็นสิ่งที่ไม่ควรกระทำในเชิงปฏิบัติและในแง่ต้นทุนการผลิต

2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์เป็นวัตถุดิบที่ให้ธาตุหลัก 4 ชนิดคือ ซิลิกอน (Silicon) อะลูมิเนียม (Aluminium) เหล็ก (Iron) และแคลเซียม (Calcium) โดยทั่วไปธาตุเหล่านี้จะอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ซึ่งแนวทางในการเตรียมวัตถุดิบเป็นสารผสมดิบ (Raw Mix) ที่มีส่วนประกอบของธาตุทั้ง 4 ชนิดในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถกระทำได้ 3 แนวทางคือ

- 1 ใช้หินซีเมนต์จากธรรมชาติ วัตถุดิบชนิดนี้หาได้ลำบากจึงเป็นแนวทางที่กระทำได้ยาก
- 2 ใช้สารประกอบบริสุทธิ์ของธาตุแต่ละตัวมาผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งเป็นวิธีที่ยู่ยากและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายตลอดจนพลังงาน

- 3 เตรียมสารผสมดิบจากวัตถุดิบต่างชนิดกันระหว่างหินปูนและหินเชลนั้นคือ แคลเซียม คาร์บอเนตและซิลิกาจะต้องนำมาผสมในสัดส่วนที่ถูกต้องและเหมาะสม สำหรับอะลูมินาและเหล็กสามารถปรับแก้ได้โดยการเติมวัตถุดิบสำหรับปรับแก้ (Corrective Material) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการเตรียมสารผสมดิบในอุตสาหกรรมซีเมนต์

2.2.1 ประเภทของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์

- 1 แคลคาเรียส เป็นวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า 75% ได้แก่ หินปูน (Limestone) หินปูนชนิดมาร์ล (Marly Limestone) หินชอล์ค (Chalk) หินปูนชนิดคอร์รัล (Coral Limestone) หินอ่อน (Marble) หินปูนเชล (Shale Limestone) เป็นต้น สำหรับอุตสาหกรรมซีเมนต์จะใช้หินปูนคุณภาพดีประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต 80-85 % ซึ่งจะช่วยให้ง่ายต่อการบด และการทำให้เป็นเนื้อเดียว โดยต้องการปริมาณส่วนประกอบอื่นผสมเพียงเล็กน้อย

- 2 อาร์จิลลาเซียส เป็นวัตถุดิบที่ประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ ซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนตน้อยกว่า 75 % ได้แก่ อาร์จิลลาเซียสชนิดมาร์ล (Argillaceous Marl) หินมาร์ล (Marl) ดินเหนียวชนิดมาร์ล (Marly Clay) ดินเหนียว (Clay) และหินเชล (Shale) เป็นต้น

- 3 องค์ประกอบปรับแก้ (Corrective Component) เป็นวัตถุดิบสำหรับปรับแก้สัดส่วนในส่วนผสมของสารผสมดิบให้ได้ตามที่ต้องการได้แก่

- 3.1 หินปูนคุณภาพดี เพื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมออกไซด์
- 3.2 ควอทซ์ (Quartz) สำหรับเพิ่มปริมาณซิลิกาออกไซด์
- 3.3 บอกไซต์ (Bauxite) สำหรับเพิ่มปริมาณอะลูมินาออกไซด์
- 3.4 ไอร์ออน ออร์ (Iron Ore) หรือไพไรต์ แอช (Pyrite Ash) สำหรับเพิ่มปริมาณเฟอร์ริกออกไซด์

ตารางที่ 2.1 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีสำหรับวัตถุดิบกลุ่มแคลคาเรียส

ผลการวิเคราะห์	หินปูน	หินปูนคุณภาพดี	หินแคลคาเรียสมาร์ต
Ignition Loss	42.90	42.90	30.60
SiO ₂	5.20	0.70	13.80
Al ₂ O ₃	0.81	0.68	7.00
Fe ₂ O ₃	0.54	0.08	4.60
CaO	48.60	54.50	38.40
MgO	1.90	0.59	1.30
SO ₃	0.05	0.25	0.43
K ₂ O	0.33	0.01	0.86
Na ₂ O	0.05	0.16	2.60
TiO ₂	0.06	0.01	0.21
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01	0.02
Mn ₂ O ₃	0.05	0.01	0.29
P ₂ O ₅	0.04	0.01	0.25
Cl	0.02	0.01	0.04
F	0.01	0.01	0.01

(Holderbank , 1990 : 10)

4 สารเติมแต่ง (Additive) มีวัตถุประสงค์เพื่อ

- 4.1 ปรับปรุงกระบวนการเผาปูนเช่น การเติม CaF₂ ในสารผสมคิบ
- 4.2 การควบคุมเวลาเซตติง (Setting Time) ของซีเมนต์โดยการเติมอีปซั่ม หรือ แอนไฮไดรต์ผสมกับปูนเม็ดในการผลิตปูนซีเมนต์

ข้อกำหนดปัจจัยสำหรับการเลือกวัสดุคืบ

- ส่วนประกอบทางเคมีและแร่ธาตุในวัสดุคืบ
- อิทธิพลต่อกระบวนการเผาปูน
- อิทธิพลต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2.2 ผลวิเคราะห์ทางเคมีของวัสดุคืบกลุ่มอาร์จิลลาเซียส

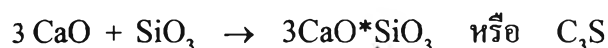
ผลการวิเคราะห์	หินเซต	หินมาร์ล	ดินเหนียว
Ignition Loss	5.30	32.20	12.50
SiO ₂	64.10	22.70	45.90
Al ₂ O ₃	13.60	3.90	23.90
Fe ₂ O ₃	6.10	2.40	15.50
CaO	1.80	32.90	0.72
MgO	2.90	3.30	0.33
SO ₃	0.03	0.95	0.03
K ₂ O	2.70	0.59	0.01
Na ₂ O	1.90	0.19	0.11
TiO ₂	0.67	0.39	0.86
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01	0.01
Mn ₂ O ₃	0.05	0.04	0.20
P ₂ O ₅	0.18	0.03	0.06
Cl	0.01	0.01	0.04
F	0.01	0.01	0.01

(Holderbank , 1990 : 11)

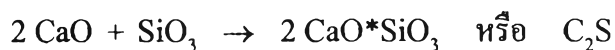
2.2.2 สารประกอบซีเมนต์

เกิดจากการรวมตัวของออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบทางเคมีในวัตถุดิบที่อุณหภูมิ 1450 °C มีลักษณะเป็นผลึกในปูนเม็ดโดยมีบางส่วนที่ยังไม่เกิดการรวมตัวและยังคงอยู่ในรูปของออกไซด์ แต่มีเพียงส่วนน้อย สารประกอบซีเมนต์ที่เกิดขึ้นมีหลายชนิด และที่มีความสำคัญซึ่งให้คุณสมบัติทางไฮดรอลิก ได้แก่

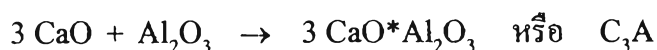
1 เอไลต์ (Alite) เป็นสารประกอบที่เกิดมากที่สุดให้คุณสมบัติด้านความแข็งแรงในระยะแรก (Early Strength) ปกติจะมีจำนวนประมาณ 40-80 % เกิดจากแคลเซียมออกไซด์ 3 โมเลกุลรวมตัวกับซิลิกาออกไซด์ 1 โมเลกุล ที่อุณหภูมิ 1450 °C เกิดเป็นสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต ดังสมการ



2 บีไลต์ (Belite) เป็นสารประกอบที่เกิดมากรองลงมาจากเอไลต์ให้คุณสมบัติความแข็งแรงระยะปลาย (Later Strength) ปกติมีจำนวน 0-30 % เกิดจากแคลเซียมออกไซด์ 2 โมเลกุลรวมตัวกับซิลิกาออกไซด์ 1 โมเลกุล ที่อุณหภูมิประมาณ 1200 °C เกิดเป็นไดแคลเซียมซิลิเกต ดังสมการ



3 ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต เป็นสารประกอบที่ให้คุณสมบัติความแข็งตัวได้เร็ว ทำปฏิกิริยากับน้ำได้เร็ว และเกิดความร้อนสูงกว่าสารประกอบอื่น โดยไม่ให้คุณสมบัติความแข็งแรงหรือกล่าวคือ ให้คุณสมบัตินี้ซึ่งพิจารณาได้จากความรวดเร็วในการก่อตัวของปูนซีเมนต์ แต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะไม่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของเกลือซัลเฟตในน้ำทะเลได้ เกิดจากแคลเซียมออกไซด์ 3 โมเลกุลรวมตัวกับอะลูมินาออกไซด์ 1 โมเลกุล เกิดเป็นไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ดังสมการ



4 เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ เป็นสารประกอบซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำได้รวดเร็วและเกิดความร้อน ไม่ให้คุณสมบัติความแข็งแรง เป็นตัวบ่งบอกถึง

ของปูนซีเมนต์ ถ้ามีปริมาณมากปูนซีเมนต์จะมีสีเข้มซึ่งมาจากเฟอร์ริกออกไซด์ที่ใช้ผสมเป็นฟลักซิงเอเจนต์ (Fluxing Agent) เพื่อช่วยในการเผาปูน เกิดจากแคลเซียมออกไซด์ 4 โมเลกุลรวมตัวกับอะลูมินาออกไซด์ 1 โมเลกุลและเฟอร์ริกออกไซด์ 1 โมเลกุล เกิดเป็นเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ คังสมการ



ตารางที่ 2.3 อิทธิพลของสารประกอบหลักแต่ละชนิด

ส่วนประกอบในวัตถุดิบ	อิทธิพลต่อกระบวนการเผาปูน	อิทธิพลต่อคุณภาพซีเมนต์
CaO SiO ₂		มีผลต่อความแข็งแรงของปูนซีเมนต์
Al ₂ O ₃	อุณหภูมิในการเผาปูนต่ำ	เป็นตัวช่วยส่งเสริมความแข็งแรงในระยะแรก
Fe ₂ O ₃	อุณหภูมิในการเผาปูนต่ำ	ไม่มีผลต่อความแข็งแรงของปูนซีเมนต์

(Holderbank , 1990 : 13)

ตารางที่ 2.4 ปริมาณสารประกอบซีเมนต์

Ideal	Real	% in PC
C ₃ S	Alite : 3 CaO*SiO ₂	40 - 80
C ₂ S	Belite : 2 CaO*SiO ₂	0 - 30
C ₃ A	Aluminate : 3 CaO*Al ₂ O ₃	7 - 15
C ₄ AF	Ferrite : 4 CaO*Al ₂ O ₃ *Fe ₂ O ₃	4 - 15

(Holderbank , 1990 : 13)

2.2.3 อิทธิพลของส่วนประกอบทางเคมีต่อกระบวนการผลิต

ในกระบวนการผลิตปูนเม็ดจะต้องมีการพิจารณาอัตราส่วนของธาตุที่สำคัญ สำหรับการควบคุมคุณภาพ เพราะว่าอัตราส่วนเหล่านี้ใช้เป็นแนวทางในการปรับแก้ส่วนประกอบทางเคมีของสารผสมคิบให้มีความเหมาะสม

1 อัตราส่วนของซิลิกา (Silica Modulus)

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2.1)$$

อัตราส่วนของซิลิกาเป็นตัวบ่งชี้ว่าสารป้อนมีปริมาณซิลิกามากหรือน้อย

ปริมาณของซิลิกา	อัตราส่วนของซิลิกา
มาก	2.5 - 3.5
ปานกลาง	2.0 - 2.5
น้อย	1.7 - 2.0

1.1 กรณีอัตราส่วนของซิลิกาสูง จากสมการ 2.1 เมื่อปริมาณของเฟอร์ริกออกไซด์และอะลูมินาในสารป้อนมีน้อยจะมีผลทำให้

- สารป้อนเผายาก
- เกิดปริมาณ C_3S ในปูนเม็ดน้อย
- เพิ่มปริมาณของ C_2S ในปูนเม็ด
- เวลาเซตติงอยู่ในช่วงควบคุม
- ให้ความแข็งแรงในระยะแรกของปูนต่ำ แต่เมื่อนานไปจะให้ความแข็งแรงสูงขึ้น

1.2 กรณีอัตราส่วนของซิลิกิต่ำ จากสมการ 2.1 เมื่อปริมาณของเฟอร์ริกออกไซด์และอะลูมินาในสารป้อนมีมากจะทำให้

- สารป้อนเผาง่าย
- ลดอุณหภูมิใช้ในการเผาปูน
- มีแนวโน้มที่จะเกิดแหวนปลายไฟในเตาเผา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ LSF ต่ำ
- เกิดปริมาณ C_3S ในปูนเม็ดมาก
- ให้ความแข็งแรงในระยะแรกของปูนสูงขึ้นแต่เมื่อนานไปเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

2 อัตราส่วนของอะลูมินา (Alumina Modulus)

$$AM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (2.2)$$

อัตราส่วนอะลูมินาเป็นตัวบ่งชี้ว่าสารป้อนมีปริมาณอะลูมินามากหรือน้อย

ปริมาณอะลูมินา อัตราส่วนของอะลูมินา

มาก 2.5 - 3.0

ปานกลาง 1.5 - 2.0

น้อย 1.0 - 1.5

2.1 กรณีอัตราส่วนอะลูมินาสูง จากสมการ 2.2 เมื่อปริมาณของอะลูมินาเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณของเฟอร์ริกออกไซด์คงเดิมหรือลดลงจะทำให้

- เกิดปริมาณ C_3S ในปูนเม็ดมาก
- ให้ความร้อนสูงในขณะเซตตัว
- มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของน้ำทะเลและสารเคมีต่ำ
- เวลาเซตตั้งเร็ว

2.2 กรณีอัตราส่วนอะลูมินาต่ำ จากสมการ 2.2 เมื่อปริมาณของเฟอร์ริกออกไซด์เพิ่มขึ้นจะทำให้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาปูนลดลง
- ปริมาณเฟสของเหลวมากขึ้น
- เกิดการปั้นเม็ดเร็ว
- เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของน้ำทะเล
- เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ

3 Lime Saturation Factor (LSF)

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของไลม์ (LIME) ที่มีอยู่จริงกับปริมาณของไลม์สูงสุดตามทฤษฎี ซึ่งเกิดจากไลม์ที่ทำปฏิกิริยากับซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ ดังนั้นค่า LSF จึงขึ้นอยู่กับปริมาณของไลม์ที่มากที่สุดที่สามารถทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่เหมาะสม นั่นคือ ไม่มีฟรีไลม์หรือแคลเซียมออกไซด์เหลืออยู่ในปูนเม็ด วัตถุประสงค์จะต้องมีความละเอียดและผสมกันเป็นอย่างดี การเผาไหม้เพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ในเตาเผา

$$\text{LSF} = \frac{100 * \text{CaO}}{2.8 * \text{SiO}_2 + 1.18 * \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65 * \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (2.3)$$

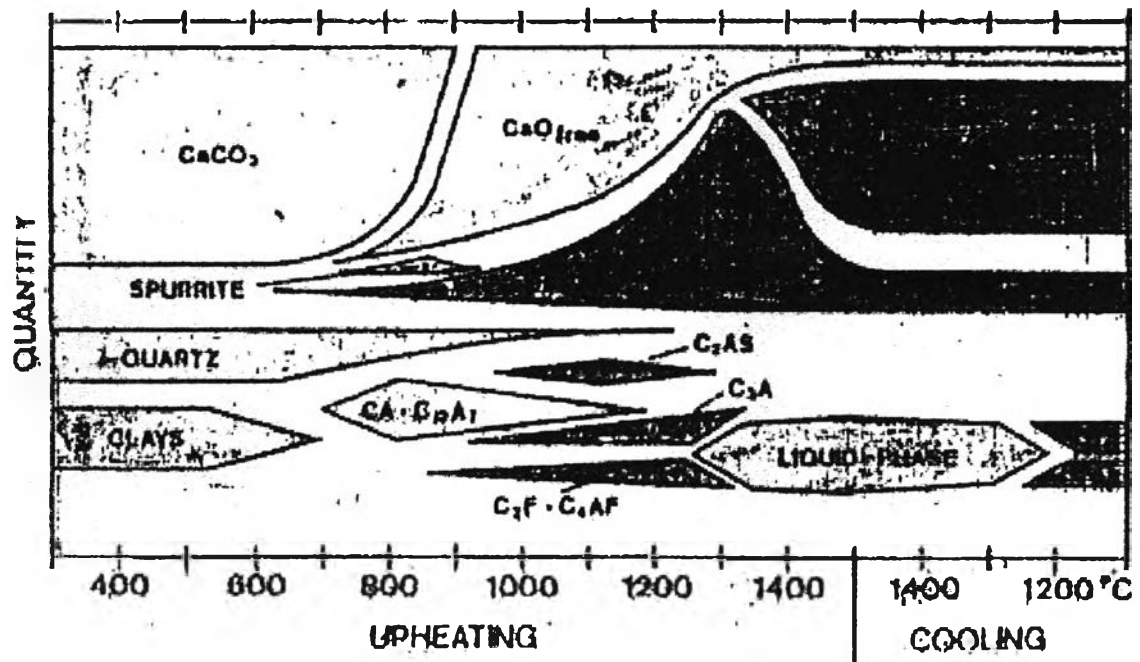
ปริมาณไลม์	LSF
มาก	102
ปานกลาง	97
น้อย	90

2.3 กระบวนการผลิตปูนเม็ด

หลังจากวัตถุดิบแต่ละชนิดถูกผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสม ตามความต้องการขององค์ประกอบทางเคมี โดยทำการบดให้ละเอียดซึ่งมีความละเอียดที่ 90 ไมครอนประมาณ 10-15 % ก่อนที่จะผสมกับฝุ่นที่คัดจับได้จากหอเย็นตัว (Cooling Tower) และเครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้า (Electrostatic Precipitator) แล้วนำไปเก็บไว้ในไซโลพร้อมทั้งทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenizing) เพื่อให้องค์ประกอบทางเคมีมีค่าความเบี่ยงเบนของคุณภาพน้อยที่สุดก่อนที่จะทำการป้อนเข้าระบบการเผาปูน

กระบวนการที่เกิดขึ้นในระบบต้องการอุณหภูมิค่อนข้างสูง เพื่อให้เกิดการสลายตัวของวัตถุดิบแต่ละชนิด และเกิดการรวมตัวกันของออกไซด์อิสระเป็นสารประกอบซิเมนต์ในปูนเม็ด ได้แก่ เอไลต์ บีไลต์ ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ เป็นต้น

นอกจากนี้ยังสามารถแสดงในรูปของกราฟิกที่เรียกว่า ควอไซ-ควอดริเตททิฟ แวริเอชันของแร่ธาตุสัมพันธ์กับอุณหภูมิคงรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 Quasi – Quantitative Variation of Minerals with Temperature

(Holderbank , 1990 : 7)

ตารางที่ 2.5 อิทธิพลของส่วนประกอบทางเคมีต่อกระบวนการผลิต

อัตราส่วน	อิทธิพลต่อกระบวนการเผาปูน (แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลง)	อิทธิพลต่อองค์ประกอบของปูนเม็ด
อัตราส่วนซิลิกาสูง	ปริมาณอะลูมินาและเฟอร์ริกออกไซด์น้อยทำให้เผาปูนยากต้องใช้อุณหภูมิในการเผาปูนสูงขึ้น	ปริมาณ C_3A และ C_4AF ในปูนเม็ดลดลง
อัตราส่วนซิลิกาต่ำ	<p>กรณีที่ปริมาณอะลูมินาและเฟอร์ริกออกไซด์มากทำให้เผาปูนง่าย และใช้อุณหภูมิในการเผาปูนต่ำ</p> <p>กรณีที่ปัจจัยอิมตัวของไลม์ต่ำจะทำให้เกิดแหวนในเตา (Ring Formation)</p>	ปริมาณ C_3A และ C_4AF ในปูนเม็ดมากขึ้น
อัตราส่วนอะลูมินาสูง	<p>กรณีที่ปริมาณอะลูมินามาก แต่ปริมาณเฟอร์ริกออกไซด์ไม่เปลี่ยนแปลงมีผลทำให้อุณหภูมิในการเผาปูนต่ำ</p> <p>กรณีที่ปริมาณอะลูมินามากและเฟอร์ริกออกไซด์น้อย ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของการเผาปูน</p>	ปริมาณ C_3A เพิ่มขึ้นแต่ C_4AF จะลดลง
อัตราส่วนอะลูมินาต่ำ	กรณีที่ปริมาณอะลูมินาน้อย และเฟอร์ริกออกไซด์มากมีผลทำให้ใช้อุณหภูมิในการเผาปูนต่ำ และเร่งปฏิกิริยาการเผาปูน	ปริมาณ C_3A ลดลงแต่ C_4AF เพิ่มขึ้น
ปัจจัยอิมตัวของไลม์สูง	เผาปูนยาก	ปริมาณ C_3S มาก แต่ C_2S น้อย
ปัจจัยอิมตัวของไลม์ต่ำ	เผาปูนง่าย	ปริมาณ C_3S น้อย แต่ C_2S มาก

(Holderbank , 1990 : 15)

กระบวนการผลิตปูนเม็ดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตารางที่ 2.6 แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยา 5 ลำดับแรกซึ่งเป็นแต่เพียงการสลายตัวของแร่ธาตุในวัตถุดิบและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งจะถูกกล่าวถึงในแง่ของอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังอนุภาคของแข็ง สำหรับปฏิกิริยา 2 ลำดับสุดท้ายเป็นปฏิกิริยาการเกิดปูนเม็ดในช่วงการเผา (Burning Zone) โดยอาศัยการแพร่ผ่านขององค์ประกอบที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเข้าไปในปูนเม็ดหลอมเหลว (Clinker Melt)

ปฏิกิริยาทางเคมีทั้งหมดที่เกิดขึ้นเป็นการเปลี่ยนรูปของส่วนผสมของแร่ธาตุในสารป้อนไปเป็นสารประกอบซีเมนต์ และเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic Reaction) ความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา (Heat of Reaction) เป็นความร้อนที่ต้องการทางทฤษฎีสำหรับการเกิดปูนเม็ดและอาจเปลี่ยนแปลงไปตามส่วนประกอบของแร่ธาตุในสารป้อน ซึ่งจากตารางที่ 2.7 ความร้อนที่สูญเสียออกไปจากระบบจะอยู่ในรูปของก๊าซทิ้ง (Exhaust Gas) จากคูลเลอร์ และก๊าซทางออก (Exit Gas) จากเตาเผาและหอบความร้อน (Preheater) ความร้อนเหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้บวัตุดิบและเชื้อเพลิงเพื่อไถ่ความชื้น

ตารางที่ 2.6 ลำดับการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการเผาปูน

Temp. Range (°C)	Characteristic Process	Type of Process
- 100	อบแห้งและการระเหยของน้ำ	ปฏิกิริยาคูดความร้อน
100 - 400	การระเหยของน้ำในผลึก	ปฏิกิริยาคูดความร้อน
400 - 750	การสลายตัวของสินแร่ในดินเหนียวเคลย์ Kaolinite → Metakaolinite	ปฏิกิริยาคูดความร้อน
600 - 900	การสลายตัวของเมตะคาโอลินไนต์ไปเป็นออกไซด์อิสระ	ปฏิกิริยาคูดความร้อน
600 - 1000	การสลายตัวของคาร์บอนเนตไปเป็นออกไซด์อิสระ	ปฏิกิริยาคูดความร้อน
800 - 1300	การรวมตัวของออกไซด์อิสระไปเป็นธาตุในปูนเม็ด	ปฏิกิริยาคายความร้อน
1300 - 1380	การเกิดปูนเม็ดหลอมเหลวจากอะลูมินาและเฟอร์ไรต์	ปฏิกิริยาคูดความร้อน
1250 - 1500	การเกิดเอนไคลต์	ปฏิกิริยาคูดความร้อน

(Holderbank , 1990 : 18)

ตารางที่ 2.7 ปริมาณความร้อนทางทฤษฎีในกระบวนการผลิตปูนเม็ด

Heat of Reaction	Kcal / kg-clinker
Evaporation of Combined Water	20
Decomposition of Clay Minerals	35
Decomposition of Carbonates	475
Heat of Formation Clinker Minerals	-130
Heat of Combustion in Rawmeal	-15
Total Heat of Reaction	385

(FLS , 1992 : 19)

2.4 เชื้อเพลิงที่ใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์

เชื้อเพลิงเป็นสารที่ให้ความร้อนออกมาเมื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน โดยเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว เชื้อเพลิงตามลักษณะทางกายภาพแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยทั่วไปส่วนประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงประกอบด้วยธาตุหลักคือ คาร์บอน และไฮโดรเจน นอกจากนี้ยังมีไนโตรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และสารอนินทรีย์ ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 Ultimate Analysis of Fuels (% by weight)

ธาตุหลัก	ถ่านหิน	น้ำมัน	ก๊าซธรรมชาติ
คาร์บอน	88 - 90	83 - 87	75 - 77
ไฮโดรเจน	4 - 5	11 - 13	23 - 25
ออกซิเจน	3 - 4	0.1 - 0.4	น้อยมาก
ซัลเฟอร์	1 - 2	1 - 3	น้อยมาก

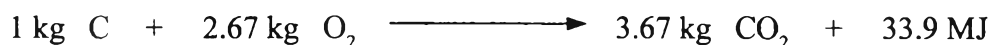
(FLS , 1992 : 13)

ซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบที่มีปริมาณน้อยแต่มีความสำคัญมากเนื่องจากมีผลต่อคุณภาพของปูนเม็ด และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้สภาวะการเป็นไอระเหยของซัลเฟอร์สามารถเกิดการสะสมในระบบของเตาเผาและพอกตัวสะสม จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องควบคุมปริมาณซัลเฟอร์ทั้งในวัตถุดิบและเชื้อเพลิงอย่างเข้มงวด

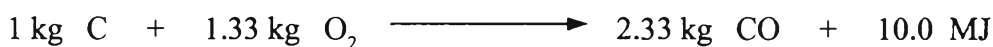
ปูนเม็ดสามารถดูดซับซัลเฟอร์ในรูปของซัลเฟต ซึ่งจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของวัตถุดิบ และสถานะการเผาปูน (อุณหภูมิ) ส่วนเกินของซัลเฟอร์ที่มากเกินไปจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ ในรูปของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและอาคารสิ่งก่อสร้าง

ส่วนประกอบธาตุคาร์บอน และไฮโดรเจนของเชื้อเพลิงมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ เป็นตัวให้ความร้อนของการเผาไหม้ (Heat of Combustion) หรือค่าความร้อน (Calorific Value) ซึ่งทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนในอากาศให้ความร้อนในรูปของความร้อนอิสระ (Free Heat)

1. การเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Complete Combustion) ของคาร์บอน

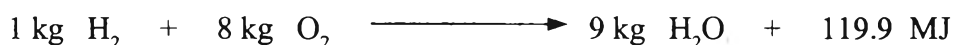


2. การเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) ของคาร์บอน



การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ นอกจากเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมแล้วยังเป็นการสูญเสียพลังงานไปส่วนหนึ่ง

3. การเผาไหม้ของไฮโดรเจน



2.4.1 เชื้อเพลิงของแข็ง

COLLIER 's Encyclopedia ให้คำจำกัดความของถ่านหินว่าเป็นสารซึ่งติดไฟ เกิดจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์และมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี-กายภาพ ผ่านกระบวนการทางธรณีวิทยา ซึ่งจะมีผลิตภัณฑ์กึ่งกลาง (Intermediate Product) ได้แก่ พีท ลิกไนต์ และแอนทราไซต์ ตามลำดับ โดยส่วนประกอบคาร์บอน และค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่สารระเหยง่าย (Volatile Matter) จะลดลง ดังนั้นถ่านหินจึงจำแนกตามสารระเหย และ/หรือ ค่าความร้อนได้ ดังตาราง ที่ 2.9

การวิเคราะห์ :

1 Proximate Analysis ครอบคลุมถึงการวิเคราะห์หาความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และเถ้า (Ash) โดยวิธีการหายน้ำหนัก (Loss of Weight) ตามมาตรฐาน ASTM จัดเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว

2 Ultimate Analysis เป็นการหาส่วนประกอบพื้นฐานซึ่งต้องใช้อุปกรณ์พิเศษและความชำนาญเฉพาะทาง

ตารางที่ 2.9 Net Calorific Value of Various Fuels

ชนิดของเชื้อเพลิง	MJ / kg	cal / g	BTU / lb
ถ่านหิน	33 – 35	7800 - 8400	14100 – 15200
น้ำมันเตา	40 – 41	9600 - 9900	17300 - 17800
	MJ / Nm ³	kcal / Nm ³	BTU / cf
ก๊าซธรรมชาติ	34 - 38	8000 - 9000	900 - 1000

(FLS , 1992 : 15)

2.1 ซัลเฟอร์ วิเคราะห์โดยการเผาไหม้และตรวจสอบ

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในก๊าซจากการเผาไหม้ (Combustion Gas) โดย Infrared Absorption หรือ คาลอรีมิเตอร์

2.2 คลอรีน วิเคราะห์จากของเหลวที่เหลือใน Calorimetric

Bomb โดยทำการไตเตรตด้วยซิลเวอร์ไนเตรด

2.3 เถ้า (ASH) เป็นสิ่งที่จำเป็นในการปรับแก้สารผสมดิบ

ถ้าปริมาณสารระเหยในถ่านหินต่ำมีค่าต่ำ จะทำให้อุณหภูมิของถ่านหินติดไฟช้า และส่งผลให้รูปร่างเปลวยาว ในทางตรงข้ามถ่านหินที่มีสารระเหยสูงจะติดไฟง่ายและเสี่ยงต่อการระเบิดจากการติดไฟขึ้นเอง (Self-ignition) นอกจากนี้ความละเอียดของฝุ่นถ่านหินมีความสำคัญต่อลักษณะของเปลวในเตาเผา โดยที่ถ่านหินที่มีสารระเหยต่ำจะต้องบดให้ละเอียดมากขึ้น ดังรูปที่ 2.2

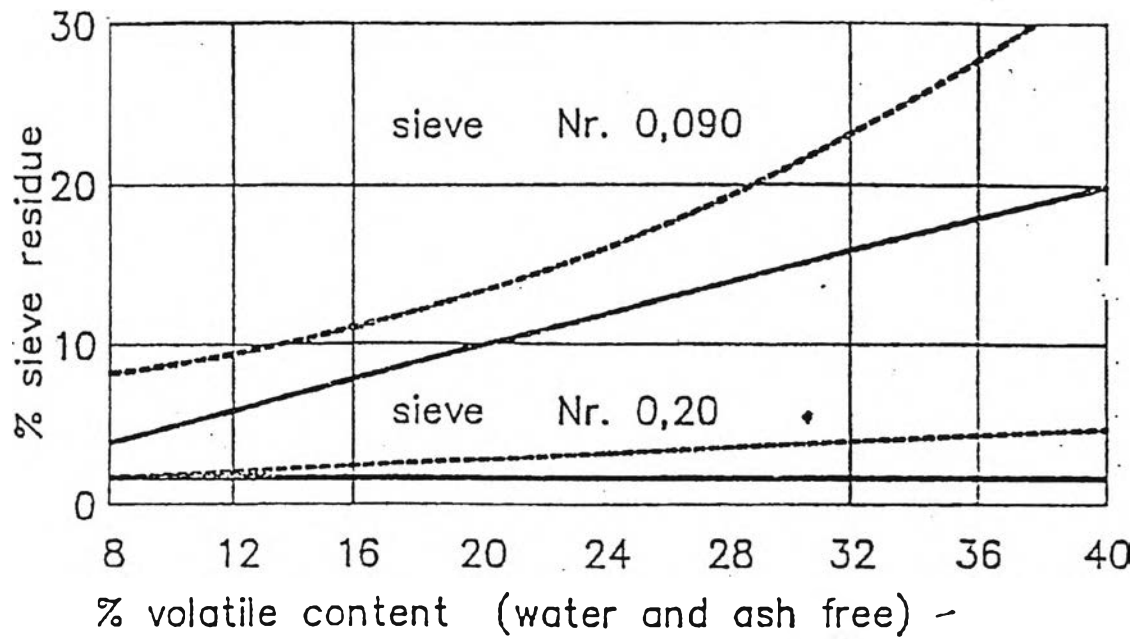
การไล่ความชื้นออกจากถ่านหินไม่ควรทำให้ถ่านหินแห้งเกินไป เพราะจะทำให้ฝุ่นถ่านหินติดไฟยาก ปฏิริยาของคาร์บอนกับก๊าซออกซิเจนอาศัยน้ำเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิริยาซึ่งจำเป็นต้องมีความชื้นคงเหลือ (Residual Moisture) ประมาณ 1.0 - 1.5 %

2.4.1.1 ข้อกำหนดสำหรับระบบเผาไหม้ถ่านหิน (Coal Firing System)

ในมุมมองของการปฏิบัติงาน รูปที่ 2.3 และ 2.4 สะท้อนให้เห็นถึงกฎเกณฑ์ซึ่งสามารถใช้เป็นหลักในการเลือกระบบการเผาไหม้ได้ แต่อย่างไรก็ตามไม่มีข้อกำหนดการเลือกกฎเกณฑ์มาใช้อย่างถูกต้องแน่นอนตายตัว แต่ละกรณีเป็นการจำกัดขอบเขตการตัดสินใจสำหรับการกำหนดระบบการเผาไหม้ ได้แก่

1 ขนาดของเตาเผา

ในระบบการเผาไหม้โดยตรง (Direct Firing) พบว่าความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพถ่านหินจะมีอิทธิพลต่อการเดินเตาเผาที่มีขนาดเล็กกว่า ซึ่งเป็นข้อจำกัดในเชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับการตัดสินใจเลือกระบบการเผาไหม้

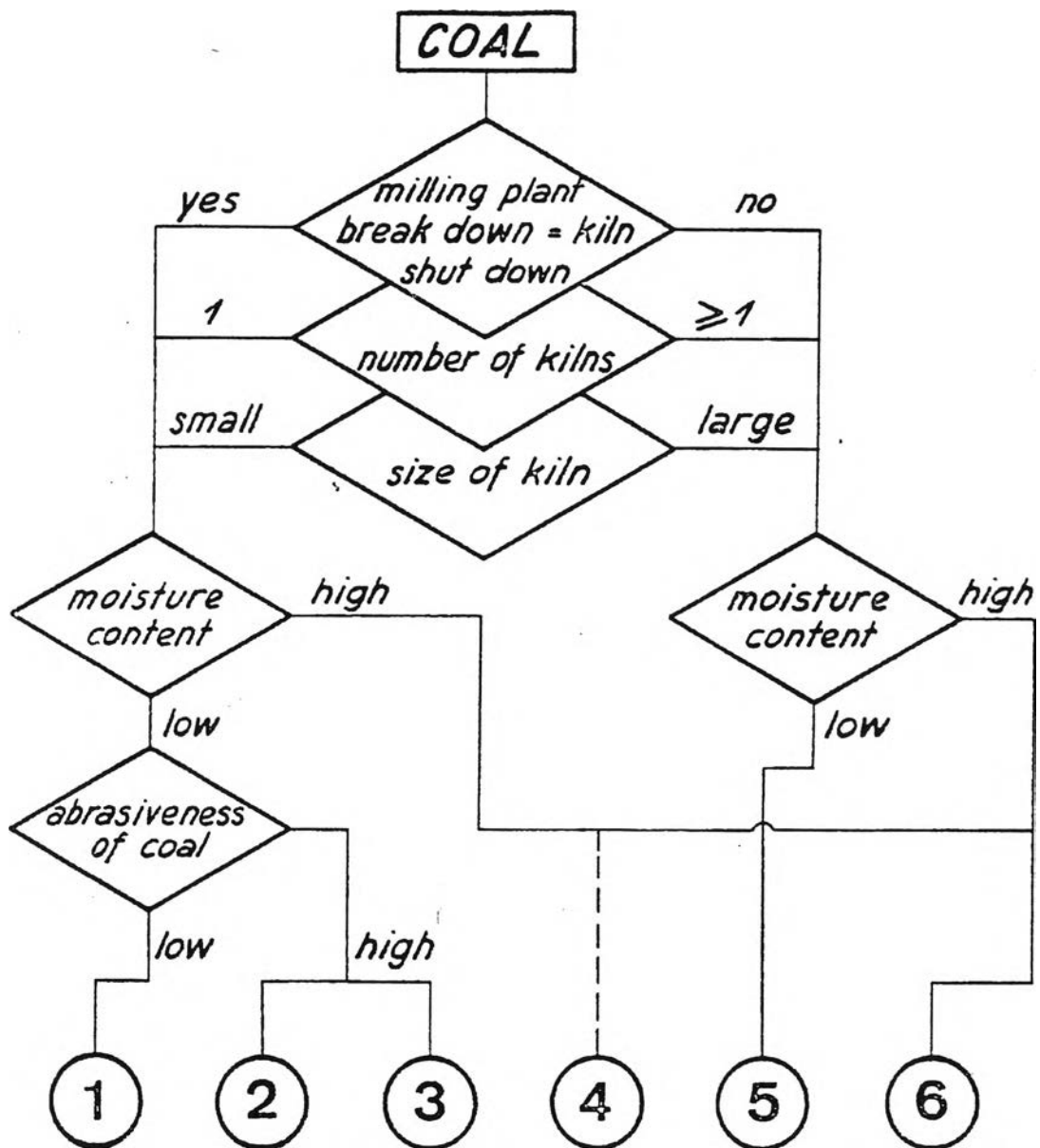


----- typical for boilers/cooled furnaces

————— ideal for rotary kiln systems

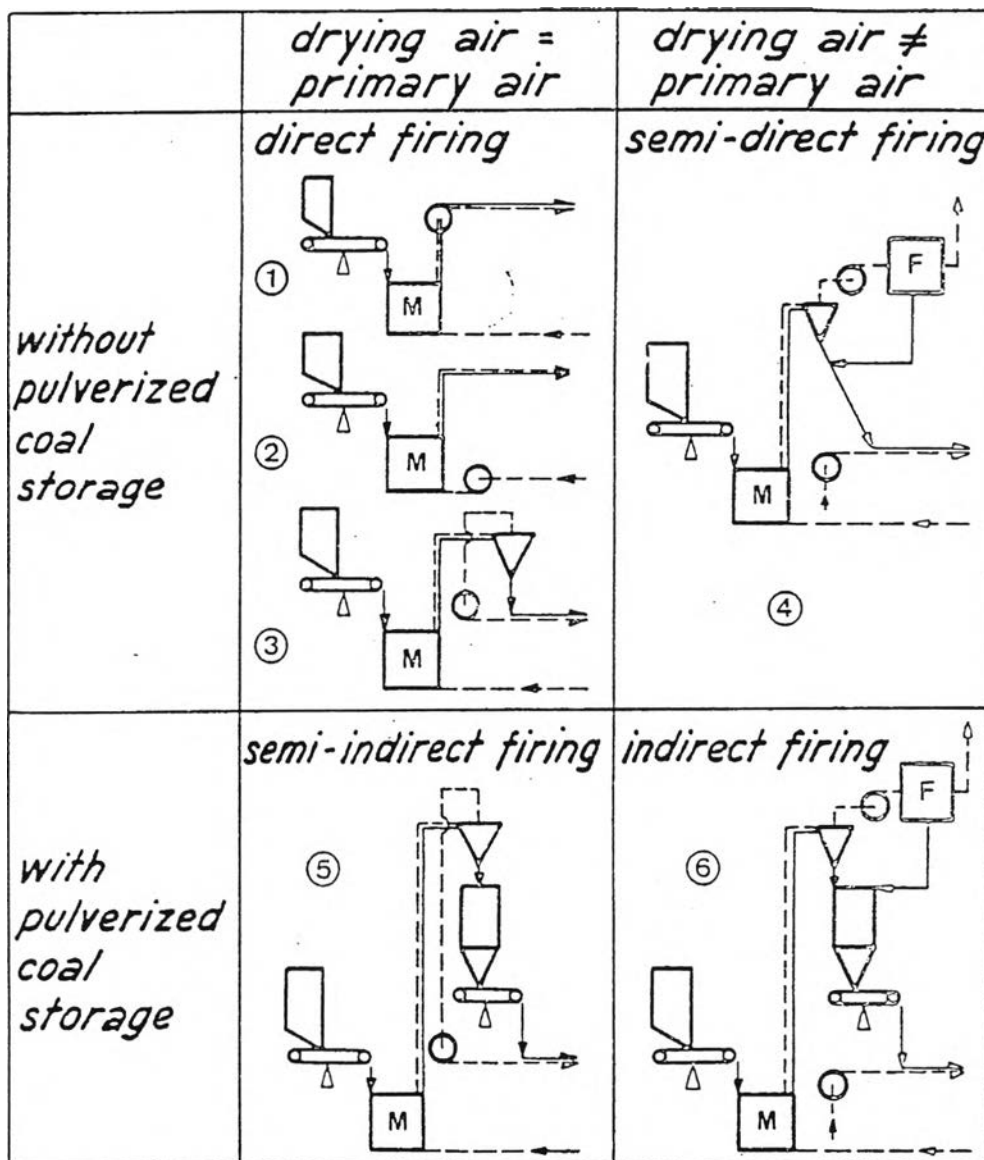
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางเคมี และทางกายภาพ

(Holderbank , 1990 : 20)



รูปที่ 2.3 ข้อกำหนดในการเลือกระบบคัลน์เผาไหม้ (Kiln Firing System)

(Holderbank , 1990 : 12)



รูปที่ 2.4 ชนิดของระบบการเผาไหม้ (Firing System)

(Holderbank , 1995 : 13)

2 ความชื้นของถ่านหิน

สำหรับการเผาไหม้แบบโดยตรง (Direct Firing) ลมร้อนจากหม้อบดถ่านหินทำหน้าที่เป็นไพรมารีแอร์ ซึ่งอัตราส่วนของไพรมารีแอร์จะสูงกว่าอากาศที่ต้องการใช้สำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์นั่นคือมี อากาศส่วนเกิน (Excess Air) อัตราส่วนของไพรมารีแอร์มีอิทธิพลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการนำความร้อนจากकुलเลอร์กลับมาใช้ใหม่ และจะมีผลกระทบต่อการใช้ความร้อนรวมของเตาเผาด้วย ดังรูปที่ 2.5

ไอน้ำที่เข้าเตาเผาพร้อมกับไพรมารีแอร์ไม่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้โดยตรงแต่จะเพิ่มปริมาณก๊าซที่ออกจากเตาเผา ตัวอย่างเช่น ปริมาณน้ำ 15 % ในถ่านหินจะเพิ่มปริมาณ Exit Gas สำหรับเตาเผาแบบแห้ง 1.5 % และเตาเผาแบบเปียก 1.2 % โดยที่พัดลมดูดเข้า (Induced Draft Fan) เดินที่ภาระสูงสุด (Full Load) มีผลทำให้ผลผลิตจากเตาเผาตกลงในขณะเดียวกันเปลวจะไม่นิ่งเนื่องจากปริมาณไพรมารีแอร์ลดลง

3 การสึกกร่อน

เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากถ่านหินมีสัดส่วนของควอทซ์และไพไรต์สูง จึงต้องมีการป้องกันพัดลมไพรมารีแอร์ด้วยการติดตั้งพัดลมไว้ก่อนหม้อบดถ่านหินหรือทำการแยกฝุ่นถ่านหินออกจากแนวการไหลของไพรมารีแอร์

4 การเผาไหม้แบบผสม (ถ่านหิน / น้ำมัน / ก๊าซ)

การเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงแบบผสมเป็นสิ่งจำเป็น และ/หรือสิ่งพึงปรารถนา ในแง่ของเทคโนโลยีหัวเผา (Burner Technology) เชื้อเพลิงแต่ละส่วนสามารถกำหนดการใช้ได้ระหว่าง 0 - 100 % แต่ในแง่กฎเกณฑ์หรือข้อกำหนดทางเศรษฐศาสตร์จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าความร้อน และองค์ประกอบของเชื้อเพลิงด้วย ได้แก่ ถ่านและธาตุหมุนเวียน เป็นต้น การเปลี่ยนเชื้อเพลิงก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของโค้ดในเตาเผาดังรูปที่ 2.6 และ 2.7 ซึ่งเป็นผลของการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวมีอิทธิพลต่อความยาวของโค้ดไม่ถาวรจะเพิ่มมากขึ้นในช่วงทรานสิชัน (Transition Zone) จากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าความยาวของโค้ดไม่ถาวรมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเปลวลดลง ($L_3 > L_2$)

2.4.1.2 หัวเผาถ่านหินผง (Pulverized Coal Burner)

1 ท่อหัวเผา (Burner Pipe)

โดยทั่วไปท่อหัวเผาเป็นท่อเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ตลอดความยาว แต่บางครั้งปลายหัวเผา (Burner Tip) จะเป็นรูปกรวยตัดเพื่อสามารถทำให้ได้รูปร่างของเปลวที่ต้องการ อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของเชื้อเพลิงและความสามารถในการเผาของสารป้อน

ไม่คงที่จำเป็นต้องปรับหัวเผาเพื่อให้ได้เปลวที่เหมาะสม ลักษณะเปลวหัวเผาจะแบ่งออกเป็น 3 ช่อง คือ ช่องลมนอก ลมใน และช่องด้านหินซึ่งมักจะจัดให้อยู่ด้านในของแนวการไหลของไพรมารีแอร์ เพื่อหลีกเลี่ยงการพัดพาอนุภาคของด้านหินเข้าไปในเตาซึ่งก่อให้เกิดการเผาไหม้ทุติยภูมิ (Secondary Combustion) ดังรูปที่ 2.8 และ 2.9

2 หัวฉีดน้ำมัน (Oil Nozzle)

แนวการไหลของน้ำมันแบ่งออกเป็นการไหลในแนวรัศมีและแนวแกน (Radial and Axial Flow) การควบคุมการไหลของน้ำมันสามารถทำได้โดยวิธีการปรับความดันประมาณ 40 บาร์ และเส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิส (Orifice) คงที่เพื่อให้น้ำมันเป็นฝอย ดังรูปที่ 2.10

3 ไพรมารีแอร์

ในการเผาปูนควรจะใช้อัตราส่วนของไพรมารีแอร์ต่ำเพื่อนำอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) มาใช้ให้มากที่สุด นอกจากนี้พลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ของของผสมเชื้อเพลิงและอากาศจะต้องสูงเพียงพอเพื่อช่วยให้เกิดการผสมกับอากาศทุติยภูมิเป็นอย่างดี ทำให้เกิดการเผาไหม้เร็วขึ้น จากกฎนิ้วหัวแม่มือ (Rule of Thumb) ค่าพลังงานจลน์ของไพรมารีแอร์มีค่าคงที่ในช่วงที่กำหนด

$$(\text{Velocity of Primary Air})^2 * \% \text{ Primary Air} = 65,000 - 75,000$$

จากรูปที่ 2.11 กรณีที่อัตราส่วนของไพรมารีแอร์คงที่ เมื่อเพิ่มความเร็วของไพรมารีแอร์ไปเรื่อยๆ จนถึงค่าหนึ่งจะได้ความยาวเปลวสั้นที่สุด แต่เมื่อเพิ่มความเร็วต่อไปอีกจะทำให้เกิดผลการดูด (Suction Effect) มากเกินไป ทำให้อัตราการไหลของ ก๊าซทิ้ง (Flue Gas) ลดลงและมีการหมุนเวียนซ้ำ (Recirculation) ทำให้เปลวยาวขึ้นอีกครั้ง

2.4.1.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้

เมื่อด้านหินผงเริ่มออกจาก Burner จะถูกทำให้ร้อนขึ้นจนถึงอุณหภูมิติดไฟ เมื่อโมเลกุลของสารติดไฟสัมผัสกับก๊าซออกซิเจน การลุกไหม้จะเกิดขึ้นในพื้นที่ซึ่งมีรูปกรวยบริเวณตรงกลางของเปลว กระบวนการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับความเร็วที่สารติดไฟสัมผัสกับก๊าซออกซิเจนและเป็นหน้าที่สำคัญของหัวเผาในการควบคุมการผสมให้เกิดขึ้นอย่างเพียงพอที่จะทำให้ได้เปลวที่เหมาะสม จึงอาจกล่าวได้ว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้มี 2 ประเภทที่สัมพันธ์กัน คือ

1 ระยะทางของการเผาไหม้ซึ่งขึ้นอยู่กับ

1.1 ปริมาณสารระเหย (Volatile Content) อุณหภูมิการเผาไหม้จะลดลงเมื่อปริมาณสารระเหยลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงแข็งที่มีปริมาณสารระเหยต่ำจะมีระยะทางการเผา

ไหม้ยาว

1.2 Aerodynamic Condition

ไพโรมารีเออร์ที่มีพลังงานจลน์สูงจะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน และลมร้อนทุติยภูมิจะเคลื่อนตัวเข้าแนวกลางของเปลวจนได้ความเร็วที่เหมาะสมซึ่งมีผลทำให้ภายในเปลวมีออกซิเจนเพิ่มขึ้นและสารติดไฟร้อนเร็วขึ้น

1.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิสูงจะช่วยเร่งให้ร้อนเร็วขึ้น มีผลทำให้ระยะเวลาเผาไหม้จะสั้นลงเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิน้อย (โดยทำให้ไพโรมารีเออร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนเข้าเตาเผา)

1.4 ส่วนประกอบปนเปื้อน

ได้แก่ เถ้า ผุ่น และน้ำในไพโรมารีเออร์ ถ้าหากมีส่วนประกอบเหล่านี้มากจะทำให้ความร้อนที่จะไปอุ่นสารติดไฟลดลง และอุณหภูมิของไพโรมารีเออร์ลดลง เพราะส่วนประกอบดังกล่าวได้ดูดซับความร้อนไว้ส่วนหนึ่ง

2 เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้

จาก GUMZ ' s Formula

$$t = 4.784 * 10^6 * \left[\frac{\gamma_o v^{0.15} d^{1.85}}{T(W_s^{0.15})} \right] * \left[\frac{1}{(1-x/n)} * \varepsilon^{0.383} * f(W, \varepsilon) \right] * \left[\frac{100-V}{100} \right] * f(n)$$

โดยที่

- γ_o : Gross Density of Initial Fuel
- v : Kinetic Viscosity of Gas in Combustion hamber
- T : Mean Temperature of Gas
- d : Grain Diameter
- W_s : Sinking Speed of Grain
- $f(n)$: Corrective Factor for Excess Air
- n : Excess Air Value
- V : Volatile Content

x : O₂ Requirement for Combustion Relative to Total O₂ Requirement

ε : Degree of Swelling

f(W,ε): Corrective Factor Value of Swelling and Sinking Speed

จาก GUMZ 's Formula จะพบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้คือ

- 1 Grinding Fineness : ขนาดเชื้อเพลิงละเอียดจะทำให้เวลาในการเผาไหม้สั้นลง
- 2 ปริมาณสารระเหย : ถ้าปริมาณสารระเหยสูงจะทำให้เวลาในการเผาไหม้สั้นลง
- 3 อุณหภูมิในช่วงเวลาการเผาไหม้ : อุณหภูมิสูงทำให้การเผาไหม้เกิดเร็วขึ้น
- 4 Rate of Swelling : อนุภาคเชื้อเพลิงมีการขยายตัวระหว่างที่ร้อนขึ้น จะมีความหนาแน่นน้อยทำให้เวลาในการเผาไหม้สั้นลง

อิทธิพลของคุณสมบัติของถ่านหินต่อการเผาไหม้ และความยาวของโซนเผาไหม้ (Burning Zone) ได้มาจากการตรวจสอบโดย International Flame Research Foundation (IFRF) ภายใต้สภาวะ Aerodynamic (30 % ไพรมารีแอร์ และความเร็ว 40 m/s)

2.4.1.4 เปลว และอุณหภูมิของเปลว

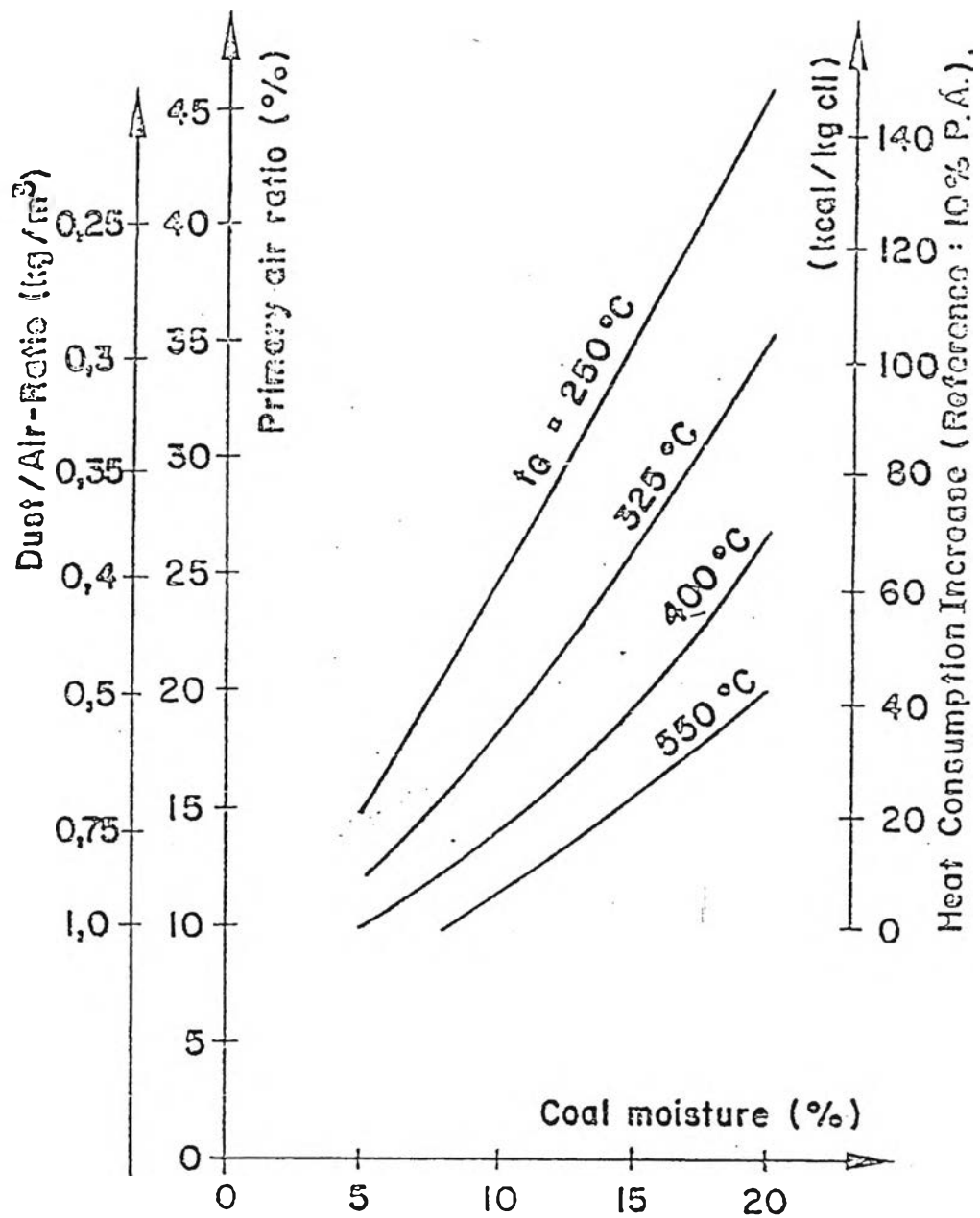
การเผาปูนในอุตสาหกรรมซีเมนต์ต้องการเปลวสั้นเพราะจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังเบดวัสดุ (Material Bed) ได้สูงและทำให้เกิดโซนเผาไหม้ช่วงสั้นและถาวร เนื่องจากการเผาไหม้เป็นแบบ Diffusing Flame โดยที่เชื้อเพลิงและอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ผสมกันจากผลของพลังงานจลน์ ในทางปฏิบัติพลังงานที่ได้จากไพรมารีแอร์สามารถปรับและอธิบายได้ด้วยโมเมนตัมของเปลว (Flame Momentum) หรืออิมพัลส์ (Impulse)

$$\text{Flame Momentum} = L_p * V \quad (\% * \text{m/s})$$

โดยที่ L_p : % ไพรมารีแอร์

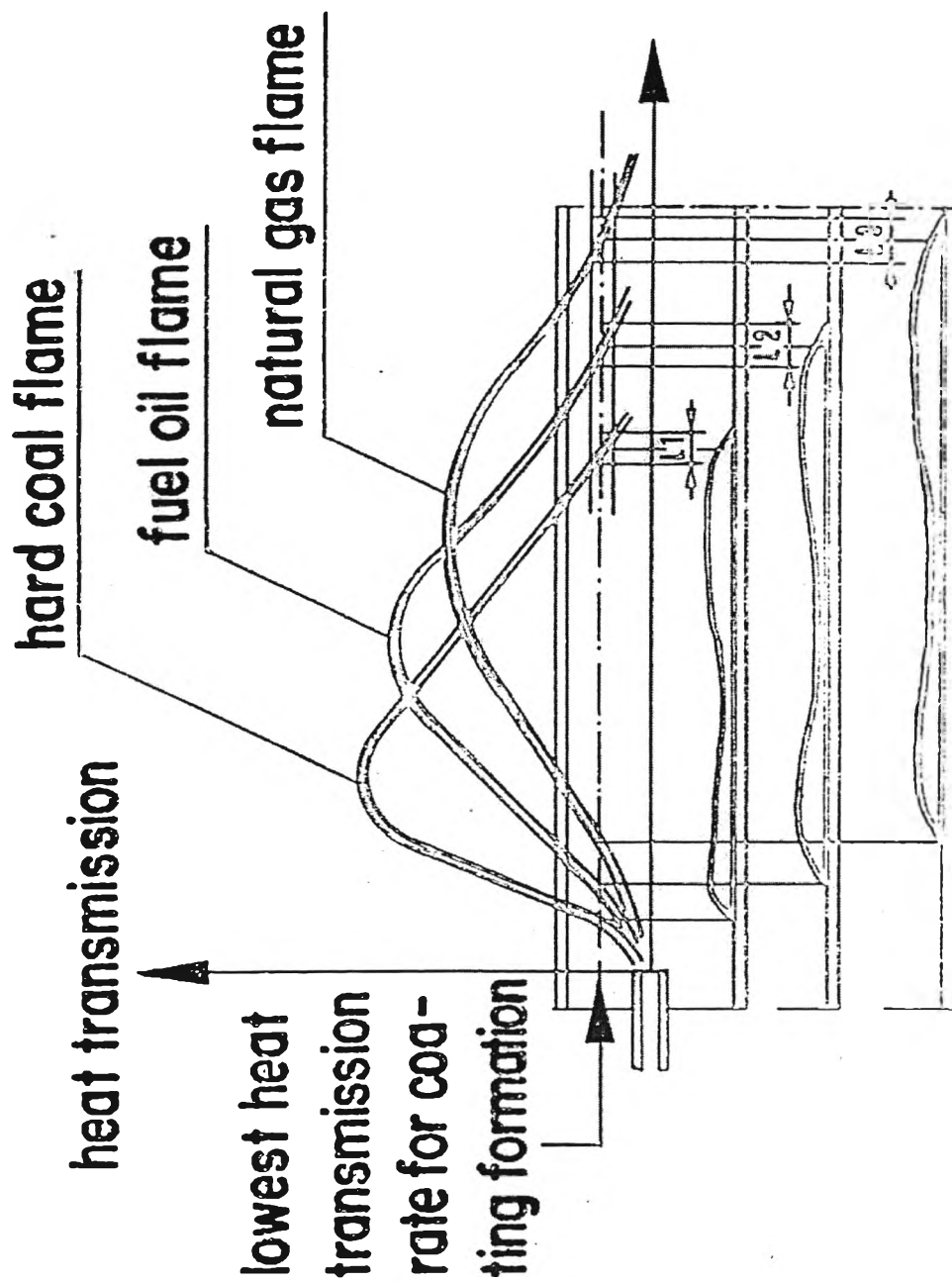
V : ความเร็วที่ปลายหัวเผา

สำหรับการกระจายของเปลว (Flame Profile) ที่เหมาะสมจะมีค่าโมเมนตัมของเปลวประมาณ 1400 %*m/s อนึ่งข้อจำกัดสำหรับโมเมนตัมของเปลวของเตาเผา ก็คือปริมาณไพรมารีแอร์



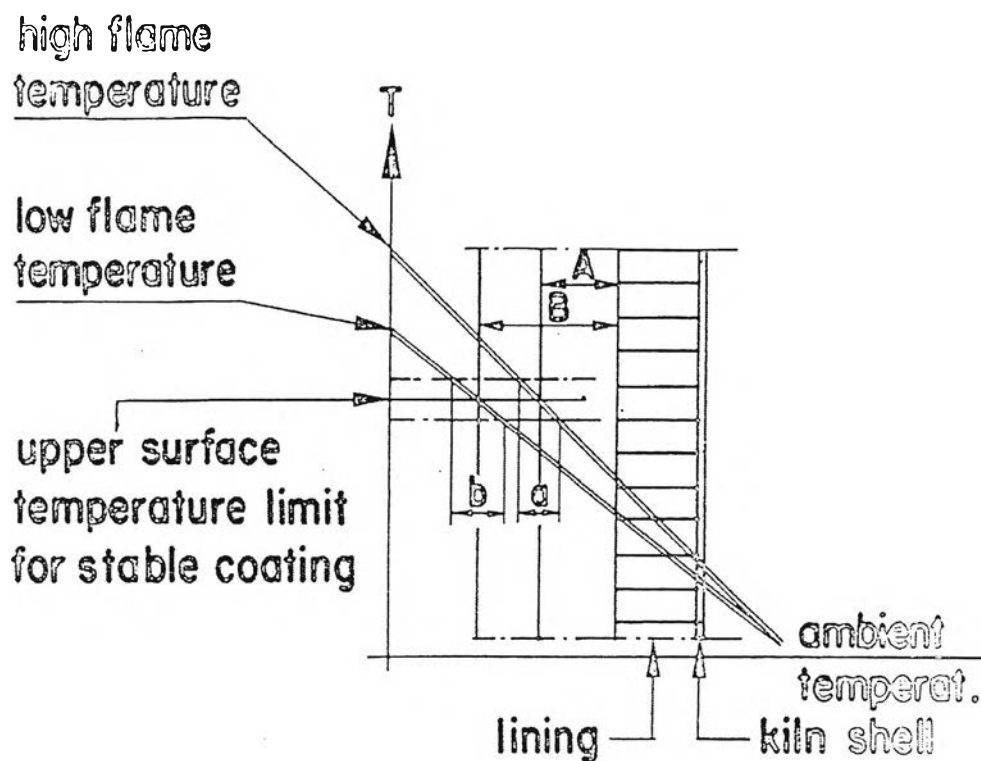
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของถ่านหิน กับ การใช้พลังงานความร้อน
(Heat Consumption)

(Holderbank, 1995 : 22)



รูปที่ 2.6 อิทธิพลของเชื้อเพลิงที่มีต่อการเกิดโค้ตในเตา

(Holderbank , 1995 : 8)



A = coating thickness with high temperature flame

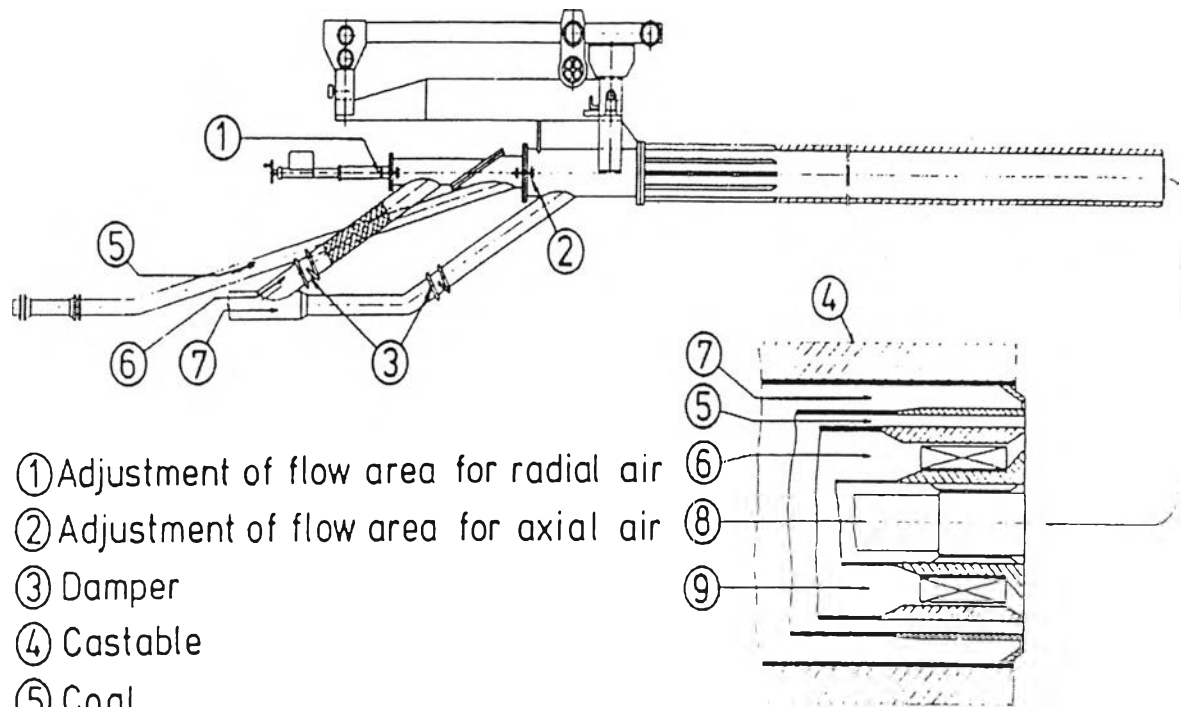
B = same with low temperature flame

a = thickness of unstable coating with high temperature flame

b = same with low temperature flame

รูปที่ 2.7 ลักษณะการเกิดโค้ตในเตา

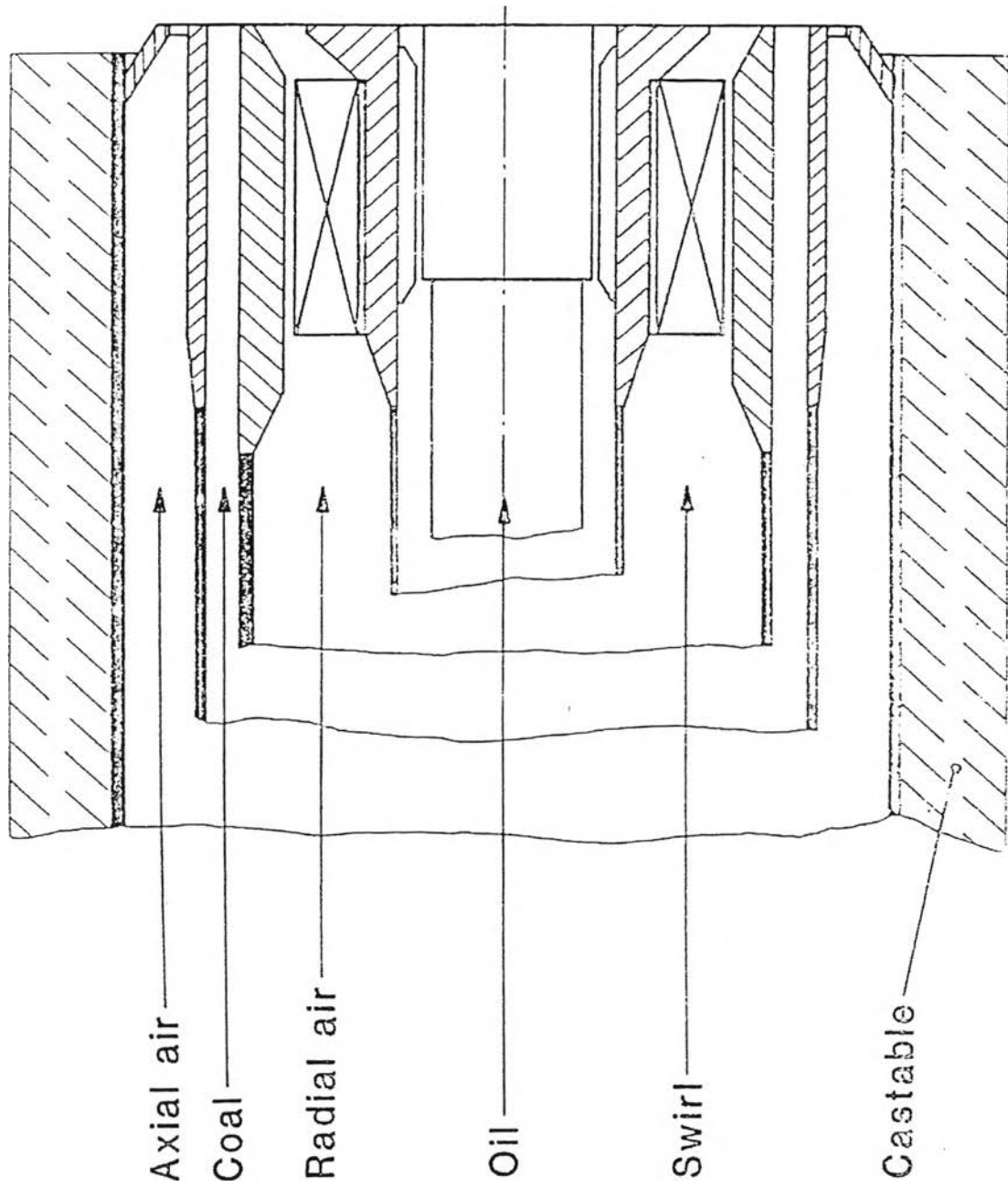
(Holderbank , 1995 : 18)



- ① Adjustment of flow area for radial air
- ② Adjustment of flow area for axial air
- ③ Damper
- ④ Castable
- ⑤ Coal
- ⑥ Radial air
- ⑦ Axial air

รูปที่ 2.8 ลักษณะของหัวเผาที่ใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์

(FLS , 1992 : 15)

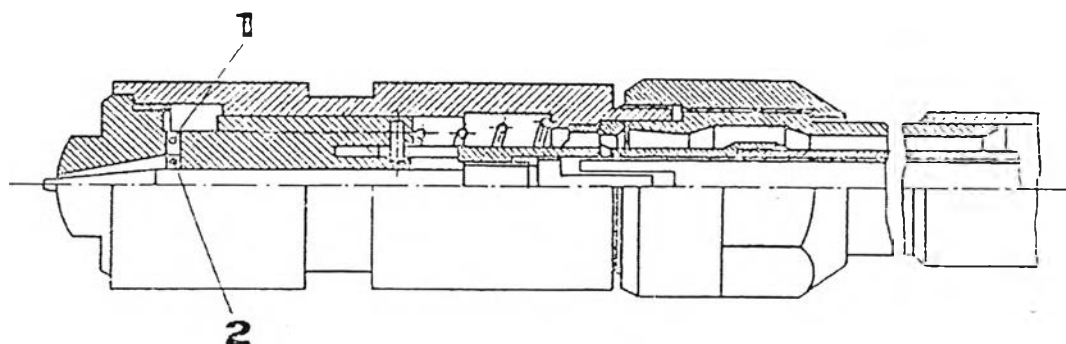


รูปที่ 2.9 ลักษณะปลายหัวเผา (Burner Tip)

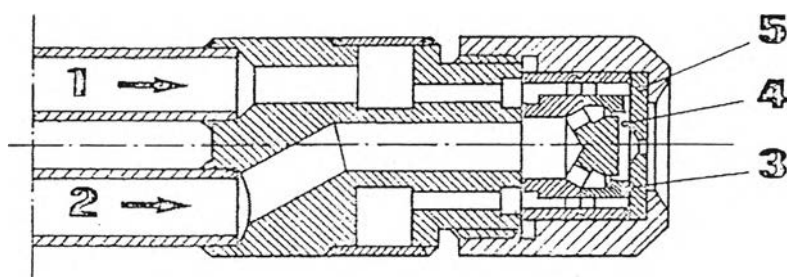
(FLS , 1992 : 16)

FLS atomizer

(needle valve principle)



Pillard MY atomizer

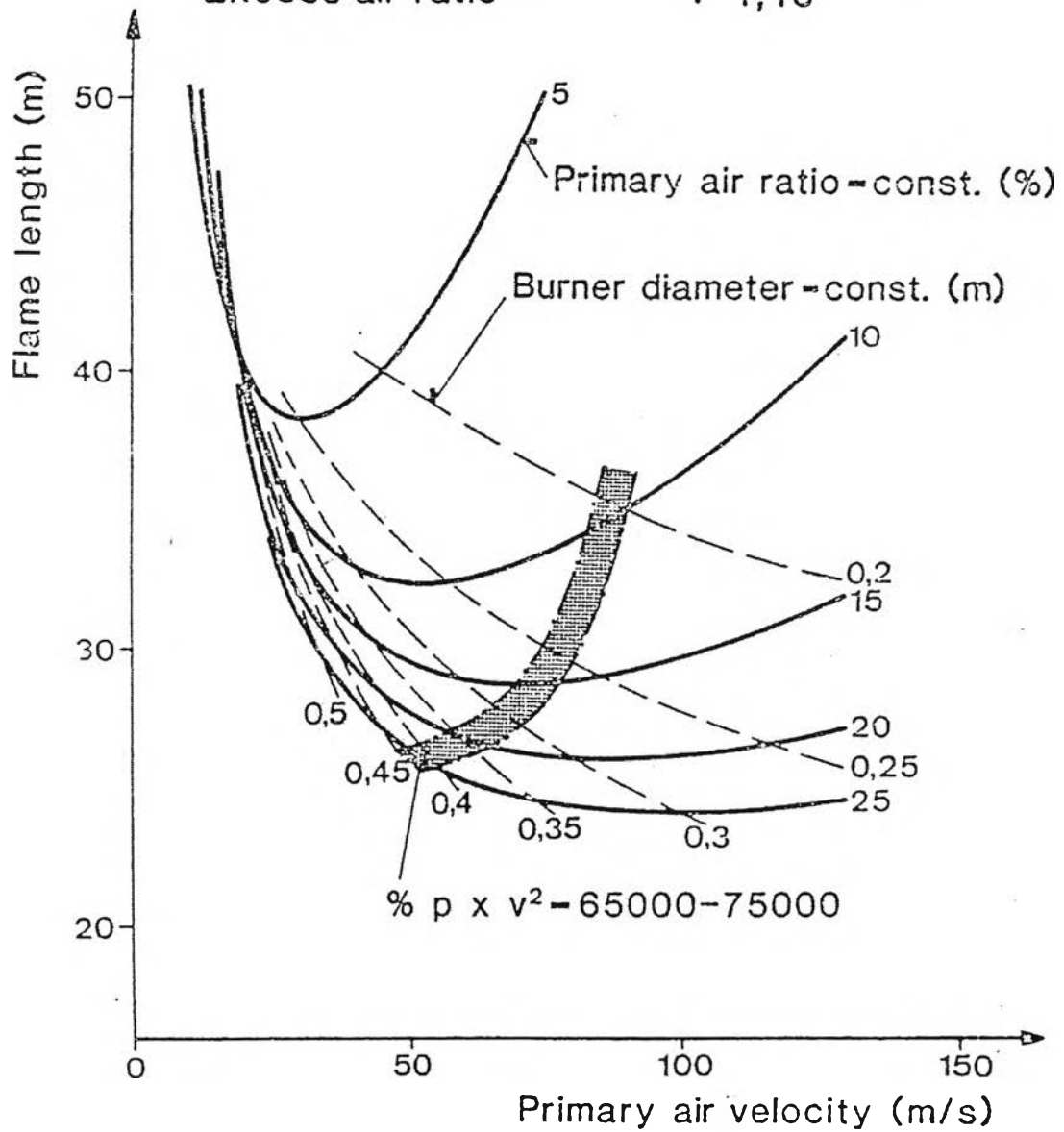


- 1 tangential oil flow
- 2 axial oil flow
- 3 tangential slots
- 4 swirl chamber
- 5 orifice plate

รูปที่ 2.10 รูปแบบหัวฉีดน้ำมัน (Oil Nozzle) และทิศทางการไหล

(FLS , 1992 : 17)

Kiln capacity : 2000 t/d
 Kiln diameter : 4,6 m ϕ
 Specific heat consumption: 800 kcal/kg cli
 Coal net heat value H_U : 6400 kcal/kg
 Excess air ratio : 1,15



รูปที่ 2.11 แสดง Length of Pulverized Coal Flame in Rotary Kiln

(Holderbank , 1995 : 26)

ที่ใช้ควมรน้อยที่สุดเพื่อ ที่จะนำความร้อนจากอุลเลอร์มาใช้อีกครั้งให้มากที่สุด แต่เพียงพอสำหรับ หล่อเย็นปลายท่อของหัวเผาโดยความเร็วที่ปลายหัวฉีดของหัวเผาขึ้นอยู่กับความดันของอากาศด้วย การถ่ายเทความร้อนจากเปลวและการเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดจากการแผ่รังสีและประมาณ 10 % เกิดจากการพาความร้อน

STEFAN ' s Law

$$R = ekT^4$$

โดยที่

e : Coefficient of Emissivity

For Coal ~ 1.00

Oil ~ 0.7 - 0.9

Gas ~ 0.2 - 0.6

k : ค่าคงที่ของ Stefan Boltzmann

T : อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

กล่าวได้ว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจำเป็นต้องใช้ความร้อน ช่วยทำให้อุณหภูมิของ เชื้อเพลิงสูงขึ้นถึงอุณหภูมิการเผาไหม้ สำหรับเตาเผาที่มีแหล่งให้ความร้อน 3 ชนิด คือ

- 1 การแผ่รังสีความร้อนจากผนังงู (Lining) ในเตา
- 2 อุณหภูมิของลมทุติยภูมิ
- 3 การแผ่รังสีจากเปลว

ลักษณะของเปลวอุดมคติ (Ideal Flame)

- 1 มีการผสมอย่างต่อเนื่องกับลมทุติยภูมิที่ร้อน และการเผาไหม้คงที่ตามโซน
- 2 อุณหภูมิไม่สูงเพียงจุดใดจุดหนึ่ง
- 3 เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ที่ปลายเปลว
- 4 ไม่เกิดการขาดออกซิเจน

อนึ่ง การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในช่วงเวลาที่เหมาะสมเป็นเวลาพักอาศัย (Residence Time) ของอนุภาคเชื้อเพลิงใน โซนเผาไหม้ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักคือ การเตรียมเชื้อเพลิงให้ได้ขนาด ที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.2 การป้อนเชื้อเพลิงสม่ำเสมอ และมีออกซิเจนเพียงพอกับการเผาไหม้อย่าง สมบูรณ์

พารามิเตอร์ที่มีผลต่อลักษณะของเปลว

- 1 Primary Air Momentum

- 2 Primary Air Velocity
- 3 Swirl air
- 4 Primary air rate
- 5 ตำแหน่งของหัวเผาในเตาเผา
- 6 การเผาไหม้ที่มี อากาศมากเกินไป
- 7 ชนิดและลักษณะของเชื้อเพลิง ความดันสำหรับทำให้น้ำมันเป็นฝอย

อุณหภูมิของลมทุติยภูมิ มุมของหัวเผาเทียบกับแนวแกนของเตาเผา และการหมุนเวียนของฝุ่นใน โชน การเผาไหม้

อุณหภูมิของเปลวสามารถคำนวณได้ทางทฤษฎีสำหรับกรณีเชื้อเพลิงเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ โดยไม่มีการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม และใช้อากาศในการเผาไหม้ตามที่คำนวณได้ตาม ทฤษฎี การกระจายของเปลวขึ้นอยู่กับค่าความร้อนจำเพาะ และองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง อุณหภูมิของอากาศในการสันดาป และปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess Air) อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิของเปลวตามทฤษฎียังไม่อาจทำได้สำเร็จเนื่องจากการสูญเสียความร้อนจากเปลวก่อนที่จะ เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ สำหรับเตาเผาโรตารีคิลด์จะมีค่าอุณหภูมิเปลวจริง (Actual Flame Temperature) สูงถึง 2000 °C หรือมากกว่า ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถวัดได้แต่จะทำการศึกษาถึง การกระจายอุณหภูมิของเปลวหรือรูปร่างของเปลว ดังนั้นการควบคุมรูปร่างของเปลวจึงเป็นสิ่งสำคัญ ในการเดินเตาเผา ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกระจายของเปลวคือ

- 1 อุณหภูมิของอากาศในการสันดาป ซึ่งขึ้นอยู่กับให้นำเอาความร้อนจาก ปูนเม็ดกลับมาใช้อีกครั้งอย่างมีประสิทธิภาพ
- 2 ปริมาณของอากาศส่วนเกินที่เหมาะสม ซึ่งถ้ามากเกินไป จะมีผลทำให้เปลว ยาวเนื่องจากต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์
- 3 อัตราการผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศในการสันดาป
- 4 ชนิดและคุณภาพของเชื้อเพลิง

การปรับรูปร่างของเปลว เพื่อให้ได้เปลวตามที่ต้องการสามารถทำได้ดังนี้

- 1 เพิ่มหรือลดโมเมนต์ของไพรมารีแอร์
- 2 เลื่อนหัวเผาเข้าหรือออกจากเตาเผา
- 3 ควบคุมปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess Air)

2.4.2 เชื้อเพลิงเหลว

ปิโตรเลียมหรือน้ำมันดิบเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่พบสะสมใต้ชั้นพิภพ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยมีซัลเฟอร์ ในโตรเจน ออกซิเจน ในปริมาณต่างๆ รวมอยู่ในโมเลกุล เมื่อผ่านกระบวนการกลั่นน้ำมันจะทำให้ น้ำมันดิบแยกออกเป็นผลผลิตต่างๆจำนวนมาก อุตสาหกรรมซีเมนต์นิยมนำน้ำมันเตาหนัก (Heavy Fuel Oil) มาใช้ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่นน้ำมัน อาทิ เช่น Thermal Cracking Visbreaking เป็นต้น นอกจากนี้ได้มีการเติมตัวทำละลายลงไปเพื่อให้ น้ำมันเตาที่ได้มีความหนืด ความหนาแน่น และปริมาณซัลเฟอร์ตามที่ต้องการ คุณสมบัติทางเคมี และกายภาพของน้ำมันเตาหนักขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของน้ำมันดิบ และขั้นตอนการกลั่นน้ำมัน

ความหนาแน่น : ความหนาแน่นของน้ำมันเตาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ นั่นคือถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C จะทำให้ความหนาแน่นของน้ำมันเตาลดลงโดยเฉลี่ย 68 % ดังนั้นความหนาแน่นของน้ำมันเตาจะต้องอ้างอิงที่อุณหภูมิปกติ 15°C โดยปกติความหนาแน่นของน้ำมันเตาอยู่ในช่วง 0.84 - 0.98

ความหนืด : ความหนืดของน้ำมันเตาเป็นคุณสมบัติที่สำคัญเนื่องจากการขนถ่าย และการทำให้น้ำมันเตาเป็นฝอย (Atomization) ต้องการความหนืดที่เหมาะสมกับการใช้งานโดยการอุ่นน้ำมันเตาให้ร้อน ทั้งนี้เพราะความหนืดเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นกับอุณหภูมิอย่างมาก รูปที่ 2.12 แสดงช่วงของความหนืดที่เหมาะสมต่อการทำให้เป็นฝอย และการปั๊มเพื่อการขนถ่ายน้ำมัน ซึ่งต้องอุ่นน้ำมันเตาหนักให้ร้อนถึง 120°C ทั้งนี้การควบคุมอุณหภูมิเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการใช้น้ำมันเตาในการเผาปูน

ข้อกำหนดของความหนืด

ที่อุณหภูมิห้อง : มีความหนืดมาก

ที่ $50 - 60^{\circ}\text{C}$: 200 - 100 cSt (Pumpable)

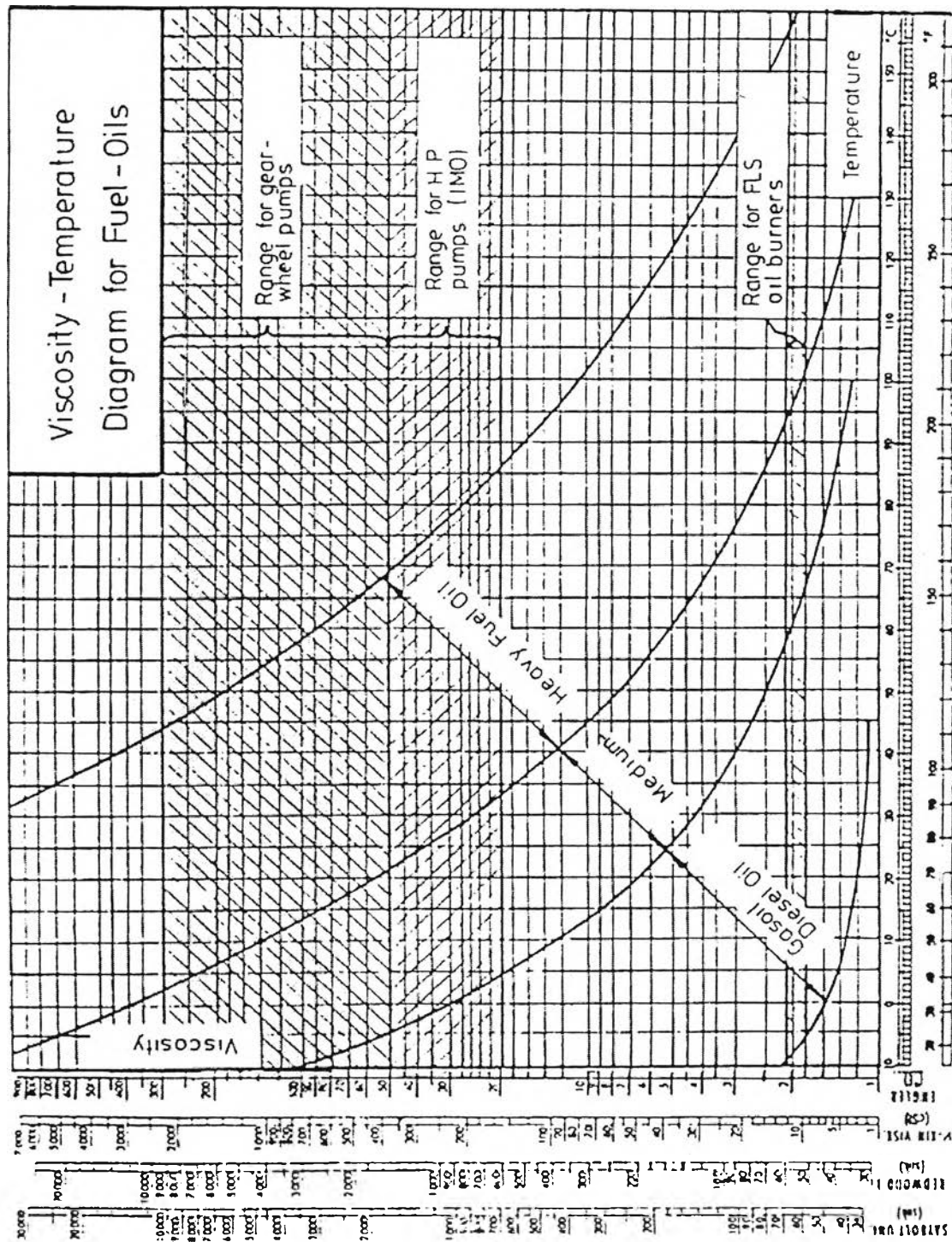
ที่ $110 - 120^{\circ}\text{C}$: 20 - 12 cSt (Atomizable)

ปริมาณน้ำ (Water Content) : น้ำมันเตาที่นำส่งให้ลูกค้าหรือผู้ใช้งานอาจมีน้ำปนอยู่บ้างเล็กน้อยซึ่งจะต้องน้อยกว่า 0.5 % โดยมวล โดยปริมาณน้ำที่ปนอยู่ในน้ำมันจะต้องไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน หรือปัญหาในการจัดเก็บ การขนส่ง และการเผาไหม้

ถ้าปริมาณน้ำมีมากกว่า 0.5 % โดยมวล สามารถก่อให้เกิดการควบแน่นภายในถังเก็บน้ำมัน และจะสะสมอยู่กันถึงซึ่งจะรวมกับสารปนเปื้อนในน้ำมันเตาเกิดเป็นตะกอนน้ำมัน และจะก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันในระบบขนส่งน้ำมันเตา

คุณสมบัติอื่นๆ :

1 ค่าความร้อน 40 - 41 MJ / kg หรือ 9500 – 10000 kcal/kg



รูปที่ 2.12 Kinematic Viscosity of Fuel Oil as a Function of Temperature

(FLS, 1992 : 6)

2 องค์ประกอบ

- 2.1 คาร์บอน 83 - 87 %
- 2.2 ไฮโดรเจน 11 - 13 %
- 2.3 ซัลเฟอร์ 4 %
- 2.4 ออกซิเจน / ไนโตรเจน / น้ำ 5 %
- 3 ปริมาณเถ้า น้อยกว่า 0.05 %
- 4 จุดวาบไฟสูงกว่า 100°C
- 5 กากคาร์บอนประมาณ 12 %
- 6 Emissivity ของเปลว 0.81
- 7 จุดติดไฟ $300 - 500^{\circ}\text{C}$
- 8 อัตราส่วนคาร์บอน/ไฮโดรเจน 8 : 1
- 9 Heating Value 9500 - 10000 kcal / kg

2.4.3 เชื้อเพลิงก๊าซ

ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อที่ใช้เรียกผลิตภัณฑ์ที่มีแหล่งกำเนิดจากสิ่งที่เกิดจากการสะสมภายใต้ชั้นเปลือกโลก ซึ่งอยู่ในสถานะก๊าซที่อุณหภูมิและความดันปกติ องค์ประกอบหลักประกอบด้วย พาราฟิน และไฮโดรคาร์บอน สามารถจำแนกประเภทของก๊าซธรรมชาติได้ดังนี้

2.4.3.1 ก๊าซธรรมชาติที่มาจากก๊าซอย่างเดียว

2.4.3.1 ก๊าซธรรมชาติที่เกิดจากการสะสมของน้ำมัน

2.4.3.2 ก๊าซธรรมชาติที่เกิดจากการสะสมของคอนเดนเสดและ
ดิสทิลเลต

นอกจากนี้อาจแบ่งตามปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 5 อะตอมขึ้นไป ได้แก่ เพนเทน เฮกเซน เป็นต้นไป ซึ่งรู้จักกันในนามของก๊าซโซลีนและมีการแยกออกก่อนที่จะนำเข้าจัดเก็บเรียกว่า ก๊าซโซลีนหรือ Gas Petrol

1 ก๊าซธรรมชาติแห้ง (Dry Natural Gas) : มีปริมาณก๊าซโซลีน (Gasoline Content) น้อยกว่า 0.0134 l/m^3

2 ก๊าซธรรมชาติบาง (Lean Natural Gas) : มีปริมาณก๊าซโซลีน ระหว่าง $0.0134 - 0.0402 \text{ l/m}^3$

3 ก๊าซธรรมชาติชื้น (Moist Natural Gas) : มีปริมาณก๊าซโซลีน มากกว่า 0.0402 l/m^3

ส่วนประกอบของไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 3 อะตอมขึ้นไปคือ โพรเพน บิวเทน และก๊าซโซลีน นอกจากนี้ยังประกอบด้วยออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ซิลิเนียม และไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยมีสารเฉื่อยในก๊าซธรรมชาติน้อยกว่า 10 %

คุณสมบัติอื่นๆ มีดังนี้

1 องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติ

1.1 มีเทน	98 %
1.2 ไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ	15 %
1.3 ไนโตรเจน	15 %
1.4 คาร์บอนไดออกไซด์	10 %
1.5 ซิลิเนียม ออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน	

ปะปนเล็กน้อย

2 น้ำหนักจำเพาะ : 0.72 - 0.85 (เทียบกับอากาศ)

3 ค่าความร้อนต่ำ : 8000 - 9000 kg/Sm³

เฉลี่ย 8400 kg/Sm³

4 อุณหภูมิของการเผาไหม้ : 600 - 700 °C

5 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน : 8

6 Emissivity ของเปลว :

0.226 สำหรับก เซมิเทน 100 %

0.80 สำหรับ Dusty Kiln Atmosphere

2.5 กระบวนการปั้นเม็ด

2.5.1 รูปแบบการกระจายขนาดของปูนเม็ด

ในกระบวนการเผาปูน กระบวนการที่เกิดขึ้น 2 กระบวนการคือ

2.5.1.1 กระบวนการทางเคมี ซึ่งเป็นผลที่ทำให้เกิดผลึกในปูนเม็ด โดยจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของซีเมนต์

2.5.1.2 กระบวนการปั้นเม็ด มีอิทธิพลต่อสภาพของปูนเม็ด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่สัมพันธ์กับการควบคุมคุณสมบัติ อายุการใช้งานของอิฐทนไฟในโซนของการเผาไหม้ และความสามารถในการบดปูนเม็ด

สภาพปูนเม็ดที่เป็นฝุ่นอาจเกิดจากการหมุนเวียนของฝุ่นในकुलเลอร์เข้าเตาเผา ทำให้ฝุ่นร้อนมากเกินไป จนกระทั่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อส่วนที่เป็นโลหะของकुलเลอร์ การลำเลียงภายในकुलเลอร์ไม่สะดวก และลดอายุการใช้งานของอิฐทนไฟในโชนของการเผาไหม้ เนื่องจากเกิดโค้ดไม่ถาวรและมีรูพรุน (Porous and Unstable Coat) นอกจากนี้ความสามารถในการบดปูนเม็ดที่เป็นฝุ่นน้อยลง

KONOPICKY⁹ ซึ่งให้เห็นว่าปูนเม็ดที่หลอมเหลวเข้าสู่โชนการเผาไหม้ จะเกิดการปั้นเม็ดโดยพิจารณาจากระบบ 4 วัฏภาค $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ รูปที่ 2.13 แสดงถึงปริมาณของปูนเม็ดที่หลอมเหลวเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ และสมการของ LEA และ PARKER¹⁰ สำหรับ 3 องค์ประกอบจะสัมพันธ์กับปูนเม็ดปอร์ตแลนด์ธรรมดา ซึ่งแปรเปลี่ยนตาม MA

ปูนเม็ดหลอมเหลวเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1340°C และมีมากที่สุดเมื่อ MA มีค่าเท่ากับ 1.4 แต่ถ้าทำให้เกิดปูนเม็ดหลอมเหลวขึ้นที่ 1300°C พบว่า MA ที่ทำให้ปริมาณปูนเม็ดหลอมเหลวมากที่สุดเพิ่มขึ้นเป็น 1.6 แต่โดยทั่วไปอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อสภาวะการหลอมเหลวจะถูกคาดหวังว่าเป็นไปตามรูปที่ 2.13

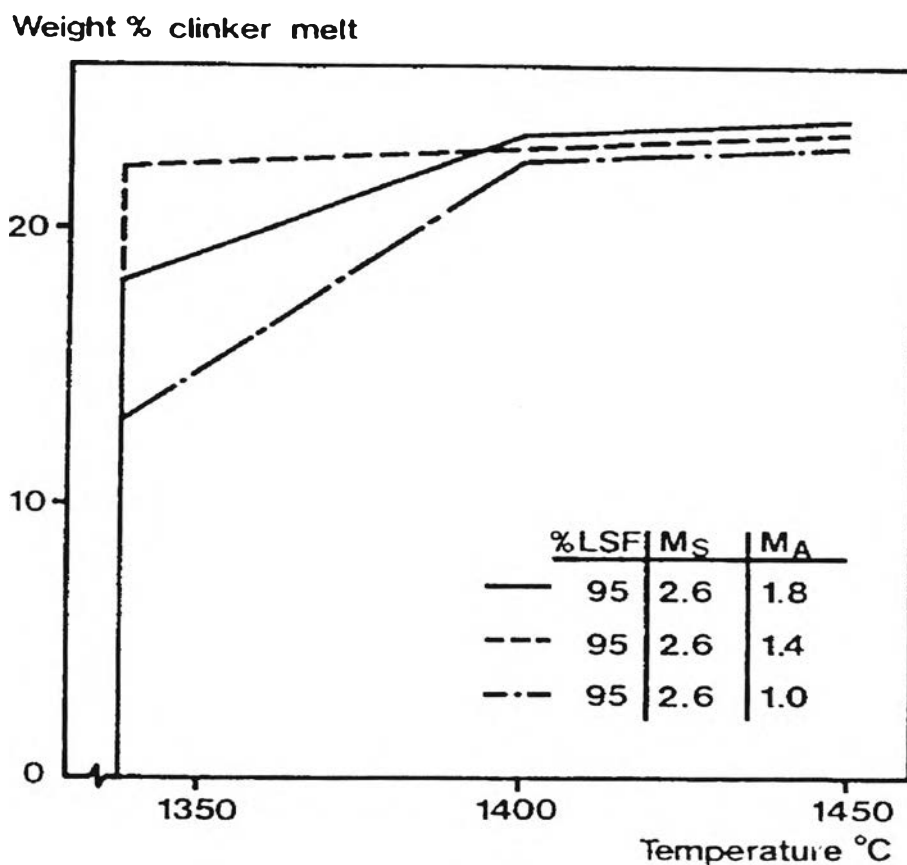
ปริมาณปูนเม็ดหลอมเหลวในเตาเผาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วบริเวณทางเข้าโชนการเผาไหม้ซึ่งมีอุณหภูมิในช่วง $1300 - 1340^\circ\text{C}$ ปูนเม็ดหลอมเหลวจะมีการสร้างแรงท่อรูเข็ม (Capillary Force) ระหว่างผลึกเพิ่มขึ้นทำให้ปูนเม็ดที่จับตัวมีขนาดเล็กลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวใหม่ระหว่างที่อยู่ในรูปเฟสของเหลว และก่อตัวเป็นกลุ่มก้อนเล็กๆ ของผลึกแต่ยังไม่มีการปั้นเม็ดจนกว่า จะมีแรงเกาะรวมตัว (Cohesion Force) ระหว่างผลึกของแข็ง แต่ยังเป็นที่ยสงสัยกันว่ากระบวนการปั้นเม็ดมีกลไกการเกิดอย่างไรเนื่องจากไม่สามารถเก็บตัวอย่างในโชนการเผาไหม้ในขณะที่เตาเผากำลังเดิน จึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ช่วยในการอธิบายโดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการปั้นเม็ดกับปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการควบคุมการเผาปูน

เพื่อความสะดวก และง่ายต่อการอธิบายกลไกการปั้นเม็ด จึงได้มีการตั้งสมมติฐานของรูปแบบการไหลของวัสดุคิบในโชนการเผาไหม้เป็นการไหลแบบลูกสูบ (Plug Flow)

SASTRY และ FUERSTENAU¹¹ กล่าวว่า Coalescence และ Layering เป็นกลไกพื้นฐานในการปั้นเม็ด ดังรูป 2.14 ซึ่งใช้อธิบายกลไกเหล่านี้

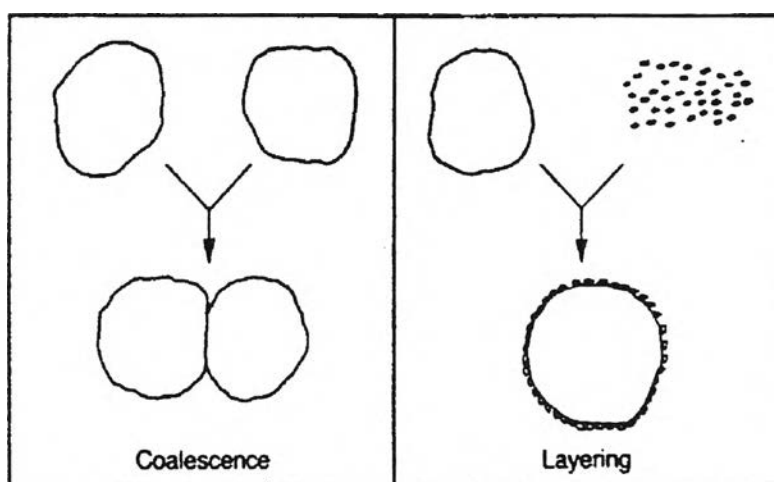
Coalescence เป็นกลไกการเชื่อมต่อกันของอนุภาคชนิดเดียวกันตั้งแต่ 2 อนุภาคขึ้นไปที่ชนกันและเกิดการจับตัวกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

Layering เป็นกลไกการเกิดกลุ่มก้อนจากการเรียงตัวของอนุภาคละเอียดเป็นชั้นที่ผิวของอนุภาคต่างชนิดกัน



รูปที่ 2.13 การเกิดปูนเม็ดหลอมเหลวในรูปฟังก์ชันของอุณหภูมิ จากสมการของ Lea and Parker

(FLS-review , 1980 : 5)



รูปที่ 2.14 รูปแบบอธิบายกลไกการปั้นเม็ด

(FLS-review , 1980 : 7)

กำหนดให้ $n(x,t)dx$ เป็นจำนวนกลุ่มของมวลอนุภาคขนาด x ถึง $x+dx$ ในช่วงเวลา t

$$\frac{\partial \langle n(x,t) \rangle}{\partial t} = \frac{1}{2} * \frac{\lambda(t)}{N(t)} * \int_0^x n(x-x^*,t) dx^* - \frac{\lambda(t)}{N(t)} * n(x,t) * \int_0^\infty n(x^*,t) dx^* \quad (1)$$

โดยที่ $N(t)$: เป็นจำนวนกลุ่มก้อนทั้งหมดที่ไหลผ่านในช่วงเวลา t

$\lambda(t)$: เป็นฟังก์ชันของอัตราการชนกันของอนุภาค

เทอมทางซ้ายของสมการที่ 1 เป็นการเปลี่ยนแปลงของจำนวนกลุ่มก้อนในมวลอนุภาคขนาด x ภายในเวลา dt

เทอมทางขวาของสมการที่ 1 เป็นตัวบ่งชี้ถึงการกระจายของตัวแปร 2 ตัวแปรนั้นคือ

1 เทอมแรกเป็นการเพิ่มขึ้นของจำนวนกลุ่มก้อนในมวลอนุภาคขนาด x ที่เกิดจากการชนกันของอนุภาค

2 เทอมที่ 2 เป็นการลดลงของจำนวนอนุภาคในมวลอนุภาคขนาด x ที่เกิดจากการรวมตัวของอนุภาค

นอกจากนี้จากกลไกการเกิด Layering จะได้สมการพื้นฐาน

$$\frac{\partial \langle n(x,t) \rangle}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} [R(t) * n(x,t)] \quad (2)$$

โดยที่ $R(t)$ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มก้อนในปริมาณ x ที่เกิดจากการเรียงตัวของอนุภาคละเอียดที่ผิว แต่เนื่องจากกลไกการปั่นเม็ดจะเกิดจากทั้ง Coalescence และ Layering จากสมการที่ 1 และ 2 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle n(x,t) \rangle}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x} [R(x,t) * n(x,t)] + \frac{1}{2} * \frac{\lambda(t)}{N(t)} \int_0^x n(x-x^*,t) * n(x^*,t) dx^* \\ & - \frac{\lambda(t)}{N(t)} * n(x,t) \int_0^\infty n(x^*,t) dx^* \end{aligned} \quad (3)$$

โดยที่ $n(x,t)$ หมายถึงถึงกลุ่มก้อนที่เกิดจากการรวมตัวเป็นอย่างดีกับส่วนที่ยังไม่รวมตัว ดังนั้นในการแก้สมการที่ 3 จำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันของการอัตราการเกิด Layering $R(x,t)$ CAPES และ SASTRY-FUERSTENAU⁶ ได้ทำการศึกษาพบว่า อัตราการเกิด Layering ของอนุภาคใหม่บนผิวของกลุ่มก้อนเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ผิวของกลุ่มก้อนซึ่งจะได้ว่า

$$R(x,t) = G(t) * S(x) \quad (4)$$

$$x = \frac{\pi}{6} * \rho * (1 - \varepsilon) * D^3 \quad (5)$$

โดยที่ $S(x)$ เป็นพื้นที่ผิวส่วนที่ว่างของกลุ่มก้อนในมวลอนุภาคขนาด x

$G(x)$ เป็นอัตราการเกิด Layering ของอนุภาคใหม่

ρ เป็นความหนาแน่นจริงเฉลี่ยของปูนเม็ด

ε เป็นความพรุนของปูนเม็ด

จะได้ว่า

$$S(x) = \pi * D^2 \quad (6)$$

จากสมการที่ 5

$$\frac{dx}{dD} = \frac{\pi}{2} * \rho * (1 - \varepsilon) * D^2 \quad (7)$$

แทนสมการที่ 7 ในสมการที่ 6 จะได้

$$S(x) = \frac{2}{\rho(1 - \varepsilon)} * \frac{dx}{dD} \quad (8)$$

แทนสมการที่ 8 ลงในสมการที่ 4 จะได้

$$\begin{aligned} R(x,t) &= G(t) * \frac{2}{\rho(1 - \varepsilon)} * \frac{dx}{dD} \\ &= \gamma(t) * \frac{dx}{dD} \end{aligned} \quad (9)$$

โดยที่ γ เป็นฟังก์ชันอัตราการเกิด Layering ใหม่

นอกจากนี้จะได้ความสัมพันธ์ของ $n(x,t)$ กับ กลุ่มก้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D ดังสมการ

$$n(x,t) = n(D,t) * \frac{dD}{dx} \quad (10)$$

แทนค่าสมการที่ 9 และ 10 ลงในสมการที่ 3 จะได้ว่า

$$\frac{\partial \langle n(D,t) \rangle}{\partial t} = -\gamma(t) * \frac{\partial \langle n(D,t) \rangle}{\partial D} + \frac{1}{2} * \frac{\lambda(t)}{N(t)} \int_0^D n(D - D^*) * n(D^*, t) dD^*$$

$$-\frac{\lambda\langle t \rangle}{N(t)} * n(D,t) \int_0^{\infty} n(D',t) dD' \quad (11)$$

RAMABHADRAN และ SEINFELD⁶ ได้ทำการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลด้วยสมการที่ 11 และได้ผลเฉลยของสมการที่ 11 คือ

$$n(D,t) = \frac{N(t)}{D(t)} * \exp\left(\frac{-D}{D(t)}\right) \quad (12)$$

โดยที่ $\overline{D(t)}$ เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของปูนเม็ด

$$\overline{D(t)} = \frac{\int_0^{\infty} D * n(D,t) dD}{\int_0^{\infty} n(D,t) dD} \quad (13)$$

แทนค่าสมการที่ 12 ลงในสมการ 11 จะทำให้ได้เงื่อนไขที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงขนาดเฉลี่ยของปูนเม็ด ($\overline{D(t)}$) เทียบกับเวลา และจำนวนของปูนเม็ดทั้งหมด ($N(t)$) เทียบกับเวลาดังนี้

$$\frac{d\overline{D(t)}}{dt} = \frac{1}{2} * \lambda\langle t \rangle * \overline{D(t)} \quad (14)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\frac{1}{2} * \lambda\langle t \rangle * N(t) + \gamma\langle t \rangle * \frac{N(t)}{D(t)} \quad (15)$$

การกระจายขนาดของปูนเม็ดโดยปกติสามารถทำการตรวจวัดได้โดยทำ Sieve Analysis ซึ่งจะให้ น้ำหนักสะสมของปูนเม็ดแต่ละขนาด และสามารถเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 12 เมื่อพิจารณาเฉพาะปูนเม็ดที่ปั้นเม็ดเป็นอย่างดี (Well-Formed Nodule) จะได้ความสัมพันธ์ของ Number Fraction, $N(D,t)_{\text{NOD}}$ และ Weight Fraction, $W(D,t)$ ของปูนเม็ดที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลาง D ซึ่งปริมาณของปูนเม็ดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง D ได้จากสมการที่ 5 นั่นคือ

$$N(D,t)_{NOD} = \frac{\int_0^D n(D,t) dD}{\int_0^{\infty} n(D,t) dD} = 1 - \exp\left(\frac{-D}{D(t)}\right) \quad (16)$$

$$W(D,t)_{NOD} = \frac{\int_0^D \frac{\pi}{6} * \rho * (1 - \varepsilon) * D^3 * n(D,t) dD}{\int_0^{\infty} \frac{\pi}{6} * \rho * (1 - \varepsilon) * D^3 * n(D,t) dD} \quad (17)$$

$$= 1 - \exp\left(\frac{-D}{D(t)}\right) * \left[\frac{1}{6} * \left(\frac{D}{D(t)}\right)^3 + \frac{1}{2} * \left(\frac{D}{D(t)}\right)^2 + \frac{D}{D(t)} + 1 \right]$$

การเปลี่ยนแปลงของความพรุนซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของปูนเม็ด ไม่สามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการที่ 17 ซึ่งจากสมการที่ 16 และ 17 ทั้ง Number Fraction และ Weight Fraction จะออกมาเป็นค่าคงที่ เมื่อนำไปพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์กับขนาดของปูนเม็ดซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติของ $p = D / \overline{D(T)}$ และ Weight Fraction ในรูปตัวแปรไร้มิติเป็นฟังก์ชันของ $W(p)$ นั่นคือ

$$W(p) = 1 - \exp(-p) * \left[\frac{1}{6} * p^3 + \frac{1}{2} * p^2 + p + 1 \right] \quad (18)$$

เมื่อพิจารณาการกระจายขนาดของปูนเม็ดทั้งหมด โดยกำหนดให้ Number Fraction ของปูนเม็ดที่ไม่ป็นเม็ดเปรียบเทียบกับจำนวนปูนเม็ดทั้งหมดที่เวลา t เป็น $U(t)$ ดังนั้นจะได้ว่า Number Fraction ของปูนเม็ดที่ป็นเม็ดดีเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนปูนเม็ดทั้งหมดเป็น $1 - U(t)$ โดยตั้งสมมติฐานใหม่ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของปูนเม็ดที่ไม่ป็นเม็ดมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เพราะฉะนั้น Number Fraction ทั้งหมด $N(D,t)_{TOT}$ ของปูนเม็ดที่เป็นฝุ่นมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า D สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$N(D,t)_{TOT} = U(t) + [1 - U(t)] * N(D,t)_{NOD}$$

$$N(D,t)_{TOT} = 1 - [1 - U(t)] \exp\left(\frac{-D}{D(t)}\right) \quad (19)$$

โดยมีสถานะขอบเขตของปูนเม็ดที่ไม่ป็นเม็ดอยู่ในช่วง $0 < 1 - U(t) < 1$ ซึ่งสามารถกำหนดฟังก์ชันใหม่ของ $B(t) > 0$ โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$1 - U(t) = \exp(-B(t)) \quad (20)$$

แทนค่าของสมการที่ 20 ลงในสมการที่ 19 จะได้

$$N(D,t)_{TOT} = 1 - \exp\left(-\frac{D + B(t) * \overline{D(t)}}{\overline{D(t)}}\right) \quad (21)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ 21 กับสมการที่ 16 จะเห็นได้ชัดว่าผลกระทบของปูนเม็ดที่ไม่ป็นเม็ดใน Number Fraction เป็นตัวช่วยชี้ว่า พารามิเตอร์ $B(t) * \overline{D(t)}$ ให้ผลเชิงบวก แต่อย่างไรก็ตาม ไม่มีผลต่อ Number Fraction และ Weight Fraction ดังนั้นสามารถเขียนสมการของ Weight Fraction ทั้งหมด $W(D,t)_{TOT}$ ของปูนเม็ดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า D ได้เป็น

$$W(D,t)_{TOT} = W(p) \quad (22)$$

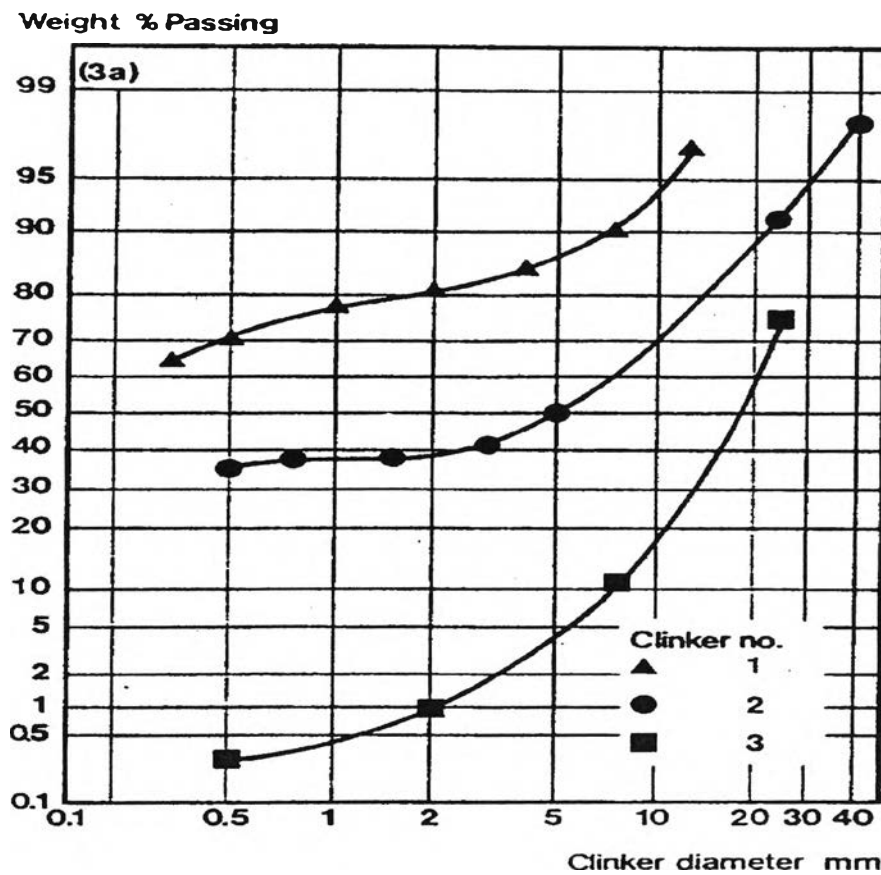
$$\text{โดยที่ } p = \frac{D + B(t) * \overline{D(t)}}{\overline{D(t)}}$$

เมื่อ $W(p)$ เป็นตัวแปรไร้มิติของฟังก์ชัน Weight Fraction ดังนั้นจากกลไกที่อธิบายการป็นเม็ด (Coalescence และ Layering) ในโซนการเผาไหม้ของเตาเผาสามารถคาดหมาย Weight Fraction ของปูนเม็ดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า D ได้โดยใช้สมการที่ 22 และเปรียบเทียบผลกับการทำ Sieve Analysis นอกจากนี้ได้มีการทำไดอะแกรมการกระจายขนาดของปูนเม็ด ดังรูปที่ 2.15

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของปูนเม็ดที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\overline{D(t)}$ สามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการที่ 14 จะได้ว่า

$$\overline{D(t)} = \overline{D(0)} * \exp\left\{\int_0^t \frac{1}{2} * \lambda(t) dt\right\} \quad (23)$$

โดยที่ $t = 0$ เป็นจุดเริ่มต้นในการเกิดปูนเม็ดหลอมเหลวที่ทางเข้าโซนการเผาไหม้



รูปที่ 2.15 ตัวอย่าง Size Distribution of Clinker Plotted in Usual Diagram According to Model Described

(FLS , 1993 : 9)

กำหนดให้ $V(t)$ เป็นสัดส่วนเชิงน้ำหนักของปูนเปิดที่เวลา t ใดๆ และ W_b เป็นน้ำหนักของปูนเม็ดที่จุดอ้างอิง

จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 V(t) &= \frac{1}{W_b} \int_0^\infty \rho * (1 - \varepsilon) * \frac{\pi}{6} * D^3 * n(D,t) dD \\
 &= \frac{\rho * (1 - \varepsilon) * \pi}{W_b} * N(t) * \overline{D(t)^3}
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

จากสมการที่ 24 คิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับเวลา

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{\rho^*(1-\varepsilon)*\pi}{W_b} * \frac{d}{dt} \left(N(t) * (\overline{D(t)})^3 \right) \quad (25)$$

จากสมการที่ 14 และ 15 จะได้

$$\frac{dV(t)}{dt} = V(t) * \left(\lambda(t) + \frac{\gamma(t)}{D(t)} \right) \quad (26, 27)$$

$$V(t) = V(0) * \exp \left\{ \int_0^t \left(\lambda(t) + \frac{\gamma(t)}{D(t)} \right) dt \right\}$$

ดังนั้นการอินทิเกรตสมการที่ 26 จะได้ Volume Fraction ของปูนเม็ดที่ปั้นเม็ดคิตที่เวลา t และจากการทดลองเกี่ยวกับกลไก Coalescence และ Layering เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อ $\lambda(t)$ และ $\gamma(t)$ พบว่าปริมาณของปูนเม็ดที่หลอมเหลวมีผลต่ออัตราการจับตัวและอัตราการการสลายชั้นที่ผิว กล่าวคือ Rate of Coalescence และ Rate of Layering เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของปูนเม็ดหลอมเหลวเพิ่มขึ้น

ดังนั้น ถ้าต้องการให้การปั้นเม็ดเริ่มเกิดขึ้นในโซนการเผาไหม้จะต้องปรับให้ AM เหมาะสม ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 1.6 และเชื่อกันว่าจะทำให้ได้ปริมาณปูนเม็ดหลอมเหลวมากที่สุดที่อุณหภูมิต่ำสุด และจะช่วยเพิ่ม $\lambda(t)$ และ $\gamma(t)$ บริเวณทางเข้าโซนการเผาไหม้ ในขณะที่ SM มีอิทธิพลต่อปริมาณปูนเม็ดหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงกว่า เพราะฉะนั้นถ้าปริมาณปูนเม็ดหลอมเหลวน้อยในช่วงโซนการเผาไหม้จะต้องทำการปรับลด SM ในสารผสมคิบ ซึ่งจะทำให้ปริมาณปูนเม็ดหลอมเหลว $\gamma(t)$ และ $\lambda(t)$ เพิ่มขึ้น

เนื่องจากปูนเม็ดที่หลอมเหลวจะประกอบไปด้วย C_2S และ CaO หลังจากที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีการรวมตัวเกิดผลึก C_3S ดังสมการ

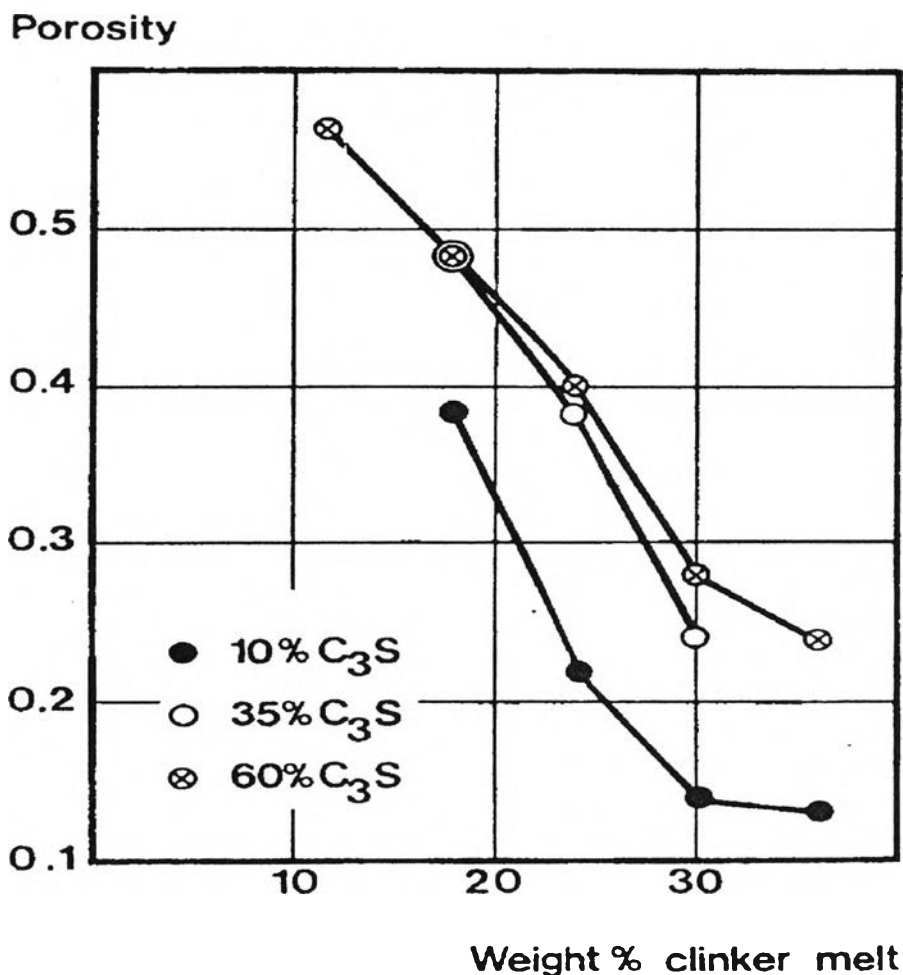


รูปที่ 2.16 แสดงสภาพความพรุนของปูนเม็ดหลังจากเกิดการหลอมเหลว จากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่า ปูนเม็ดที่มีสภาพความพรุนต่ำเป็นปูนเม็ดที่มี C_3S ต่ำซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่า C_3S มีผลต่อการหดตัวและการเสีรูปร่างของวัตถุดิบ

ในโซนการเผาไหม้ กลไก Coalescence สำหรับการปั้นเม็ดไวต่อการเสีรูปร่างของปูนเม็ด ดังนั้นเป็นสิ่งที่คาดกันว่าอัตราการรวมตัวเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญในโซนการเผาไหม้ ซึ่งปริมาณ C_3S ต่ำและอัตราการรวมตัวจะลดลงเมื่อ C_3S สูงขึ้น เนื่องจากการเกิด Coalescence และ Layering เกิด

ขึ้นพร้อมๆ กัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอัตราการรวมตัวจะมีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของปูนเม็ด และปริมาณปูนเม็ดที่เป็นฝุ่นเมื่อออกจากเตาเผา

เมื่อปัจจัยอิมิตัวของโลม์ของสารผสมคิบสูงขึ้น แต่ทำการเผาปูนเพื่อให้ได้ฟรีโลม์ในปูนเม็ดคงเดิมทำให้ระดับ C_3S ในโซนการเผาไหม้สูงขึ้น ดังนั้นอัตราการรวมตัวของปูนเม็ดจะลดลง ซึ่งสามารถคาดคะเนได้จาก รูปที่ 2.16 ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของปูนเม็ดลดลง และปริมาณปูนเม็ดที่เป็นฝุ่นเพิ่มขึ้น

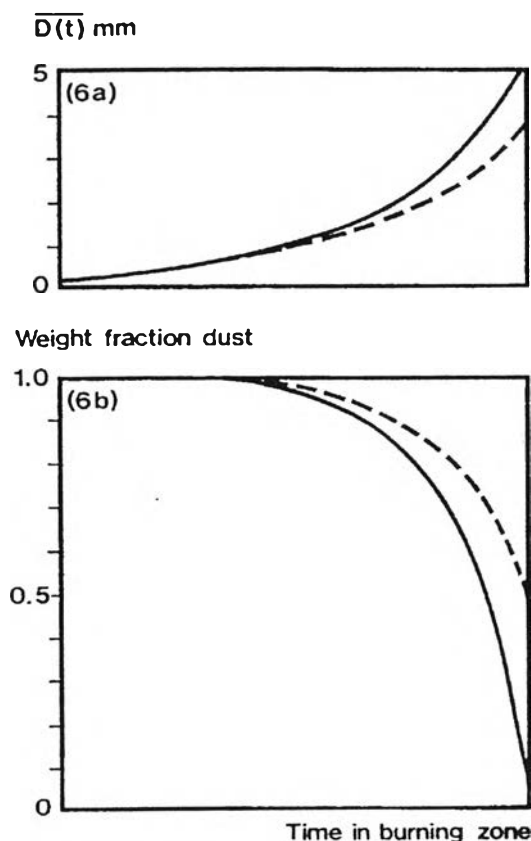


รูปที่ 2.16 Porosities Shortly After Melt Formation in Laboratory Sintering Experiments

(Holderbank , 1990 : 10)

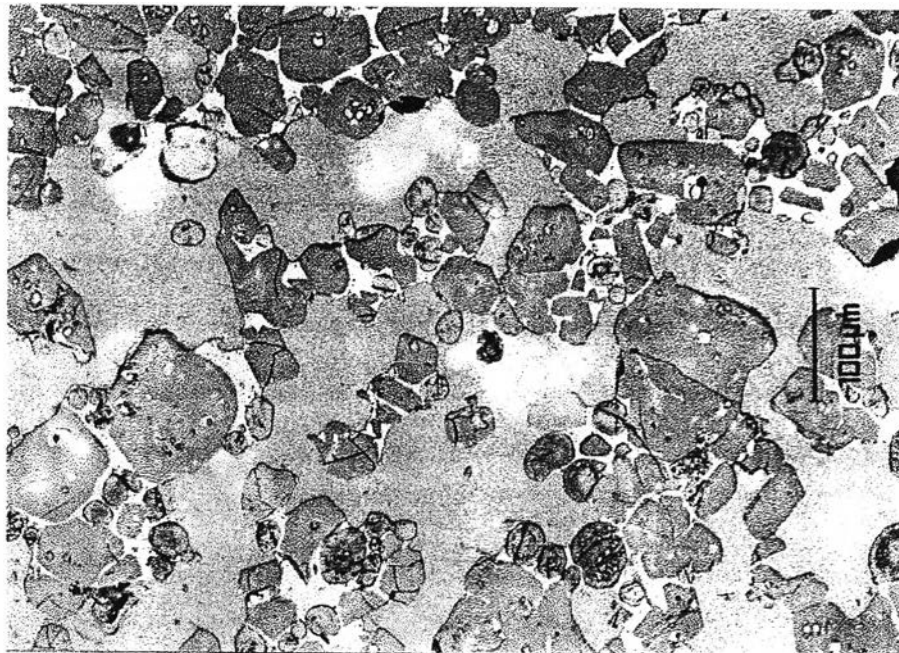
นอกจากนี้ ผลกระทบของขนาดของผลึกในปูนเม็ดจะเกี่ยวข้องกับการหลอมเหลวของปูนเม็ดซึ่งจะเกิดแรงเกาะรวมตัวระหว่างผลึกซึ่งจะยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกัน

ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ปฏิกริยาที่สำคัญที่สุดในการผลิตปูนเม็ดคือ การเปลี่ยนสภาพของไครแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ไปเป็นไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ในช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลว ซึ่งอัตราการเปลี่ยนสภาพของปฏิกริยาสามารถเพิ่มได้โดยการเพิ่มอัตราการแพร่ผ่านของฟริโลมในรูปของเหลวต่ออุณหภูมิ และการเพิ่มปริมาณเฟสของเหลว ดังนั้นความแข็งแรงของปูนเม็ดที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับแรงที่อูร์เซิม และจำนวนของการเชื่อมโฆระดับที่อูร์เซิม (Capillary Bridge) ซึ่งความแข็งแรงของการเชื่อมโฆระดับที่อูร์เซิมเป็นฟังก์ชันผกผันกับแรงตึงผิวของปูนเม็ดที่หลอมเหลว และเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง รวมทั้งความเป็นรูพรุนที่สัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ถ้าผลึกไครแคลเซียมซิลิเกตมีปริมาณมากทำให้มีโอกาสเกิดการรวมตัวของผลึก ไครแคลเซียมซิลิเกตจนกระทั่งมีขนาดโคซึ่งจะขัดขวางการปั้นเม็ดของปูนเม็ด ดังรูปที่ 2.17 และจากการนำตัวอย่างปูนเม็ดที่เป็นฝุ่นไปตรวจสอบด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) จะพบว่าผลึกของไครแคลเซียมซิลิเกตจะโตมาก ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 ขนาดของปูนเม็ด และปริมาณไครแคลเซียมซิลิเกตที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อเวลา

(FLS , 1993 : 13)



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะผลึกของปูนเม็ดที่เป็นฝุ่น โดยที่ผลึกของไตรแคลเซียมซัลเฟตจะมีขนาดใหญ่

(FLS , 1993 : 28)

JOHANSEN⁸ ได้ปรับปรุงแนวความคิดเพื่ออธิบายกระบวนการปั้นเม็ดในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูง โดยแบ่งตามการกระจายของอุณหภูมิภายในเตาเผา ออกเป็น 4 โซน คือ

1 Calcining Zone

เกิดปฏิกิริยาแคลซิเนชัน (Calcination) และเกิดเป็นไตรแคลเซียมซัลเฟต โดยปฏิกิริยาของแข็ง (Solid Reaction) รวมทั้งมีการปล่อยพลังงานความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น (Exothermic Reaction)

2 Sintering Zone แบ่งออกเป็น 2 โซน

2.1 โซนให้ความร้อน (Heating Zone) สารป้อนที่เกิดแคลซิเนชันออกจาก Calcining Zone มีอุณหภูมิประมาณ 900°C และจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงประมาณ 1300°C ซึ่งเป็นช่วงที่เริ่มเกิดเฟสของเหลวก่อนเข้าโซนของเหลว (Liquid Zone)

2.2 โซนของเหลว (Liquid Zone) เกิดการปั้นเม็ดที่อุณหภูมิระหว่าง $1300 - 1350^{\circ}\text{C}$ โดยที่ปริมาณ และองค์ประกอบของเฟสของเหลวเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งในช่วงนี้เฟสของเหลว และไตรแคลเซียมซัลเฟตเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน โดยเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

ดังนั้นกระบวนการป็นเม็ดในช่วงนี้จึงถูกกำหนดโดยพื้นที่ผิวของปูนเม็ด และการโตขึ้นของผลึก ไตรแคลเซียมซลิเกต ภายใต้สภาวะการเพิ่มสัดส่วนของเฟสของเหลว เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ถ้าผลึก ไตรแคลเซียมซลิเกตขนาดเล็กเกิดเร็วเกินไปจะขัดขวางการป็นเม็ดของปูนเม็ด และจะยับยั้งกระบวนการป็นเม็ดอย่างสมบูรณ์ เมื่ออัตราส่วนของไตรแคลเซียมซลิเกตต่อผลึกของ ไตรแคลเซียมซลิเกตมากขึ้นเรื่อยๆ

3 โซนตามอุณหภูมิสูงสุด (Maximum Temperature Zone)

เป็นช่วงที่อยู่ภายใต้เปลวโดยมีการเกิดผลึก ไตรแคลเซียมซลิเกต และโตขึ้นเรื่อยๆ จนถึงสภาวะสมดุลย์ ผลึก ไตรแคลเซียมซลิเกตเกิดความเสถียรก็จะสิ้นสุดกระบวนการป็นเม็ด

4 โซนระบายความร้อน (Cooling Zone)

เมื่อสารป้อนผ่านใต้เปลวจะเกิดการเย็นตัวลงทำให้เฟสของเหลวเกิดการรวมตัว และแข็งตัว อาจมีการพอกสะสมหรือเกิดโค้ดได้ในช่วงนี้

โซนที่มีความสำคัญมากต่อกระบวนการป็นเม็ดคือ โซนให้ความร้อน และโซนระบายความร้อนซึ่งจะต้องมีระยะยาวเพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยา โดยที่ความยาวสัมพัทธ์ของทั้ง 2 โซนจะถูกกำหนดโดยปัจจัยต่อไปนี้คือ

- 1 องค์ประกอบทางเคมีของสารป้อน
- 2 การกระจายของอุณหภูมิในเตาเผา

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการป็นเม็ด

1 ซิลิกาโมคูลัส

1.1 กรณีซิลิกาโมคูลัสมีค่าต่ำ โดยการเติมเฟอร์ริกออกไซด์ลงในสารผสมดิบ ทำให้ปริมาณเฟสของเหลวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง และเวลาในการเผาปูนสั้นลง จากการลดอุณหภูมิจะมีผลทำให้อัตราการเปลี่ยนสภาพจาก ไตรแคลเซียมซลิเกตไปเป็น ไตรแคลเซียมซลิเกตจะลดลงในช่วงแรกเท่านั้น แต่จะส่งผลให้การป็นเม็ดดีขึ้น การลดลงของค่าซิลิกาโมคูลัสมีข้อจำกัดเนื่องจากถ้าซิลิกาโมคูลัสต่ำมากเกินไปจะรบกวนกระบวนการผลิตโดยอาจเป็นสาเหตุให้เกิดโค้ดในเตา (Ring Formation) และคุณภาพของปูนเม็ดจะลดลง

1.2 กรณีซิลิกาโมคูลัสสูง มีผลทำให้ปริมาณเฟสของเหลวลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มขนาดอนุภาคของควอทซ์โคกว่า 45 ไมครอน ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมี และนำไปสู่สภาวะการเผาปูนยากต้องใช้อุณหภูมิของการเผาไหม้สูงขึ้น (ปริมาณเฟสของเหลวน้อย) จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของโซนของเหลว และโซนอุณหภูมิสูงสุด ยืดยาวออกไป การเพิ่มอุณหภูมิของการเผาไหม้ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

ผลึกไครแคลเซียม-ซิลิเกตที่ได้มีขนาดใหญ่จะรบกวนกระบวนการป่นเม็ด ทำให้เกิดปูนเม็ดที่มีลักษณะเป็นฝุ่น (Fine - Grained Clinker)

2 อะลูมินาโมคูลัส

จากการลดค่าซิลิกาโมคูลัส โดยการเพิ่มเฟอร์ริกออกไซด์ในสารผสมดิบจะทำให้อะลูมินาโมคูลัสลดลงด้วย ผลการลดลงของอะลูมินาโมคูลัสต่อกระบวนการป่นเม็ดมีลักษณะเช่นเดียวกับการลดซิลิกาโมคูลัส ในทางตรงกันข้ามถ้าอะลูมินาโมคูลัสสูงมีค่าสูงขึ้นไปจะส่งผลทำให้ฟรีไลม์และไคแคลเซียมซิลิเกตสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณเฟอร์ริกออกไซด์ต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับอะลูมินาออกไซด์ การเกิดเฟสของเหลวจะต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้น โดยจะทำให้โซนให้ความร้อนสูงขึ้น และโซนของเหลวสั้นลง ทำให้สภาวะการป่นเม็ดที่เหมาะสมน้อยลง

3 ปังจยอิมตัวของไลม์ (LSF)

การลดลงของปังจยอิมตัวของไลม์ในสารป้อน หรือ ปูนเม็ดช่วยในการปรับปรุงลักษณะของปูนเม็ดโดยไม่ทำให้ปริมาณเฟสของเหลวเพิ่มขึ้น แต่จะปรับปรุงในด้านการเผาปูนง่ายขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิในการเผาใหม้ลดลง และความยาวของโซนอุณหภูมิสูงสุดลดลง และโซนของเหลวยาวที่เหมาะสมขึ้น ช่วยปรับปรุงสภาวะการป่นเม็ดให้ดีขึ้น กล่าวคือการเกิดปูนเม็ดที่เป็นฝุ่นที่มีสาเหตุมาจากสารผสมดิบเผาอาจจะต้องเพิ่มอุณหภูมิในการเผาใหม่ ทำให้โซนอุณหภูมิสูงสุด ยาวมากขึ้น ในขณะที่โซนของเหลวสั้นลง

4 อิทธิพลของเฟสของเหลว

สัดส่วนของปูนเม็ดที่มีขนาดใหญ่ เป็นผลจากการมีปริมาณเฟสของเหลวที่เพียงพอ ตลอดจนการกระจายตัวที่ดี และมีแรงตึงผิวสูง สามารถรวมตัวกับอนุภาคของแข็งที่ละเอียดปริมาณมากได้ ปริมาณเฟสของเหลวในปูนเม็ด 24 - 28 % จัดเป็นปริมาณที่เพียงพอ ซึ่งถ้าปริมาณเฟสของเหลวมากกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่ระบุจะทำให้สภาวะการป่นเม็ดไม่เหมาะสมตัวอย่างเช่น ถ้าปูนเม็ดมีปริมาณเฟสของเหลว มากจะทำให้ปูนเม็ดแข็งแรง มีรูพรุนน้อย และยากต่อการบด

5 การกระจายตัวของเฟสของเหลว

ปกติปูนเม็ดหลอมเหลวจะกระจายตัวได้ดีในช่วงอุณหภูมิในการเผาใหม่ แต่การกระจายตัวไม่ดีจะมีสาเหตุมาจากอนุภาคของสารผสมดิบที่หยาบ ได้แก่ ควอทซ์ และแคลไซต์ ซึ่งบดยาก ทำให้การกระจายตัวของปูนเม็ดหลอมเหลวไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเกิดผลึกไคแคลเซียมซิลิเกตหยาบ และ/ หรือฟรีไลม์มากเกินไป ทำให้ปูนเม็ดยาก

6 แรงตึงผิวของปูนเม็ดหลอมเหลว

การพิจารณาแรงตึงผิวของปูนเม็ดหลอมเหลวสามารถตรวจสอบได้จากองค์ประกอบทางเคมีของปูนเม็ด กล่าวคือการเพิ่มปริมาณเฟอร์ริกออกไซด์ในปูนเม็ดทำให้แรง

ตั้งผิวลดลงซึ่งผลนี้จะทำให้การป็นเม็ดลดลงมากกว่าการชดเชยด้วยการเพิ่มระยะทางของปูนเม็ดหลอมเหลวในกระบวนการป็นเม็ดเพราะอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการหลอมเหลวต่ำลงจึงทำให้โซนของเหลวยาวขึ้น

แรงตั้งผิวเป็นฟังก์ชันผกผันกับอุณหภูมิของการหลอมเหลว โดยที่การป็นเม็ดในโซนอุณหภูมิสูงสุดจะไม่เหมาะสม เนื่องจากแรงตั้งผิวของปูนเม็ดหลอมเหลวต่ำ

7 อิทธิพลของขนาดอนุภาค

ขนาดของอนุภาคสารผสมคิบเป็นปัจจัยเบื้องต้นที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการป็นเม็ด โดยเฉพาะอย่างยิ่งแคลไซต์ และควอทซ์ ทำให้ความสามารถในการเผาไหม้น้อยลง (Burnability) อีกทั้งทำให้ผลึกของไคแคลเซียมซลิเกตและไตรแคลเซียมซลิเกตมีขนาดใหญ่ซึ่งจะรบกวนต่อกระบวนการป็นเม็ด สามารถทำการลดการรบกวนจากปัจจัยดังกล่าวได้โดยการบดสารผสมคิบให้ละเอียด

นอกจากนี้ขนาดผลึกของฟรีไลม์และไคแคลเซียมซลิเกตที่จะรวมตัวกันในระหว่างการเผาปูนอาจมีขนาดเพิ่มขึ้นถ้า Calcining Zone ยาวมากเกินไปจนเกิดเฟสของเหลว

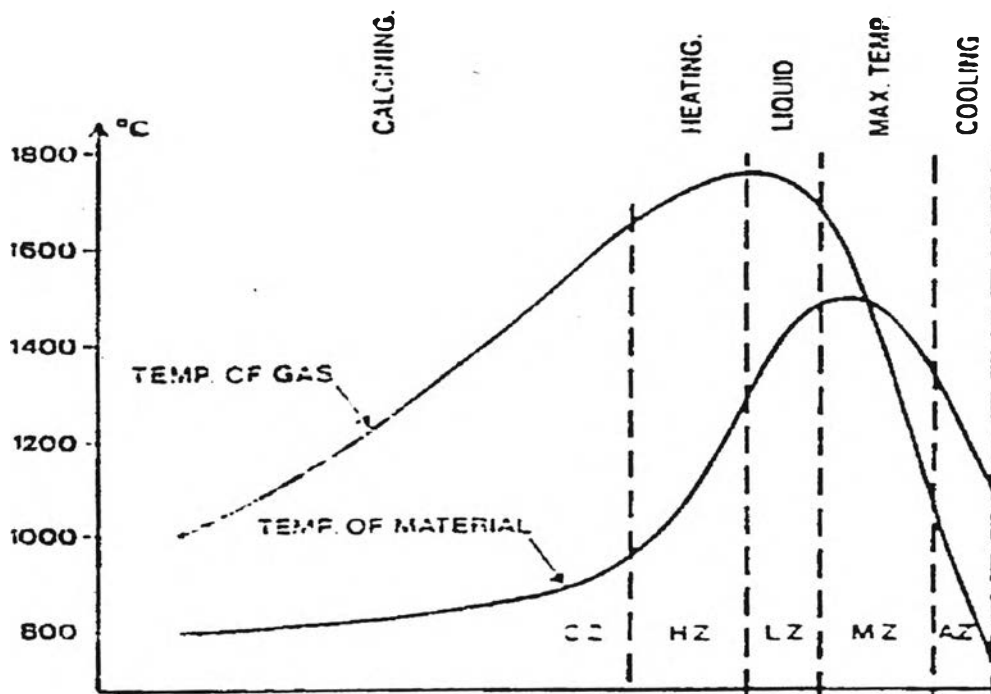
8 อิทธิพลของการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา

การเกิดผลึกของฟรีไลม์ และไคแคลเซียมซลิเกตขนาดใหญ่อาจมีสาเหตุมาจากเปลวที่ยาวทำให้การกระจายของอุณหภูมิในช่วง Calcining Zone และ โซนให้ความร้อนยาวขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโซนของเหลว และผลึกไตรแคลเซียมซลิเกตจะใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็ว

คังรูปที่ 2.19

9 อิทธิพลของขนาดของเตาเผา

เตาขนาดเล็กจะมีเปลวที่สัมผัสอย่างใกล้ชิดกับอิฐทนไฟ และสารผสมคิบในเตาเผา นั่นคือการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการแผ่รังสีความร้อนในเตาขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพมากกว่าเตาขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโซนของเหลวและโซนอุณหภูมิสูงสุด



รูปที่ 2.19 การแบ่งช่วงอุณหภูมิภายในเตาเผา
(FLS , 1990 : 17)