

# คุณสมบัติของปูนซีเมนต์

บทที่

# 3



รูปที่ 3-1 เครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีของปูนซีเมนต์

## บทคัดย่อ

ปูนซีเมนต์ มีลักษณะเป็นผงละเอียด สามารถเกิดการก่อตัวและการแข็งตัวได้ด้วยการทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งเรียกว่า “ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)” ทำให้มีคุณสมบัติในการรับแรงได้

การทำความเข้าใจองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์ จะช่วยให้สามารถแปลความหมายผลการทดสอบปูนซีเมนต์ได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้เพราะคุณสมบัติของปูนซีเมนต์มีผลสำคัญต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีต

เนื้อหาในบทนี้ ได้กล่าวถึง คุณสมบัติของสารประกอบหลัก 4 ชนิด ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้แก่ ไตรซิลิเคียมซิลิเกต ( $C_3S$ ), ไดซิลิเคียมซิลิเกต ( $C_2S$ ), ไตรซิลิเคียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ), และเตตระซิลิเคียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $C_4AF$ ) รวมทั้งสารประกอบรอง ได้แก่ ยิบซัม, Free Lime, แมกนีเซียมออกไซด์, และอัลคาไลออกไซด์ นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึง การก่อตัวและการแข็งตัว, ปฏิกิริยาไฮเดรชัน, การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์, ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน, คุณสมบัติทางเคมีอื่น ๆ (การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา, และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง), และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์ที่สำคัญ ได้แก่ ขนาดอนุภาคและความละเอียด, ความอยู่ตัว, ความชื้นเหลว, ระยะเวลาการก่อตัว, การก่อตัวผิดปกติ, กำลังอัด, และความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน



### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์ ซึ่งการทำความเข้าใจเรื่องดังกล่าวนี้ จะช่วยให้สามารถแปลความหมายผลการทดสอบปูนซีเมนต์ได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้เพราะคุณสมบัติของปูนซีเมนต์มีผลสำคัญต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีต

ส่วนเนื้อหาเกี่ยวกับประเภทของปูนซีเมนต์, การประยุกต์ใช้งานปูนซีเมนต์แต่ละประเภท, และข้อกำหนดมาตรฐานคุณสมบัติทั้งทางเคมีและทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์แต่ละประเภท จะได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ต่อไป

### 3.2 องค์ประกอบทางเคมี

เมื่อวัตถุดิบได้รับการเผาในหม้อเผา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

**ขั้นตอนที่ 2** ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) จะถูกขับออกจากหินปูนหรือดินสอพอง เหลือไว้เพียง  $\text{CaO}$

**ขั้นตอนที่ 3** เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ระหว่างแคลเซียม (จากหินปูน, หรือดินสอพอง) กับ ซิลิกา อลูมินา และเหล็ก (จากดินดำหรือดินเหนียว, หรือดินดาน)

**ขั้นตอนที่ 4** เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่าง ๆ และตามด้วยกระบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัวลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ออกไซด์หลัก ได้แก่  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ซึ่งรวมกันประมาณ 90% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์
- ออกไซด์รอง ได้แก่  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , และยิปซั่ม ปริมาณออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงใน ตารางที่ 3-1

ออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
<b>ออกไซด์หลัก</b>	
$\text{CaO}$	60 - 67
$\text{SiO}_2$	17 - 25
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3 - 8
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.5 - 6.0
<b>ออกไซด์รอง</b>	
$\text{MgO}$	0.1 - 5.5
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0.5 - 1.3
$\text{TiO}_2$	0.1 - 0.4
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.1 - 0.2
$\text{SO}_3$	1 - 3

ตารางที่ 3-1 ค่าออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ออกไซด์หลัก จะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบหลักที่สำคัญ 4 ชนิด ดังแสดงใน ตารางที่ 3-2

ชื่อสารประกอบหลัก	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
ดิแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

ตารางที่ 3-2 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 3-2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของการผลิตและการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

การหาเปอร์เซ็นต์ของแต่ละองค์ประกอบของปูนซีเมนต์สามารถคำนวณได้จาก มอก. 15 เล่ม 18 การวิเคราะห์ทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก หรือ ASTM C 114 หรือใช้สูตรการคำนวณของ Bogue ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณ } \text{C}_3\text{S} &= 4.07 (\text{CaO}) - 7.60 (\text{SiO}_2) - 6.72 (\text{Al}_2\text{O}_3) - \\ &\quad 1.43 (\text{Fe}_2\text{O}_3) - 2.85 (\text{SO}_3) \\ \text{ปริมาณ } \text{C}_2\text{S} &= 2.87 (\text{SiO}_2) - 0.754 (\text{C}_3\text{S}) \\ \text{ปริมาณ } \text{C}_3\text{A} &= 2.65 (\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.69 (\text{Fe}_2\text{O}_3) \\ \text{ปริมาณ } \text{C}_4\text{AF} &= 3.04 (\text{Fe}_2\text{O}_3) \end{aligned}$$



ตัวเลขในวงเล็บ คือ เปอร์เซนต์ของออกไซด์ในเนื้อของปูนซีเมนต์ทั้งหมด และปริมาณ CaO ในสูตรที่ใช้คำนวณ ต้องเป็น CaO ที่ทำปฏิกิริยาเท่านั้น ไม่รวม Free Lime

ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลักตามสูตรของ Bogue อยู่ใน *ตารางที่ 3-3*

ออกไซด์ต่างๆ ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (%)	สารประกอบหลัก จำนวนจากสมการของ Bogue
CaO	64.73
SiO <sub>2</sub>	21.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.08
MgO	1.04
SO <sub>3</sub>	2.01
Na <sub>2</sub> O	0.19
K <sub>2</sub> O	0.42
Loss on Ignition	1.45
Insoluble Residue	0.66
Free Lime	1.60

สารประกอบหลัก	คำนวณจากสมการของ Bogue
C <sub>3</sub> S	$= 4.07 \times (64.73 - 1.60) - 7.60 \times (21.20) - 6.72 \times (5.22) - 1.43 \times (3.08) = 50.6\%$
C <sub>2</sub> S	$= 2.87 \times (21.20) - 0.754 \times (50.6) = 22.7\%$
C <sub>3</sub> A	$= 2.65 \times (5.22) - 1.69 \times (3.08) = 8.6\%$
C <sub>4</sub> AF	$= 3.04 \times (3.08) = 9.4\%$

*ตารางที่ 3-3* ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



ก) ผลึก C<sub>3</sub>S (Alite) ในปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (ขยาย 3,000 เท่า)



ข) ส่วนประกอบของปูนเม็ด ประกอบด้วย C<sub>3</sub>S (Alite) ซึ่งมีสีอ่อนกว่า และรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ส่วนผลึกที่มีลักษณะกลมและมีสีทึบคือ C<sub>2</sub>S (Belite) (ขยาย 400 เท่า)

รูปที่ 3-3 รูปร่างของ C<sub>3</sub>S ซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยม และ C<sub>2</sub>S เป็นเม็ดกลมสีดำ 8

แต่เนื่องจากการใช้สูตรของ Bogue มีความไม่แน่นอนอยู่ด้วย ดังนั้นอาจใช้การวิเคราะห์ด้วย XRD (X-Ray Diffraction) [ ASTM C 1365 ] ซึ่งให้ค่าที่มีความแม่นยำถูกต้องสูงกว่า

### 3.3 คุณสมบัติของสารประกอบหลัก

คุณสมบัติของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด มีผลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ดังนี้

#### 1. ไตรซิลิเกต (C<sub>3</sub>S หรือ Alite)

C<sub>3</sub>S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีอ่อนกว่า C<sub>2</sub>S ดัง *รูปที่ 3-3* คุณสมบัติของ C<sub>3</sub>S จะเหมือนกับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดการก่อตัวและการแข็งตัวภายใน 2 - 3 ชั่วโมง การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก ดัง *รูปที่ 3-4* โดยทั่วไปแล้วกำลังอัดในช่วงแรกของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปอร์เซนต์ของ C<sub>3</sub>S เพิ่มขึ้น โดยปริมาณยิปซัมจะมีผลต่อกำลังอัดของ C<sub>3</sub>S ด้วย ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C<sub>3</sub>S อยู่ประมาณ 50 - 70% ดัง *ตารางที่ 3-4*

#### 2. ไดซิลิเกต (C<sub>2</sub>S หรือ Belite)

C<sub>2</sub>S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C<sub>2</sub>S มีอยู่หลายรูปแต่มีเพียง βC<sub>2</sub>S เท่านั้นที่มีความเสถียร ณ อุณหภูมิทั่วไป βC<sub>2</sub>S มีคุณสมบัติยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวและเกิดความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวแล้วจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ ในช่วงแรก และกำลังอัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอายุ

มากกว่า 7 วัน แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ  $C_3S$  ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี  $C_2S$  อยู่ประมาณ 15 - 30%

### 3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ )

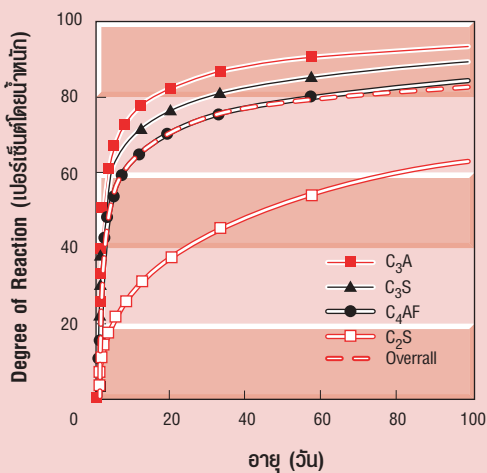
$C_3A$  เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนสูงในช่วงแรก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิบซัมลงไปในช่วงตอนการบดปูนซีเมนต์เพื่อทำหน้าที่หน่วงการก่อตัวเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของ  $C_3A$  และจะพัฒนากำลังอัดในช่วง 1 - 2 วัน แต่มีค่ากำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี  $C_3A$  อยู่ประมาณ 5 - 10% นอกจากนี้ยังพบว่า ปูนซีเมนต์ที่มี  $C_3A$  ต่ำกว่า จะสามารถทนทานต่อซัลเฟตได้ดีกว่า

### 4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $C_4AF$ หรือ Celite)

$C_4AF$  เป็นสารประกอบที่ได้จากการใช้วัตถุดิบที่มีสารประกอบแร่เหล็กและอลูมิเนียม เพื่อลดอุณหภูมิของปูนเม็ดระหว่างกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และจะมีผลต่อสีของปูนซีเมนต์ โดยทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา  $C_4AF$  มีคุณสมบัติทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็ว และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดขึ้นประมาณ 420 จูลต่อกรัม ค่ากำลังอัดของ  $C_4AF$  มีค่าต่ำและไม่แน่นอน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี  $C_4AF$  อยู่ประมาณ 5 - 15%

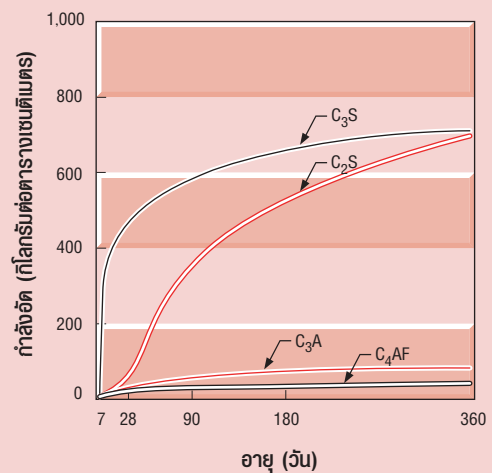
สารประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์ของปูนเม็ด)
$C_3S$ (Alite)	50 - 70
$C_2S$ (Belite)	15 - 30
$C_3A$	5 - 10
$C_4AF$ (Celite)	5 - 15

ตารางที่ 3-4 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบหลักของปูนเม็ด 8



Overall Us: กบด้วย  $C_3S$  55%,  $C_2S$  10%,  $C_3A$  10%, และ  $C_4AF$  8%

ก) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 8



ข) กำลังอัดของสารประกอบหลัก 6

รูปที่ 3-4 การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



คุณสมบัติ	C <sub>3</sub> S (Alite)	C <sub>2</sub> S (Belite)	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF (Celite)
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Rate of Hydration)	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด (Strength Development)	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย (Ultimate Strength)	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration)	ปานกลาง (500 จูลต่อกรัม)	น้อย (250 จูลต่อกรัม)	สูงมาก (850 จูลต่อกรัม)	ปานกลาง (420 จูลต่อกรัม)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือน ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์	-	ไม่เสกียรในน้ำ และถูกซัลเฟต ทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์ มีสีเทา

ตารางที่ 3-5 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

### 3.4 คุณสมบัติของสารประกอบ

#### 1. ยิปซั่ม (Gypsum หรือ Calcium Sulphate Dihydrate หรือ CaSO<sub>4</sub>•2H<sub>2</sub>O)

ยิปซั่มเป็นหนึ่งในสามรูปแบบของสารประกอบซัลเฟตได้แก่

1. ยิปซั่ม (Gypsum หรือ Calcium Sulphate Dihydrate หรือ CaSO<sub>4</sub>•2H<sub>2</sub>O)
2. Anhydrite (หรือ Anhydrous Calcium Sulphate หรือ CaSO<sub>4</sub>)
3. Plaster หรือ Hemihydrate (หรือ Plaster of Paris หรือ Bassanite หรือ Calcium Sulphate Hemihydrate หรือ CaSO<sub>4</sub>•1/2H<sub>2</sub>O)

โดยจะมีการเติมยิปซั่มในระหว่างการบดปูนซีเมนต์ เพื่อทำปฏิกิริยากับ C<sub>3</sub>A เป็น Ettringite (Calcium Trisulphoaluminate) เพื่อหน่วงการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C<sub>3</sub>A หรือเป็นการควบคุมระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ถ้าไม่ได้เติมยิปซั่ม ปูนซีเมนต์จะเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว ปริมาณยิปซั่มที่ใส่ต้องเหมาะสม เพื่อให้ปูนซีเมนต์เกิดกำลังอัดสูงสุด และเกิดการหดน้อยที่สุด โดยปริมาณยิปซั่มที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ปริมาณอัลคาไลออกไซด์ ได้แก่ Na<sub>2</sub>O และ K<sub>2</sub>O
2. ปริมาณ C<sub>3</sub>A
3. ความละเอียด (Fineness) ของปูนซีเมนต์

นอกจากนี้จะต้องมีการควบคุมปริมาณยิปซั่มที่ใส่ไม่ให้มากเกินไป เพราะอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจากการเกิด Ettringite มากเกินไป

#### 2. Free Lime (CaO)

Free Lime สามารถเกิดได้ 2 กรณี ได้แก่

1. เมื่อวัตถุดิบมีปริมาณ CaO มากเกินไป ทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ได้หมด
2. เมื่อวัตถุดิบมีปริมาณ CaO ไม่มาก แต่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ต่างๆ ไม่สมบูรณ์ Free Lime จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้า ๆ หลังจากทำปูนซีเมนต์

แข็งตัวแล้ว ทำให้เกิดการขยายปริมาตร ที่อาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าว และเสียหายได้โดยจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ความไม่อยู่ตัวเนื่องจาก Lime (Unsoundness Due to Lime)”

นอกจากปริมาณ  $\text{CaO}$  ที่มีผลต่อความไม่อยู่ตัวแล้ว ขนาดของอนุภาค และการกระจายตัวของปูนซีเมนต์ก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลเช่นกัน จากเหตุผลนี้ มาตรฐานข้อกำหนดคุณภาพของปูนซีเมนต์ มอก. 15 เล่ม 1 และ ASTM C 150 จึงได้มีการกำหนดค่าสูงสุดของปริมาณ Free Lime ไว้ แต่จะใช้วิธีวัดค่าการขยายตัวแทน

### 3. แมกนีเซียมออกไซด์ หรือ แมกนีเซีย

(Magnesium Oxide หรือ Magnesia หรือ  $\text{MgO}$ )

วัตถุประสงค์ในการผลิตปูนซีเมนต์โดยปกติจะมี  $\text{MgCO}_3$  เมื่อเผาจะเกิดการแยกตัวเป็น  $\text{MgO}$  และ  $\text{CO}_2$  แมกนีเซียออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ด ที่เหลือจะอยู่ในรูปผลึก Periclase ( $\text{MgO}$ ) ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเหมือนกับ  $\text{CaO}$  คือ ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดความไม่อยู่ตัว (Unsoundness) และอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวได้

การขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

1. ปริมาณของ  $\text{MgO}$  ในปูนซีเมนต์
2. ขนาดของ  $\text{MgO}$

ความไม่อยู่ตัวของ  $\text{MgO}$  จะขึ้นอยู่กับขนาดของผลึก เพราะถ้าผลึกมีขนาดเล็ก ปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว

ที่อุณหภูมิปกติ  $\text{MgO}$  จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ช้ามากโดยใช้เวลานานเป็นปี ๆ ดังนั้นการทดสอบการขยายตัวในช่วงเวลาสั้น ๆ จึงเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้จึงได้นำวิธีการของ Autoclave มาใช้ในการทดสอบการขยายตัว [ ASTM C 151 ] อีกทั้งยังเป็นวิธีที่สามารถวัดค่าการขยายตัวรวมอันเกิดจาก  $\text{CaO}$  และ  $\text{MgO}$  ได้อีกด้วย

### 4. อัลคาไลออกไซด์

(Alkali Oxides หรือ  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ )

อัลคาไลออกไซด์ ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่สามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลหรือด่างในปูนซีเมนต์ มาผสมเป็นคอนกรีต จะทำให้เกิด “ปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม (Alkali-Aggregate Reaction หรือ AAR)” ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย ยกต่อการแก้ไข ในกรณีนี้จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลได้ ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลต่ำ กล่าวคือ ปริมาณอัลคาไลในปูนซีเมนต์ หรือ Total Alkalies (หรือ Eq.  $\text{Na}_2\text{O}$ ) จะต้องไม่เกิน 0.6% โดยสามารถคำนวณหาค่า Total Alkalies ได้จากสูตร

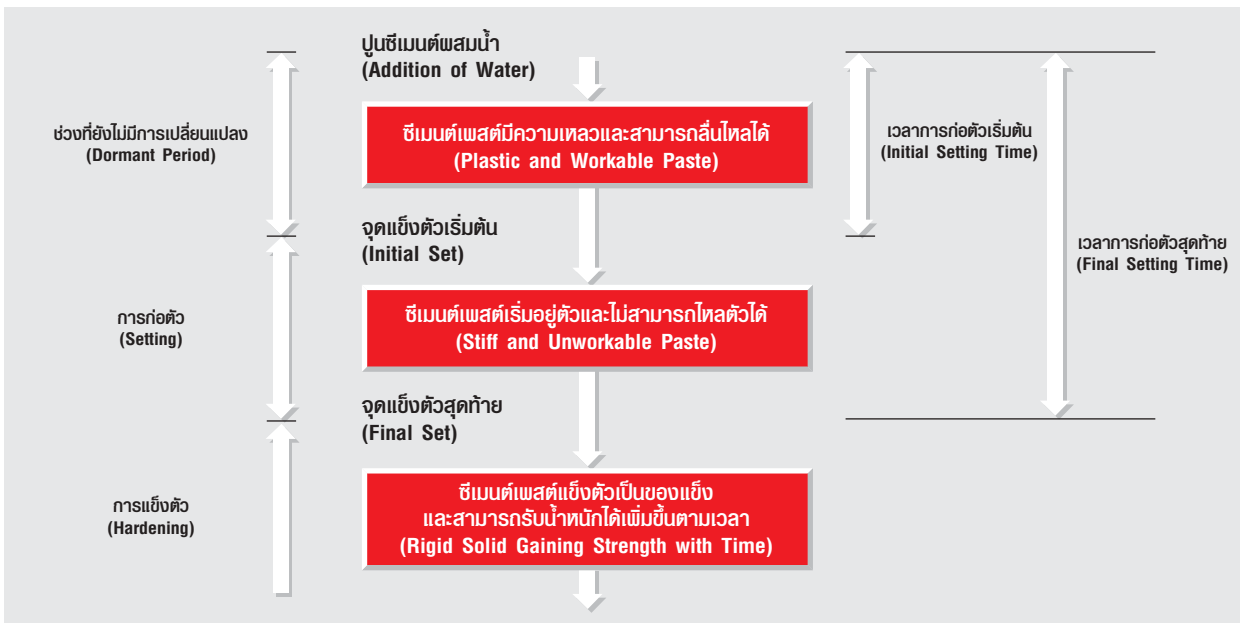
$$\text{Total Alkalies} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658 (\text{K}_2\text{O})$$



### 3.5 การก่อตัวและการแข็งตัว

ปูนซีเมนต์ มีลักษณะเป็นผงละเอียด สามารถเกิดการก่อตัวและการแข็งตัวได้ด้วยการทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งเรียกว่า “ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)” ทำให้มีคุณสมบัติในการรับแรงได้

ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำ จะก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวและสามารถสั่นไหลได้ในเวลาหนึ่ง โดยจะเรียกช่วงเวลาที่คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า “Dormant Period” หลังจากนั้น ซีเมนต์เพสต์จะเริ่มจับตัว (Stiff) ถึงแม้ว่าจะยังนุ่มอยู่ แต่ก็ไม่สามารถไหลตัวได้อีกแล้ว (Unworkable) จุดนี้จะเป็นจุดที่เรียกกันว่า “จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Set)” และระยะเวลาตั้งแต่ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดนี้ เรียกว่า “เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time)” การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่เป็นของแข็งที่คงสภาพ (Rigid Solid) ซึ่งจะเรียกว่า “จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Set)” และเวลาที่ใช้นจนถึงจุดดังกล่าว เรียกว่า “เวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time)” ซีเมนต์เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไป จนกระทั่งสามารถรับน้ำหนักได้ กระบวนการทั้งหมดนี้ เรียกว่า “การก่อตัวและการแข็งตัว (Setting and Hardening)” ดังใน รูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 ขั้นตอนการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์

### 3.6 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของปูนซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ

1. อาศัยสารละลาย ปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด Ions ในสารละลาย และ Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น



2. การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า "Solid State Reaction"

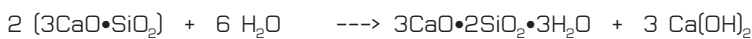
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละชนิดของปูนซีเมนต์

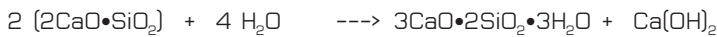
- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซิลิเกต (C<sub>3</sub>S และ C<sub>2</sub>S)

ซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด "ซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>)" ประมาณ 15 - 25% และสารประกอบ "ซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate หรือ 3CaO•2SiO<sub>2</sub>•3H<sub>2</sub>O หรือ C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub> หรือ CSH)" ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน และให้ความแข็งแรง ดังสมการต่อไปนี้

สมการของ C<sub>3</sub>S



สมการของ C<sub>2</sub>S



จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะเกิด Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน โดยองค์ประกอบทางเคมีของ CSH จะขึ้นอยู่กับ อายุ, อุณหภูมิ, และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

Ca(OH)<sub>2</sub> ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างมาก คือ มี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

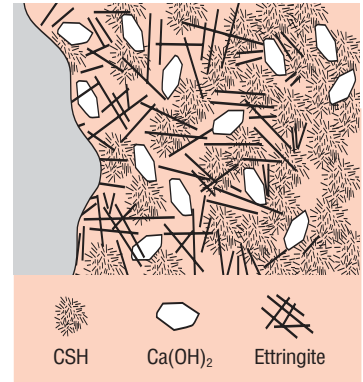
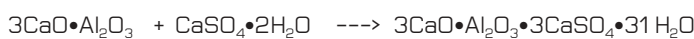
- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรซิลิเกต (C<sub>3</sub>A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C<sub>3</sub>A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ดังสมการต่อไปนี้

สมการของ C<sub>3</sub>A



ในกระบวนการบดปูนซีเมนต์ จะมีการใส่ยิบซั่มเข้าไป เพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C<sub>3</sub>A ไม่ให้เกิดเร็วเกินไป โดยยิบซั่มที่ใส่จะทำปฏิกิริยากับ C<sub>3</sub>A ทำให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C<sub>3</sub>A ดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 3-6 แผนภาพแสดงผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซิลิเกต

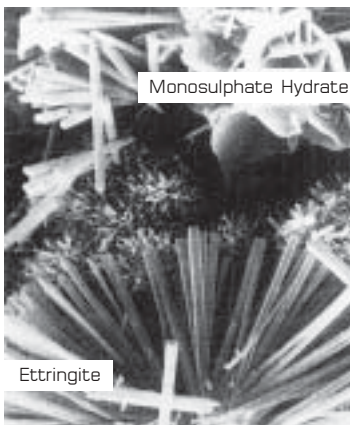


รูปที่ 3-7 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว 8



- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  จะเกิดขึ้นทันทีหลังจากที่มีการผสมน้ำในปูนซีเมนต์
- ยับยั้งจะทำปฏิกิริยากับ  $C_3A$  ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค  $C_3A$  (เกิดการหน่วงการก่อตัวของ  $C_3A$ )
- แรงดันจากผลึกของ Ettringite จะทำให้ชั้นของ Ettringite แยกออก
- ส่วนที่แยกออกจะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่ (เกิดการหน่วงการก่อตัวของ  $C_3A$  อีกครั้งหนึ่ง)
- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  จะเกิดสมบูรณ์โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate และจะหยุดเมื่อ  $SO_4^{2-}$  มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite

รูปที่ 3-8 กระบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$



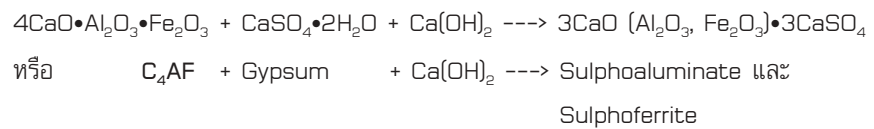
รูปที่ 3-9 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของ Ettringite และ Monosulphate

ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ  $C_3A$  และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3S$  และ  $C_3A$  เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจาก การเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แยกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate ดังแสดงใน **รูปที่ 3-8** และ **รูปที่ 3-9**

● ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระคัลเซียมอลูมิเนียมเฟอไรต์ ( $C_4AF$ )

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_4AF$  นี้ จะเกิดในช่วงต้น โดย  $C_4AF$  จะทำปฏิกิริยากับ ยิบซั่ม และ  $Ca(OH)_2$  ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferite ดังสมการต่อไปนี้

สมการของ  $C_4AF$



เวลาที่ใช้เพื่อให้บรรลุ 80% ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักทั้ง 4 แสดงใน **ตารางที่ 3-6**

สารประกอบ	เวลา (วัน)
$C_3S$	10
$C_2S$	100
$C_3A$	6
$C_4AF$	50

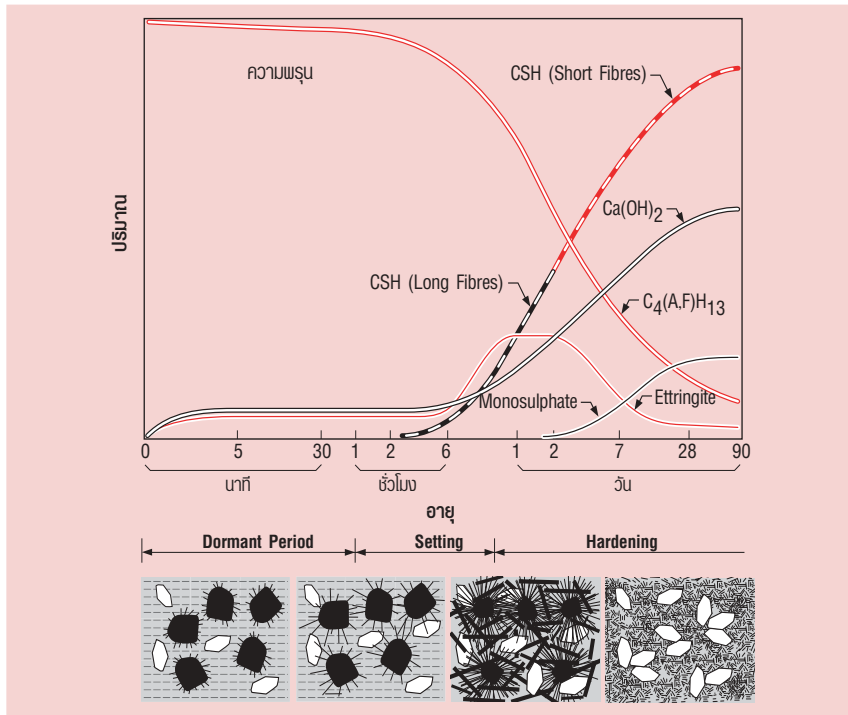
ตารางที่ 3-6 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก สำเร็จ 80%

### 3.7 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยรวมของสารประกอบทั้ง 4 นั้น จะเกิด CSH Gel และ Ettringite เคลือบอยู่บนอนุภาคปูนซีเมนต์ และเป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งอธิบายการเกิด "Dormant Period" อันเป็นช่วงเวลาที่ซีเมนต์เพสต์ไม่ค่อยเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยที่ยังคงสภาพเหลวและสามารถไหลได้ในช่วง 1 - 2 ชั่วโมง

เมื่อสิ้นสุดช่วง Dormant Period จะเข้าสู่จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Set) โดย CSH ที่เคลือบอยู่บนอนุภาคปูนซีเมนต์จะเกิดการแตกออกด้วยแรงดัน Osmotic ซึ่งแรงดันนี้เกิดจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของอออนโนสารละลายที่อยู่ระหว่าง Gel กับอนุภาคปูนซีเมนต์ และอออนโนสารละลายที่อยู่รอบ ๆ CSH ทำให้เกิดการทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป

ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีขนาดใหญ่กว่า 2 เท่าของปูนซีเมนต์ก่อนทำปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ที่ละเอียด จนเกิดผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากขึ้น ทำให้เกิดจุดเชื่อมต่อนี้มากขึ้น จนอนุภาคปูนซีเมนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ และกลายเป็นของแข็งในที่สุด ซึ่งถือว่าเข้าสู่จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Set)



รูปที่ 3-10 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

จากแผนภาพใน รูปที่ 3-10 แสดงกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ โดยอนุภาคปูนซีเมนต์จะแสดงด้วยเม็ดสีดำ ในขณะที่  $\text{Ca(OH)}_2$  จะแสดงด้วยรูปหกเหลี่ยม ส่วน Ettringite และ CSH จะแสดงด้วยเส้นสั้นทึบ และเส้นสั้นบาง ตามลำดับ ซึ่งในช่วง Dormant Period อนุภาคปูนซีเมนต์จะอยู่แยกกัน และจะเกิด  $\text{Ca(OH)}_2$  กับ Ettringite เป็นส่วนใหญ่ หลังจาก 1 ชั่วโมง CSH Gel จะเริ่มเกิดขึ้นโดยมีรูปร่างเป็นเส้นใยยาว การเกิดและการขยายตัวของ CSH Gel นี้ก่อให้เกิดการก่อตัว ในขณะที่ของแข็งมีปริมาณเพิ่มขึ้น ความพรุนของซีเมนต์เพสต์จะลดลง และกำลังเริ่มพัฒนาขึ้น

หลังจาก 24 ชั่วโมงไปแล้ว Sulphate Ions ถูกใช้หมดไป ออกไซด์ของอลูมิเนียมและเหล็กเริ่มก่อตัว และ Ettringite ได้ถูกเปลี่ยนไปเป็น Monosulphate ส่วน  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่องได้ CSH ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยสั้น ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้งหมดนี้ จะไปอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ ทำให้ความพรุนของซีเมนต์เพสต์ลดลงในระยะยาว



### 3.8 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ก็จะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เฟสที่แข็งตัวแล้วด้วยเช่นกัน

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่

1. อายุของซีเมนต์เฟส ยกเว้นช่วง Dormant Period อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรก และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งปฏิกิริยาจะสิ้นสุดโดยสมบูรณ์

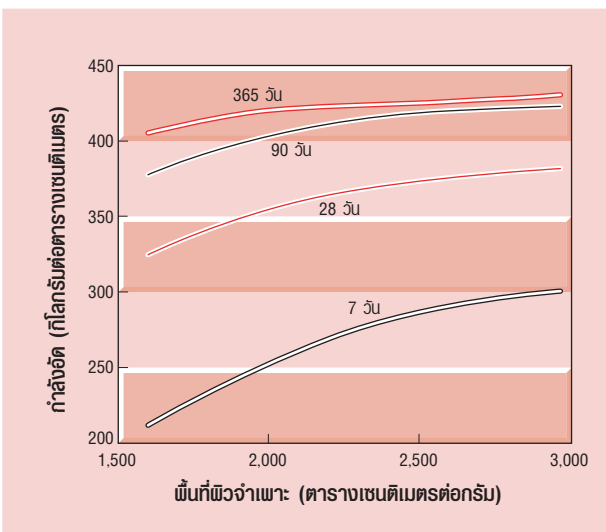
2. องค์ประกอบของซีเมนต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกเท่านั้นที่จะขึ้นอยู่กับสารประกอบหลักแต่ละสาร โดยปูนซีเมนต์ที่มี  $C_3S$  และ  $C_3A$  มากจะเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงปลายของแต่ละสารประกอบหลักจะไม่แตกต่างกันนัก

3. ความละเอียดของปูนซีเมนต์ เมื่อความละเอียดของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น จะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความละเอียดจะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงปลาย

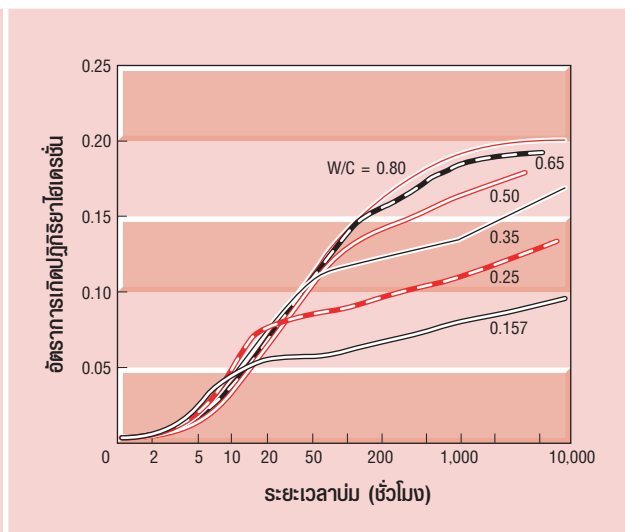
4. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ในช่วงต้น อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่ในช่วงหลัง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง ส่งผลให้ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยเฉลี่ยและอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงด้วย

5. อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของซีเมนต์เฟส

6. สารผสมเพิ่ม มีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทห่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น สารจำพวกน้ำตาล, กรดและเกลือของ Lignosulphonic และประเภทเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น  $CaCl_2$



รูปที่ 3-11 ผลของความละเอียดในรูปของค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีต่อการพัฒนา กำลังลัดของคอนกรีต 6



รูปที่ 3-12 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 6

คุณสมบัติของปูนซีเมนต์	ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)	กำลังระยะต้น (Early Strength)	กำลังระยะปลาย (Late Strength)	ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration)	ความอยู่ตัว (Soundness)	ความทนทาน (Durability)
สารประกอบในปูนเม็ด						
C <sub>3</sub> S	○	○	○	○		
C <sub>2</sub> S			○			
C <sub>3</sub> A	○	○	○	○		○
C <sub>4</sub> AF			○			
Free CaO					○	
MgO					○	
K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O	○	○	○			○
SO <sub>3</sub>	○	○	○			
ยิบซัม (SO <sub>3</sub> ในปูนซีเมนต์)	○	○	○		○	
ความละเอียด (Fineness)	○	○	○			

ตารางที่ 3-7 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์

## 3.9 คุณสมบัติทางเคมีอื่น ๆ

### 3.9.1 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition หรือ LOI)

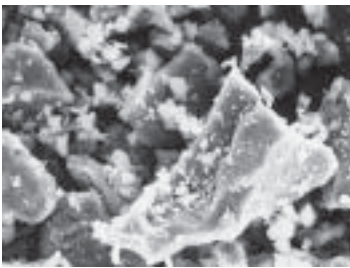
Loss on Ignition หรือ LOI เป็นการหาการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของปูนซีเมนต์ โดยการนำตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่รื้อน้ำหนักแน่นอนมาทำการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900 - 1000 °C จนกระทั่งน้ำหนักที่ได้คงที่ จากนั้นคำนวณน้ำหนักที่หายไปของตัวอย่าง ซึ่งค่า LOI จะมีค่าอยู่ในช่วง 0 - 3% โดยปกติแล้วค่า LOI จะบ่งบอกว่าปูนซีเมนต์ได้เกิด Prehydration ขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเก็บปูนซีเมนต์ที่ไม่เหมาะสมหรืออาจเก็บนานเกินไป สำหรับการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 18 หรือ ASTM C 114



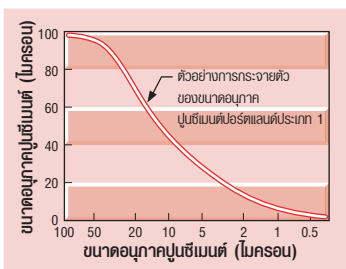
รูปที่ 3-13 เครื่องมือทดสอบหาการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาและกากที่ไม่ละลายในกรดและด่างของปูนซีเมนต์

### 3.9.2 กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue)

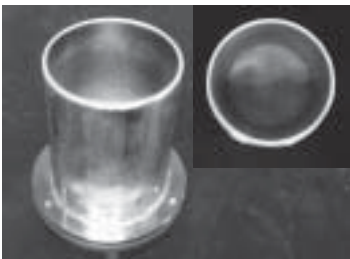
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง คือ กากในปูนซีเมนต์ที่ไม่ละลายทั้งในสารละลายกรดและสารละลายด่าง ทั้งนี้การทดสอบดังกล่าวเป็นการตรวจสอบว่าปูนซีเมนต์มีสิ่งปนเปื้อนที่ไม่ละลายในกรดต่างมากน้อยเพียงใด โดยกากดังกล่าวส่วนใหญ่แล้วจะเป็นพวกดินหรือทรายที่ปนเปื้อนในปูนซีเมนต์ สำหรับการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 18 หรือ ASTM C 114



รูปที่ 3-14 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาคปูนซีเมนต์



รูปที่ 3-15 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 8



รูปที่ 3-17 การทดสอบหาความละเอียดของปูนซีเมนต์โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 45 ไมครอน (No. 325)



รูปที่ 3-18 แสดงการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analyzer

### 3.10 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์

ข้อกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ นอกจากจะมีการกำหนดองค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition) แล้ว ยังมีการกำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties) ด้วย การทำความเข้าใจคุณสมบัติทางฟิสิกส์นี้ จะช่วยในการแปลความหมายผลการทดสอบปูนซีเมนต์ได้อย่างถูกต้อง โดยปูนซีเมนต์แต่ละประเภทจะมีข้อกำหนดคุณสมบัติแตกต่างกันไปตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 การทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์ เหมาะสำหรับการประเมินคุณสมบัติของปูนซีเมนต์มากกว่าคุณสมบัติของคอนกรีต ส่วนการชักตัวอย่างปูนซีเมนต์สำหรับการทดสอบ ให้ทำตามวิธีการทดสอบมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 16 หรือ ASTM C 183

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญของปูนซีเมนต์มีดังนี้

#### 3.10.1 ขนาดอนุภาคและความละเอียด (Particle Size and Fineness)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุม ดังแสดงใน รูปที่ 3-14 และมีขนาดต่าง ๆ กัน ซึ่งอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณ 95% จะมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 45 ไมครอน ดัง รูปที่ 3-15

ความละเอียดของปูนซีเมนต์จะมีผลต่อความร้อนและอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปูนซีเมนต์ที่ความละเอียดสูงกว่าหรือมีขนาดเล็กกว่า จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงกว่า และมีการพัฒนากำลังที่สูงกว่าอีกด้วย ซึ่งจะสังเกตได้ชัดเจนในช่วงอายุ 7 วันแรก

ปัจจุบันค่าความละเอียดจะวัดในหน่วยพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์โดยใช้เครื่องมือ Blaine Air Permeability ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 6 หรือ ASTM C 204 นอกจากนี้อาจใช้วิธีทดสอบ Wagner Turbidimeter Test ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 5 หรือ ASTM C 115 ดัง รูปที่ 3-16 หรืออาจใช้วิธีร่อนผ่านตะแกรงขนาด 45 ไมครอน (No. 325) ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 4 หรือ ASTM C 430 ดัง รูปที่ 3-17 และอาจใช้การทดสอบ Electronic (X-Ray or Laser) Particle Size Analyzer ดัง รูปที่ 3-18



รูปที่ 3-16 เครื่องมือทดสอบหาความละเอียดของปูนซีเมนต์

### 3.10.2 ความอยู่ตัว (Soundness)

ความอยู่ตัว หรือ Soundness คือ ความสามารถของปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วยังรักษาปริมาตรไว้ได้ ความไม่อยู่ตัวของปูนซีเมนต์หรือการขยายตัวเกิดจากมีแมกนีเซียมออกไซด์ในรูปผลึก Periclase หรือแมกนีเซียม และหรือ Free Lime มากเกินไป ทำให้เกิดการขยายตัวจนแตกร้าวได้

การวัดค่าความอยู่ตัว ทำได้โดยการทดสอบการขยายตัวโดยวิธีออโตคลอว์ (Autoclave) ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 11 หรือ ASTM C 151 ดัง รูปที่ 3-19

### 3.10.3 ความข้นเหลว (Consistency)

ความข้นเหลว แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่หรือการไหลของซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จใหม่ ๆ โดยปกติแล้วถ้าซีเมนต์เพสต์ที่ทำการผสมมีความข้นเหลวปกติจะมีระยะจมของเครื่อง Vicat Plunger เท่ากับ  $10 \pm 1$  มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 8 หรือ ASTM C 187 ตัวอย่างของการทดสอบความข้นเหลวแสดงดัง รูปที่ 3-20 สำหรับการผสมมอร์ตาร์ สามารถทำการกำหนดค่าอัตราส่วน W/C หรือ Flow อย่างใดอย่างหนึ่งให้คงที่ ซึ่งการวัด Flow ของมอร์ตาร์ จะใช้ Flow Table ตามมาตรฐาน ASTM C 230 และ ASTM C 1437 ดัง รูปที่ 3-21



รูปที่ 3-19 การทดสอบความอยู่ตัว (Soundness) โดยใช้เครื่อง Autoclave ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง



รูปที่ 3-20 การทดสอบความข้นเหลว โดยใช้ Vicat Plunger



รูปที่ 3-21 การทดสอบค่าความข้นเหลวของมอร์ตาร์โดยใช้ Flow Table

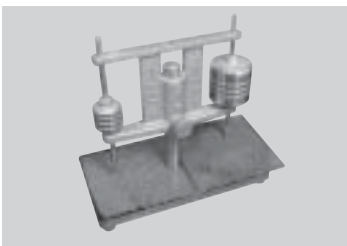
### 3.10.4 ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)

จุดประสงค์ของการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว คือ

1. เพื่อหาระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนกระทั่งซีเมนต์เพสต์ไม่มีคุณสมบัติสีนไหลเข้าแบบหรือมีคุณสมบัติ Plasticity ได้อีกต่อไป หรือที่เรียกว่า ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น ณ จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Set)



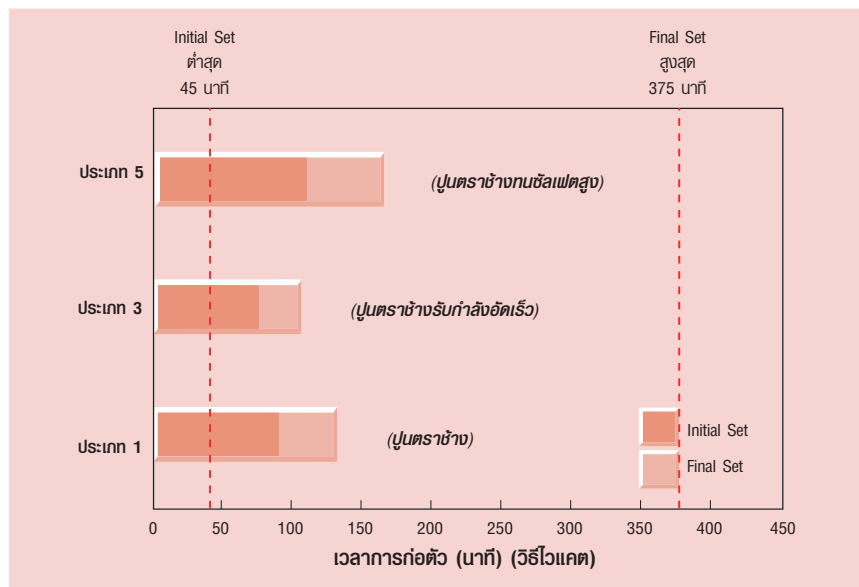
รูปที่ 3-22 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์โดยใช้ Vicat Needle



รูปที่ 3-23 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์โดยใช้ Gillmore Needle

2. เพื่อหาระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนกระทั่งซีเมนต์เพสต์เปลี่ยนสภาพเป็นของแข็ง หรือที่เรียกว่า เวลาการก่อตัวสุดท้าย ณ จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Set)

การหาระยะเวลาการก่อตัวจะใช้เครื่องมือ Vicat Needle ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 9 หรือ ASTM C 191 หรือเครื่องมือ Gillmore Needle ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 10 หรือ ASTM C 266 อย่างใดอย่างหนึ่ง ดัง รูปที่ 3-22 และ รูปที่ 3-23 ตามลำดับ โดยค่าเฉลี่ยของระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ ในประเทศไทย แสดงดัง รูปที่ 3-24



รูปที่ 3-24 ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ ในประเทศไทย

### 3.10.5 การก่อตัวผิดปกติ

#### (Early Stiffening หรือ False Set and Flash Set)

การเกิดการก่อตัวผิดปกติ มีสาเหตุมาจากความไม่สมดุลระหว่างสารประกอบซัลเฟตและอลูมิเนียม, อุณหภูมิ, และความละเอียดของปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

False Set คือ ลักษณะที่เกิดการสูญเสียความชื้นไหลหรือ Plasticity หลังจากทำการผสมในระยะเวลาอันสั้น การเกิด False Set ของปูนซีเมนต์จะไม่มีผลกระทบต่อคอนกรีต ถ้าหากว่ามีการผสมเป็นเวลานานกว่าปกติ หรือมีการผสมซ้ำ (Remixed) โดยปราศจากการเติมน้ำก่อนที่จะทำการเทลงในแบบ False Set เกิดขึ้นเมื่อยิบซั่มที่ใส่ในระหว่างการบดปูนซีเมนต์สูญเสียน้ำ (Dehydrate) ทำให้อยู่ในรูป Plaster (Calcium Sulphate Hemihydrate) ในปริมาณที่มากเกินไป

ปริมาณของซัลเฟตในรูป Plaster มีผลอย่างมากต่อการเกิดการก่อตัวผิดปกติ กล่าวคือ ถ้ามี Plaster มากเกินไป จะทำให้เกิด False Set แต่หากมี Plaster น้อยเกินไป ก็จะทำให้เกิด Flash Set ได้



Flash Set หรือ Quick Set คือ การสูญเสียความสามารถเทได้ (Workability) อย่างทันทีทันใดของซีเมนต์เพสต์, มอร์ตาร์, หรือคอนกรีต ทำให้ไม่สามารถลื่นไหลเข้าแบบ หรือมีคุณสมบัติ Plasticity ได้อีก ถึงแม้จะทำการผสมให้นานขึ้นโดยปราศจากการเติมน้ำก็ตาม การเกิด Flash Set โดยปกติจะมีความร้อนเกิดขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในปูนซีเมนต์

การทดสอบ Early Stiffening ในกรณีที่เป็นซีเมนต์เพสต์ ทำตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 15 หรือ ASTM C 451 และในกรณีที่เป็นมอร์ตาร์ ทำตามมาตรฐาน ASTM C 359

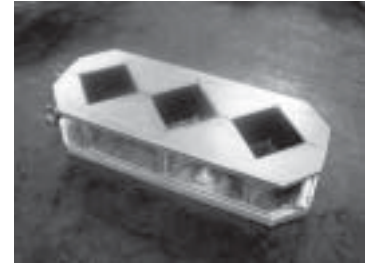
### 3.10.6 กำลังอัด (Compressive Strength)

การทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ ทำได้โดยการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5.0 เซนติเมตร โดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 12 หรือ ASTM C 109 ดัง รูปที่ 3-25

ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัดของปูนซีเมนต์ในรูปของมอร์ตาร์ที่สำคัญ ได้แก่ ประเภทของปูนซีเมนต์, องค์ประกอบทางเคมี, และความละเอียดของปูนซีเมนต์

โดยทั่วไป กำลังอัดของปูนซีเมนต์ในรูปมอร์ตาร์จากผลการทดสอบตามวิธีการมาตรฐานดังกล่าว ไม่สามารถนำไปใช้ทำนายกำลังอัดของคอนกรีตได้อย่างแม่นยำนัก ทั้งนี้ เพราะมีปัจจัยอื่น ๆ อีกมากมายที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ได้แก่ คุณสมบัติของมวลรวม, ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้, วิธีการก่อสร้าง, และสภาพแวดล้อมในสถานที่ก่อสร้างจริง

รูปที่ 3-26 และ รูปที่ 3-27 แสดงถึงการพัฒนากำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ



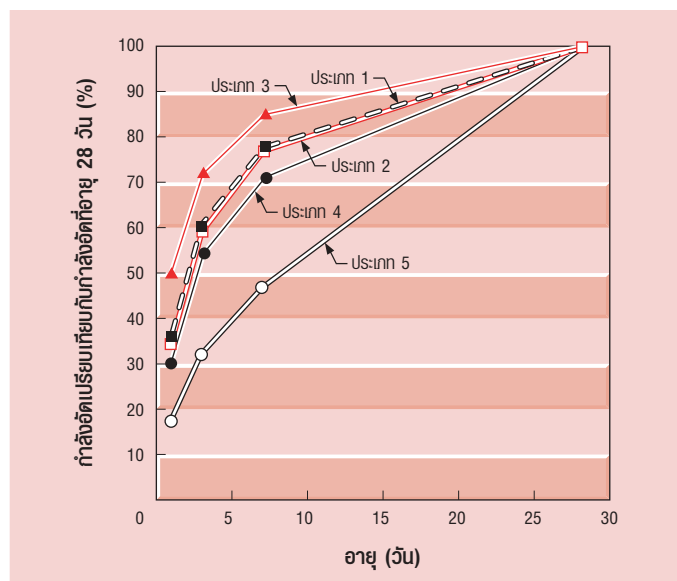
ก) แบบหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 5.0 เซนติเมตร



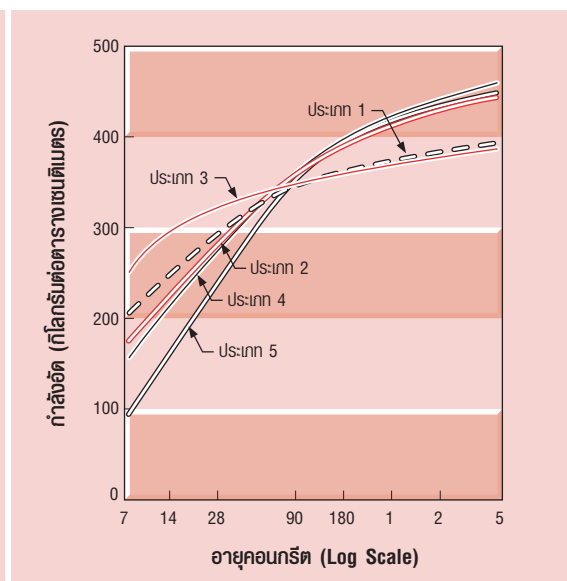
ข) การหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์



ค) การกดก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์



รูปที่ 3-26 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ



รูปที่ 3-27 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ



### 3.10.7 ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration)

ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดขึ้นต่อเมื่อปูนซีเมนต์และน้ำทำปฏิกิริยากัน ปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์เป็นหลัก นั่นคือ  $C_3A$  และ  $C_3S$  นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนซีเมนต์หรือค่า  $W/C$ , ค่าความละเอียด, และอุณหภูมิของการบ่ม เป็นต้น ซึ่งสามารถสรุปได้ดัง **รูปที่ 3-28**



**รูปที่ 3-28** แสดงปัจจัยที่มีผลต่อความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ถึงแม้ว่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะมีการพัฒนาเป็นเวลากว่าหลายปี แต่อัตราการเกิดความร้อนจะมีค่าสูงในช่วงแรกเท่านั้น กล่าวคือ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงใน 3 วันแรก

การทดสอบหาค่าความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 7 หรือ ASTM C 186 หรือทดสอบโดยใช้ Conduction Calorimetry

## มาตรฐานอ้างอิง

- มอก. 15 เล่ม 1-2547 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ
- มอก. 15 เล่ม 2-2521 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 2 การทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
- มอก. 15 เล่ม 3-2519 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 3 วิธีทดสอบความละเอียดของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยใช้แรงขนาด 150 และ 75 ไมโครเมตร
- มอก. 15 เล่ม 4-2519 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 4 วิธีทดสอบความละเอียดของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยใช้แรงขนาด 45 ไมโครเมตร
- มอก. 15 เล่ม 5-2519 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 5 วิธีทดสอบความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้เทอร์บิโดมิเตอร์
- มอก. 15 เล่ม 6-2521 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 6 วิธีทดสอบความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้เครื่องแอร์เพอร์มิอะบิลิตี
- มอก. 15 เล่ม 7-2521 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 7 การทดสอบความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกกับน้ำ
- มอก. 15 เล่ม 8-2514 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 8 ข้อกำหนดวิธีทดสอบจำนวนน้ำที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
- มอก. 15 เล่ม 9-2518 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 9 การหาระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยใช้เข็มแบบไวแคต
- มอก. 15 เล่ม 10-2518 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 10 การหาระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยใช้เข็มแบบกิลโมร์
- มอก. 15 เล่ม 11-2521 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 11 การทดสอบหาการขยายตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยวิธีออตโตเคลฟ
- มอก. 15 เล่ม 12-2532 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 12 วิธีทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
- มอก. 15 เล่ม 13-2521 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 13 วิธีทดสอบหาปริมาณอากาศในมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
- มอก. 15 เล่ม 14-2520 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 14 การทดสอบหาการขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เนื่องจากซัลเฟต
- มอก. 15 เล่ม 15-2519 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 15 วิธีทดสอบการก่อตัวผิวดกของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (โดยใช้วิธีเพสต์)
- มอก. 15 เล่ม 16-2535 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 16 การชักตัวอย่างและการยอมรับปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
- มอก. 15 เล่ม 17-2516 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 17 การผสมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกด้วยเครื่องผสม



- มอก. 15 เล่ม 18-2519 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 18 การวิเคราะห์ทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
- มอก. 15 เล่ม 20-2521 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 20 การใช้วัสดุผสมเพิ่มในการทำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
- มอก. 15 เล่ม 21-2533 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 21 วิธีหาปริมาณแคลเซียมซัลเฟตอิสระในไฮดรเตดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
- ASTM C 109-02 : Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)
- ASTM C 114-04 : Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement
- ASTM C 115-03 : Standard Test Methods for Fineness of Portland Cement by the Turbidimeter
- ASTM C 150-04 : Standard Specification for Portland Cement
- ASTM C 151-00 : Standard Test Method for Autoclave Expansion of Portland Cement
- ASTM C 183-02 : Standard Practice for Sampling and the Amount of Testing of Hydraulic Cement
- ASTM C 186-98 : Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement
- ASTM C 187-98 : Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement
- ASTM C 191-04 : Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle
- ASTM C 204-00 : Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus
- ASTM C 230-03 : Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement
- ASTM C 266-03 : Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles
- ASTM C 359-03 : Standard Test Method for Early Stiffening of Hydraulic Cement (Mortar Method)
- ASTM C 430-03 : Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- $\mu$ m (No. 325) Sieve
- ASTM C 451-04 : Standard Test Method for Early Stiffening of Hydraulic Cement (Paste Method)
- ASTM C 1365-98 : Standard Test Method for Determination of the Proportion of Phases in Portland Cement and Portland-Cement Clinker Using X-Ray Powder Diffraction Analysis
- ASTM C 1437-01 : Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar

## เอกสารอ้างอิง

- 1 ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร์, “คอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete Technology)”, คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค, บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด, 2537.
- 2 เอกสารวิชาการของ บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด, 2547.
- 3 เอกสารวิชาการของคอนกรีตผสมเสร็จซีแพค, บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด, 2545.
- 4 A. M. Neville, “Properties of Concrete”, Fourth Edition, 1999.
- 5 F.L.Smidth, “Quality of Cement”, 2000.
- 6 I. Soroka, “Portland Cement Paste and Concrete”, 1979.
- 7 Peter C. Hewlett, “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete”, Fourth Edition, 1998.
- 8 Portland Cement Association, “Design and Control of Concrete Mixtures : Portland, Blended, and Other Hydraulic Cements”, Concrete Information, 2002.