

## บทที่ 2

### ปูนซีเมนต์

#### 2.1 ประวัติ

จากหลักฐานยืนยันว่าปูนซีเมนต์ถูกนำมาใช้งานตั้งแต่สมัยอียิปต์, กรีกและโรมัน คำว่า ซีเมนต์ มาจากภาษาลาติน มีความหมายทั่ว ๆ ไปคือ วัตถุที่แข็งเมื่อผสมกับน้ำ ซีเมนต์ถูกใช้อย่างแพร่หลายในฐานะเป็นวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญคือ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดความสามารถเปลี่ยนแปลงทางเคมี ก่อให้เกิดความสามารถยึดส่วนต่าง ๆ หรืออนุภาคที่เป็นของแข็งให้รวมตัวกัน

เมื่ออาณาจักรโรมันเสื่อมลง การใช้ปูนซีเมนต์ก็ถึงที่สุดลงด้วย และความก้าวหน้าที่สำคัญเกิดขึ้นอีกครั้ง ในปี พ.ศ. 2367 โดย Josept Aspdin ชาวอังกฤษ ได้คิดค้นซีเมนต์ จนประสบความสำเร็จ โดยซีเมนต์นี้เมื่อแข็งตัวจะมีสีเหลืองปนเทา เหมือนกับหินที่ใช้ก่อสร้าง บริเวณเมืองพอร์ตแลนด์ ในประเทศอังกฤษ จึงเรียกวัดนี้ว่า ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ รวมทั้งได้จดลิขสิทธิ์เป็นครั้งแรก

ปลายศตวรรษที่ 19 ปริมาณปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ผลิตได้อย่างมากในประเทศอังกฤษ ได้ถูกส่งออกไปจำหน่ายยังประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก รวมทั้งได้มีการเปิดโรงงานผลิต ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์นอกประเทศอังกฤษขึ้น เช่น ประเทศฝรั่งเศส ในปี พ.ศ. 2383 ประเทศเยอรมัน ในปี พ.ศ. 2398 ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี พ.ศ. 2414 และประเทศออสเตรเลีย ในปี พ.ศ. 2425 ส่วนในประเทศไทยได้มีการเริ่มผลิต ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2456

#### 2.2 กรรมวิธีการผลิต

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประกอบด้วยส่วนผสมที่สำคัญดังนี้

- 1) Calcareous Material ได้แก่ หินปูน (Limestone) และดินสอพอง (Chalk)
- 2) Argillaceous Materials ได้แก่ ชิลิก้า อลูมิน่า

ซึ่งอยู่ในรูปของดินดำหรือดินเหนียว (Clay) และดินดาน (Shale)

- 3) Iron Oxide Materials ได้แก่ แร่เหล็ก (Iron Ore) หรือศิลาแลง (Laterite)

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ จำแนกออกตามลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาใช้ได้เป็น 2 วิธีด้วยกัน คือ

1. กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก (Wet Process)
2. กรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง (Dry Process)

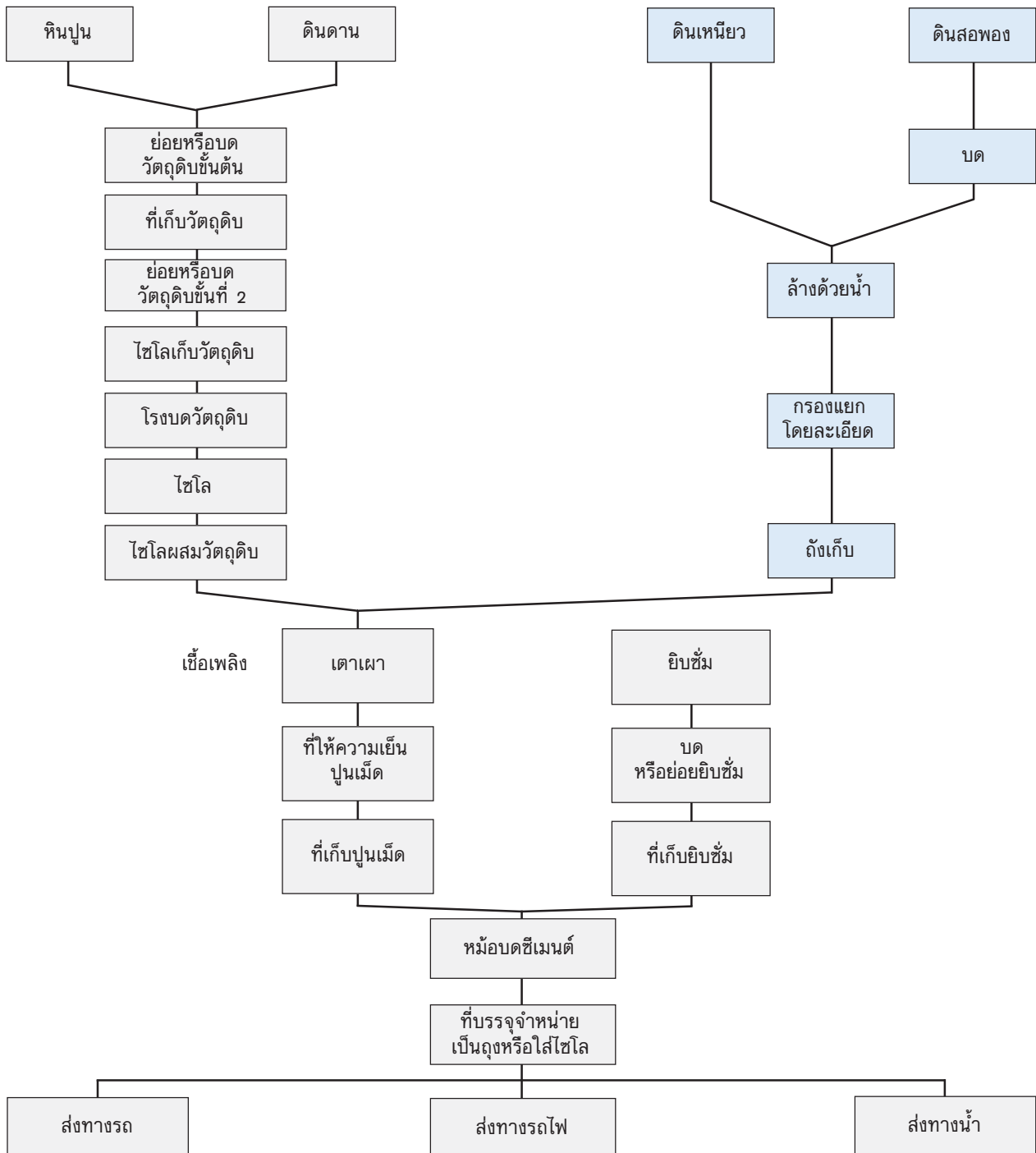
กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก วัตถุดิบที่ใช้ได้แก่ ดินสอพองและดินเหนียว ถูกนำมาผสมกันให้ได้สัดส่วนที่พอเหมาะตามต้องการ โดยเติมน้ำลงไปช่วยผสมแล้วนำไปบดให้ละเอียดก่อนที่จะป้อนเข้าไปในหม้อเผา (Kiln) กรรมวิธีการผลิตแบบแห้งนั้น วัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่ได้แก่ หินปูนและดินดาน จะถูกนำมาผสมกันในสภาพแห้ง ๆ ให้ได้สัดส่วนที่ต้องการ แล้วบดให้ละเอียดก่อนที่จะป้อนเข้าไปในหม้อเผา กรรมวิธีการผลิตแบบเปียกและแบบแห้ง ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.1

เมื่อส่วนผสมของวัตถุดิบบดได้แล้วก็จะถูกป้อนเข้าสู่หม้อเผา ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นหม้อเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประมาณ 1,400-1,500 องศาเซลเซียส อุณหภูมินี้ วัตถุดิบต่างๆ จะถูกหลอมรวมกันเป็น Clinker ทั้งไว้ให้เย็นตัวลง จากนั้นนำปูนเม็ดที่เย็นตัวลงนี้ มาบดให้ละเอียดอีกครั้งหนึ่ง ในขณะที่ทำการบดจะมีการเติมขี้ผึ้งลงไปเล็กน้อย ประมาณ 3 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ เพื่อหน่วงเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ อันจะเป็นผลทำให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานต่อไป

สำหรับกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทยปัจจุบัน นิยมผลิตแบบแห้งซึ่งจัดเป็นกรรมวิธีที่ทันสมัยที่สุด เนื่องจากกรรมวิธีการผลิตไม่ยุ่งยาก และสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อย หม้อเผาปูนซีเมนต์ที่ทันสมัยที่สุดในปัจจุบัน สามารถผลิตปูนซีเมนต์ได้ถึง 10,000 ตันต่อวัน สำหรับข้อมูลปริมาณความต้องการและการบริโภคปูนซีเมนต์ในประเทศต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

กรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง

กรรมวิธีผลิตแบบเปียก



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์

ประเทศ	ปริมาณความต้องการปูนซีเมนต์ (ล้านตัน)	การบริโภค (กก./ประชาชน 1 คน)
สิงคโปร์	2.15	800
ญี่ปุ่น	82.00	665
เยอรมัน	40.00	645
ไทย	18.70	335
มาเลเซีย	5.60	320
อเมริกา	71.30	285
อังกฤษ	16.00	280
ฟิลิปปินส์	7.35	115
อินโดนีเซีย	14.05	75

**ตารางที่ 2.1** ปริมาณความต้องการ และการบริโภคปูนซีเมนต์ (ข้อมูลปี 2533)

## 2.3 องค์ประกอบทางเคมี

เมื่อวัตถุดิบต่าง ๆ ถูกเผาในหม้อเผา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1) น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพอง เหลือไว้เพียง CaO

ขั้นตอนที่ 3) เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ ระหว่าง CaO จากหินปูนและดินสอพอง, ซิลิกา, อลูมินา และเหล็กออกไซด์ จากดินดำหรือดินเหนียว และดินดาน

ขั้นตอนที่ 4) เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่าง ๆ และตามด้วยขบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัวลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ซึ่งรวมกันประมาณ 90% ของน้ำหนักซีเมนต์

- ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO, Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> และ ยิปซัม ปริมาณออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 2.2

ออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 - 67
SiO <sub>2</sub>	1 - 25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 - 8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5 - 6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1 - 5.5
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	0.5 - 0.3
TiO <sub>2</sub>	0.1 - 0.4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1 - 0.2
SO <sub>3</sub>	1 - 3

**ตารางที่ 2.2** ค่าออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ออกไซด์หลัก จะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	3 CaO · SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
ดิแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	2 CaO · SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
ไตรแคลเซียม อลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	3 CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	4 CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

**ตารางที่ 2.3** สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เราสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบหลักทั้ง 4 ในปูนซีเมนต์ได้โดยประมาณจากผลการวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ชนิดต่าง ๆ และอัตราส่วนการรวมตัวทางเคมีของสารประกอบนั้น ๆ โดยใช้สูตรการคำนวณของ Bogue ดังนี้ :

$$\text{ปริมาณ } C_3S = 4.07 (\text{CaO}) - 7.60 (\text{SiO}_2) - 6.72 (\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.43 (\text{Fe}_2\text{O}_3) - 2.85 (\text{SO}_3)$$

$$\text{ปริมาณ } C_2S = 2.87 (\text{SiO}_2) - 0.754 (C_3S)$$

$$\text{ปริมาณ } C_3A = 2.65 (\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.69 (\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\text{ปริมาณ } C_4AF = 3.04 (\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

ตัวเลขในวงเล็บคือ เปอร์เซ็นต์ของออกไซด์ในเนื้อของซีเมนต์ทั้งหมด และปริมาณ CaO ในสูตรที่ใช้คำนวณหาปริมาณต้องเป็น CaO ที่ทำปฏิกิริยาเท่านั้น ไม่รวม Free Lime ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลักตามสูตรของ Bogue อยู่ในตารางที่ 2.4

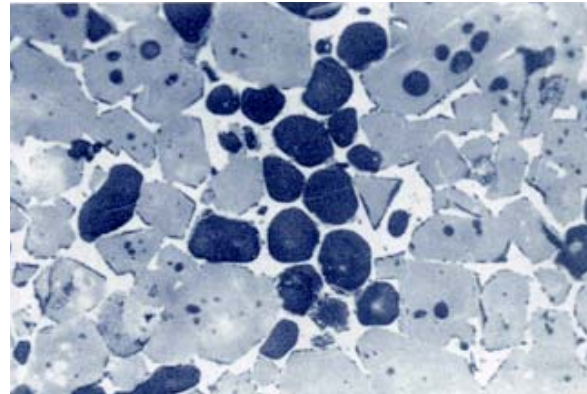
ออกไซด์ต่าง ๆ (%) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	สารประกอบหลักคำนวณจากสมการของ Bogue	
CaO	64.73	$C_3S = 4.07 \times (64.73 - 1.60) - 7.60 \times (21.20) - 6.72 \times (5.22) - 1.43 \times (3.08) - 2.85 \times (2.01) = 50.6\%$
SiO <sub>2</sub>	21.20	$C_2S = 2.87 \times (21.20) - 0.754 \times (50.6) = 22.7\%$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.22	$C_3A = 2.65 \times (5.22) - 1.69 \times (3.08) = 8.6\%$
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.08	$C_4AF = 3.04 \times (3.08) = 9.4\%$
MgO	1.04	
SO <sub>3</sub>	2.01	
Na <sub>2</sub> O	0.19	
K <sub>2</sub> O	0.42	
Loss of Ignition	1.45	
Insoluble Residue	0.66	
Free Lime	1.60	

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลัก

## 2.4 สารประกอบหลัก

### 1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S)

C<sub>3</sub>S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 คุณสมบัติของ C<sub>3</sub>S เหมือนกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C<sub>3</sub>S ถูกกระทบโดยปริมาณยิบซั่ม ปริมาณ C<sub>3</sub>S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 35-55%



รูปที่ 2.2 รูปร่างลักษณะของ C<sub>3</sub>S ซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยม และ C<sub>2</sub>S เป็นเม็ดกลมดำ

### 2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>2</sub>S)

C<sub>2</sub>S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C<sub>2</sub>S มีอยู่หลายรูปแบบ มีเพียง βC<sub>2</sub>S เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป βC<sub>2</sub>S มีคุณสมบัติยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้า ๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C<sub>3</sub>S ปริมาณ C<sub>2</sub>S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 15-35 %

### 3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C<sub>3</sub>A)

C<sub>3</sub>A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน C<sub>3</sub>A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิบซั่มลงระหว่างการบดซีเมนต์ กำลังอัดของ C<sub>3</sub>A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C<sub>3</sub>A อยู่ในปริมาณ 7-15%

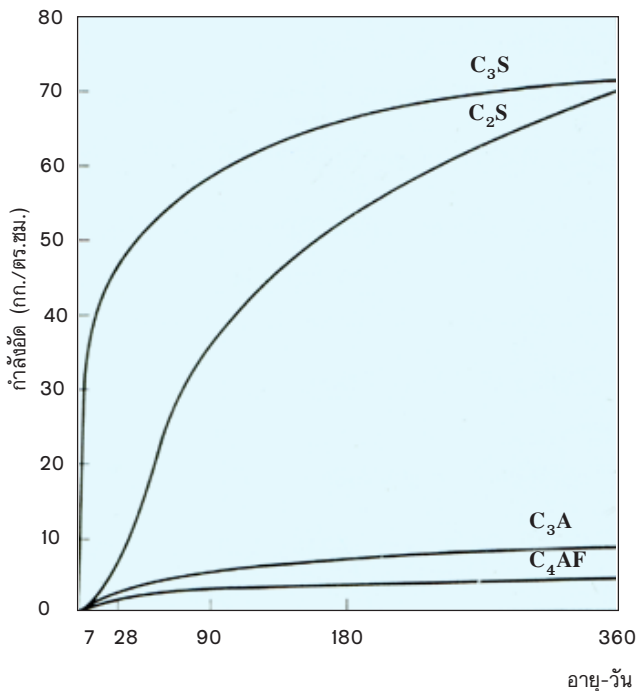
### 4. เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C<sub>4</sub>AF)

C<sub>4</sub>AF ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C<sub>4</sub>AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C<sub>4</sub>AF อยู่ในปริมาณ 5-10%

คุณสมบัติที่สำคัญของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ดังตารางที่ 2.5 และกราฟรูปที่ 2.3

คุณสมบัติ	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
1) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก(นาที)
2) การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (อาทิตย์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3) กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4) ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง (500 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)
5) คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

ตารางที่ 2.5 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 2.3 การพัฒนากำลังของสารประกอบหลัก

## 2.5 สารประกอบรอง

### 1. ยิบซั่ม (CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O)

ยิบซั่มถูกใส่เข้าไปในระหว่างบดปูนเม็ด เพื่อทำหน้าที่

ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิบซั่มที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เฟสเกิดกำลังอัดสูงสุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิบซั่มที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ

- 1) อัลคาไลต์ออกไซด์ อันได้แก่ Na<sub>2</sub>O และ K<sub>2</sub>O
- 2) ปริมาณ C<sub>3</sub>A
- 3) ความละเอียดของปูนซีเมนต์

### 2. Free Lime (CaO)

Free lime เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

- 1) เมื่อวัตถุดิบมี Lime มากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยา SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ได้หมด
- 2) ปริมาณ Lime มีไม่มาก แต่ทำปฏิกิริยากับ Oxide ต่าง ๆ ไม่สมบูรณ์

Free Lime นี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้า ๆ หลังจาก que ซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ซึ่งอาจก่อให้เกิดการแตกร้าวเสียหายได้ หรือที่เรียกว่า ซีเมนต์ไม่อยู่ตัวเนื่องจาก Lime

### 3. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่ จะมี MgCO<sub>3</sub> ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้ MgO และ CO<sub>2</sub> แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ด ที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเหมือนกับ CaO คือ ปริมาตรจะเพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดการไม่อยู่ตัว

การขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

- 1) ปริมาณของ MgO ในปูนซีเมนต์
- 2) ขนาดของ MgO ถ้าขนาดเล็กมาก ๆ จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็ว โดยจะไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์ที่แข็งตัว

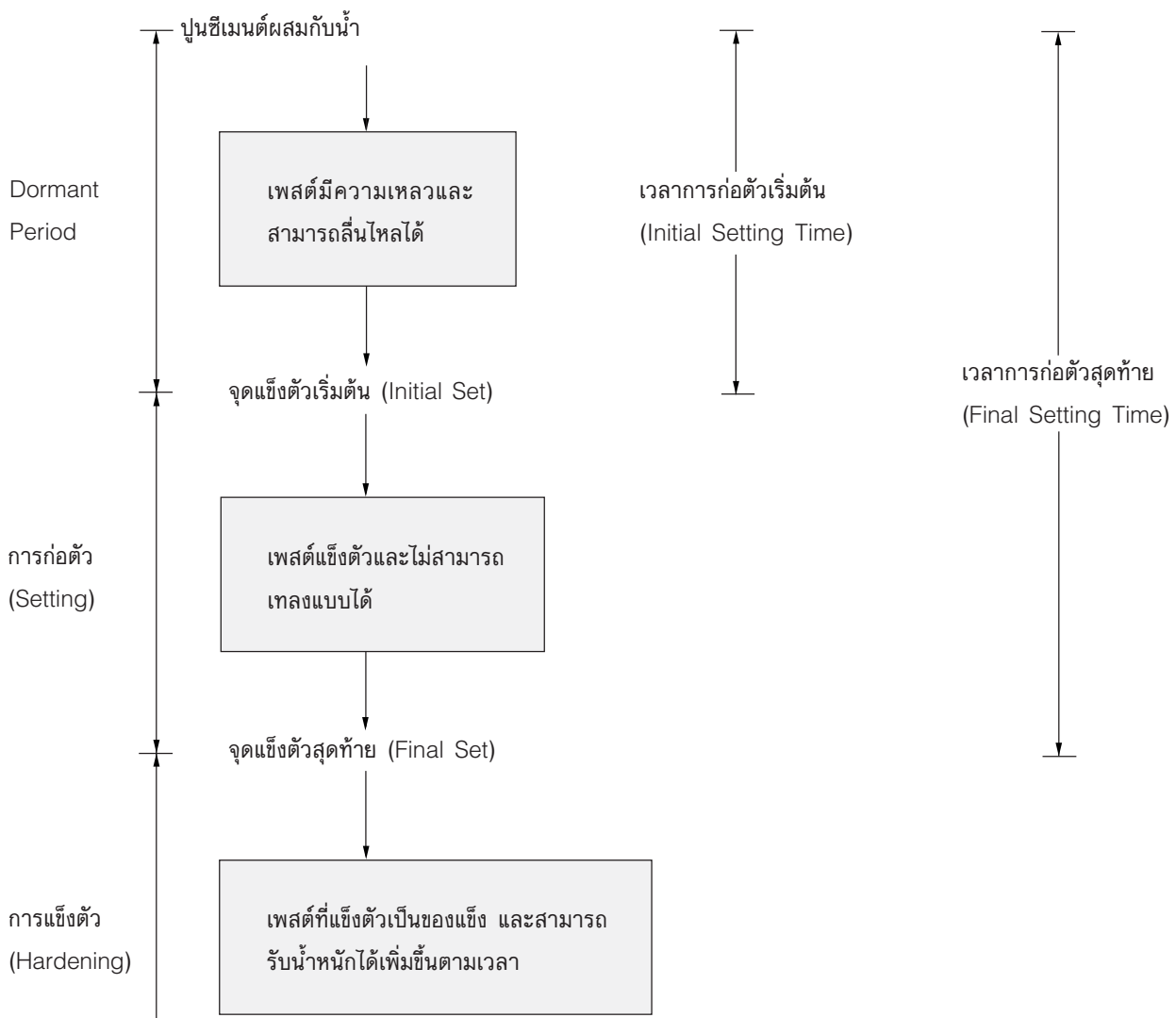
### 4. อัลคาไลต์ออกไซด์ (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O)

อัลคาไลต์ออกไซด์ ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลต์มาผสมเป็นคอนกรีต ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย หากต่อการแก้ไข ในกรณีนี้จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลต์ ควรจะเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลต์ต่ำ

## 2.6 การก่อตัวและการแข็งตัว

ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ ก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวช่วงเวลาหนึ่ง โดยคุณสมบัติของเพสต์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง เราเรียกช่วงนี้ว่า “Dormant Period” หลังจากนั้น เพสต์จะเริ่มแข็งตัวถึงแม้ว่ามันจะยังมีอยู่ แต่ไม่สามารถลื่นไหลเข้าแบบได้แล้ว จุดนี้เราเรียกว่า “จุดแข็งตัวเริ่มต้น” (Initial Set) เวลาตั้งแต่ซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดแข็งตัวเริ่มต้น เรียกว่า “เวลาการ

ก่อตัวเริ่มต้น” (Initial Setting Time) การก่อตัวของเพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปจนถึงสภาพที่เป็นของแข็ง หรือ “จุดแข็งตัวสุดท้าย” (Final Set) และเวลาที่ทำให้เพสต์ถึงช่วงนี้เรียกว่า “เวลาการก่อตัวสุดท้าย” (Final Setting Time) เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไป และสามารถรับน้ำหนักได้ ขบวนการทั้งหมดนี้เราเรียกว่า “การแข็งตัว” (Hardening) ขั้นตอนต่างๆ ของการก่อตัวและการแข็งตัวของคอนกรีต แสดงไว้ในรูปที่ 2.4



**รูปที่ 2.4** ขั้นตอนการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต



## 2.7 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ

1) **อาศัยสารละลาย** ซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด Ions ในสารละลายและ Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

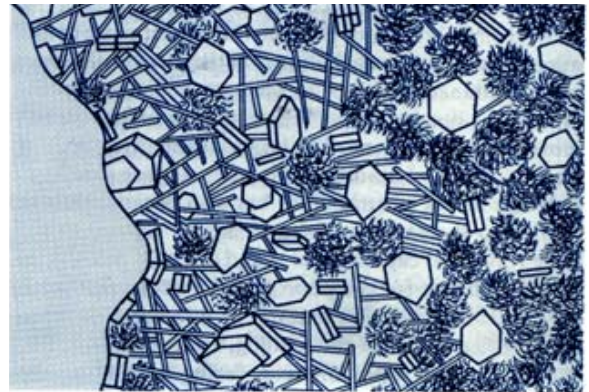
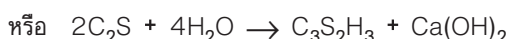
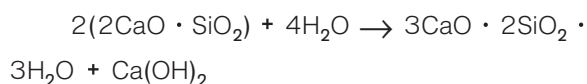
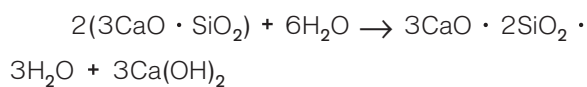
2) **การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง** ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “Solid State Reaction”

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท

### • ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคล์เซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S)

คล์เซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด Ca(OH)<sub>2</sub> และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และสมการการเกิดปฏิกิริยาดังนี้



CSH



Ca(OH)<sub>2</sub>



Ettringite

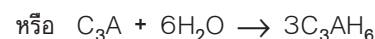
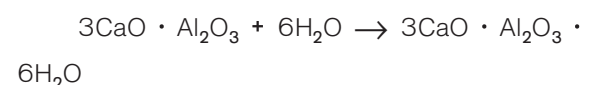
**รูปที่ 2.5** แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของคล์เซียมซิลิเกต

จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะเกิด Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในที่นี้จะใช้ตัวย่อ CSH แทน Calcium Silicate Hydrate ที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะมีองค์ประกอบและโครงสร้างเป็นอย่างไร

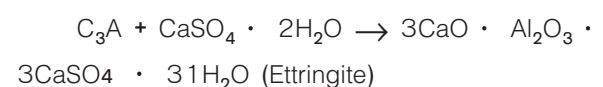
Ca(OH)<sub>2</sub> ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือมี P.H. ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

### • ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรคล์เซียมอลูมิเนต (C<sub>3</sub>A)

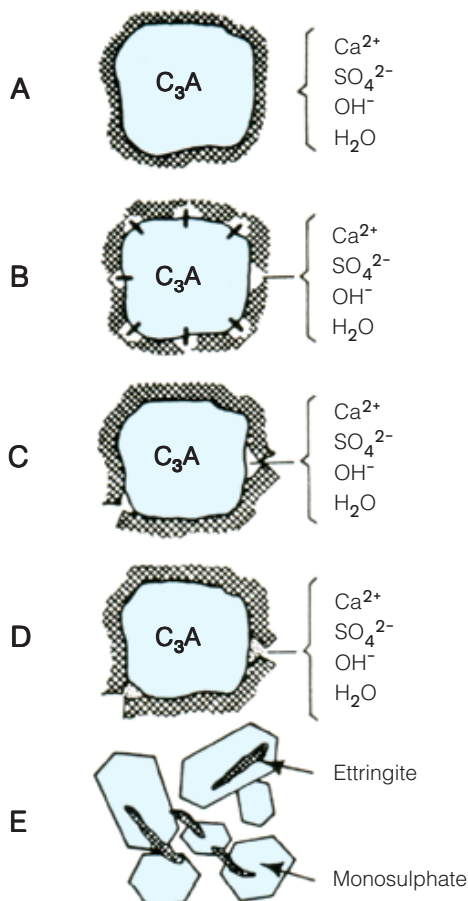
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C<sub>3</sub>A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ



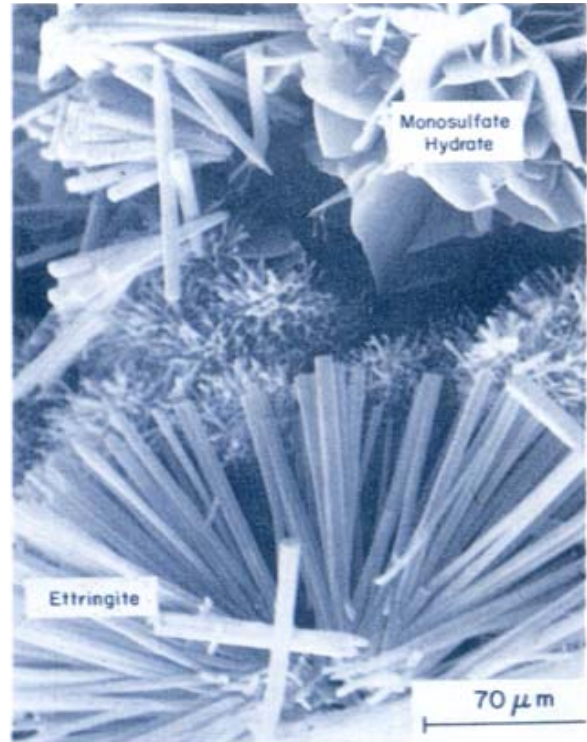
เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิบซั่ม (CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิบซั่มจะทำปฏิกิริยากับ C<sub>3</sub>A ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C<sub>3</sub>A ดังสมการ



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ  $C_3A$  และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจาก การเพิ่มปริมาณของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7



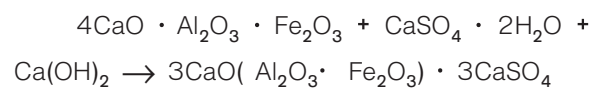
รูปที่ 2.6 ขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$



รูปที่ 2.7 ภาพขยาย Monosulfate และ Ettringite

• ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราคัลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ ( $C_4AF$ )

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_4AF$  นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย  $C_4AF$  จะทำปฏิกิริยากับยิบซัม และ  $Ca(OH)_2$  ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการ



เวลาที่ใช้เพื่อให้บรรลุ 80% ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักทั้ง 4 แสดงในตารางที่ 2.6

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

ตารางที่ 2.6 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก สำเร็จ 80%



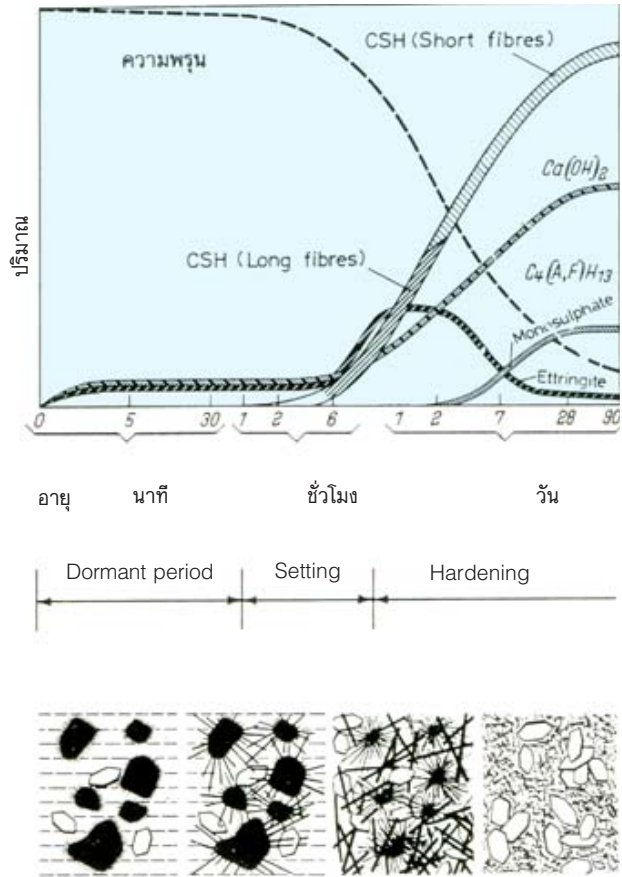
## 2.8 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เฟส

ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยรวมของสารประกอบหลักทั้ง 4 นั้น จะเกิด CSH gel และ Ettringite เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์ จะเป็นการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งอธิบายการเกิด “Dormant Period” อันเป็นช่วงเวลาที่ค่อนข้างจะไม่มีอะไรเกิดขึ้นเป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง ในขณะที่ซีเมนต์เฟสยังคงเหลวและมีความสามารถเทได้

เมื่อสิ้นสุดช่วง “Dormant Period” ก็จะเข้าสู่จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Set) ซึ่งเป็นช่วงที่ CSH ที่เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์แตกตัวออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีขนาดใหญ่กว่า 2 เท่าของซีเมนต์ก่อนปฏิกิริยา ผลก็คือผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเข้าอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ และเกิดผิวสัมผัสก่อให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เฟส ระยะเวลาผ่านไป ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมาก ก่อให้เกิดความเข้มข้นของจุดสัมผัส จำกัดการเคลื่อนที่ของเม็ดซีเมนต์ ส่งผลให้ซีเมนต์เฟสกลายเป็นของแข็ง นั่นคือ การเข้าสู่จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Set) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

แผนภาพแสดงขบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และโครงสร้างของเฟส แสดงในรูปที่ 2.8 โดยซีเมนต์จะแสดงด้วยเม็ดสีดำ ในขณะที่  $\text{Ca(OH)}_2$  จะแสดงด้วยรูปเหลี่ยม ผลึกของ Ettringite แสดงโดยเส้นบาง ๆ สั้น ๆ และ CSH เส้นเข็มมีความยาวพอสมควร จากรูปที่ 2.8 จะพบว่าระหว่าง Dormant Period เม็ดซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ก่อให้เกิด  $\text{Ca(OH)}_2$  และ Ettringite เป็นส่วนใหญ่ หลังจาก 1 ชั่วโมง CSH gel เริ่มเกิดขึ้นโดยมีรูปร่างเป็นเส้นใยยาว การเกิดและการขยายตัวของ CSH gel นี้ก่อให้เกิดการก่อตัว ในขณะที่ปริมาณเพิ่มขึ้น ความพรุนของเฟสจะลดลง และกำลังเริ่มพัฒนาขึ้น

หลังจาก 24 ชั่วโมงไปแล้ว Sulphate ions ถูกใช้หมดไป อลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์ เริ่มก่อตัวและ Ettringite ถูกเปลี่ยนไปเป็น Monosulphate ส่วน  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป ได้ CSH ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยนั้น ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้งหมดนี้ จะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ ทำให้ความพรุนของเฟสลดลงในระยะยาว



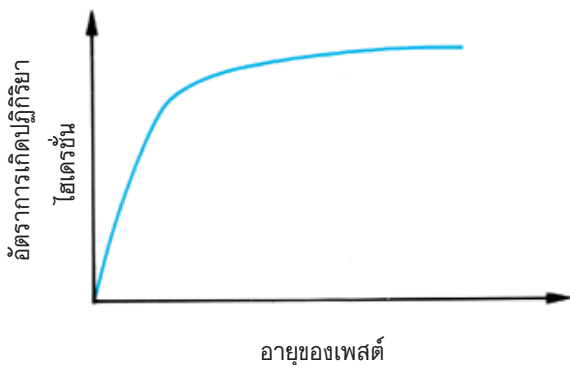
รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เฟส

## 2.9 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และคุณสมบัติของซีเมนต์เฟสที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เฟสที่แข็งตัวแล้ว

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่

1) **อายุของเพสต์** ยกเว้นช่วง Dormant Period อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรก และอัตราการลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9



**รูปที่ 2.9** อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2) **องค์ประกอบของซีเมนต์** จากตารางที่ 2.6 พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละตัวในซีเมนต์จะแตกต่างกัน

3) **ความละเอียดของซีเมนต์** ซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูง จะมีพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับน้ำได้มาก ผลก็คือปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดในอัตราที่เร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของปฏิกิริยา

4) **อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์** ในช่วงต้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในช่วงหลังอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ลดลง ผลก็คือ ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเฉลี่ยและอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง

5) **อุณหภูมิ** อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโดยมีขีดแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของเพสต์

6) **น้ำยาผสมคอนกรีต** น้ำยาหน่วงหรือน้ำยาเร่งการก่อตัวจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยจะลดและเพิ่มอัตราตามลำดับ

## 2.10 ประเภทของปูนซีเมนต์

### • ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตามมาตราฐานทั่วไป ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

**ประเภทที่ 1** ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีผลผลิตใช้มากที่สุด เหมาะสำหรับการผลิตคอนกรีตทั่วไป ที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา ได้แก่ ปูนปอร์ตแลนด์ ทรายข้าง ทรายเพชร ทรายพญานาคเขียว เป็นต้น

**ประเภทที่ 2** ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับใช้ในงานคอนกรีตที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง ซึ่งในปัจจุบันไม่มีการผลิตใช้ในประเทศไทย

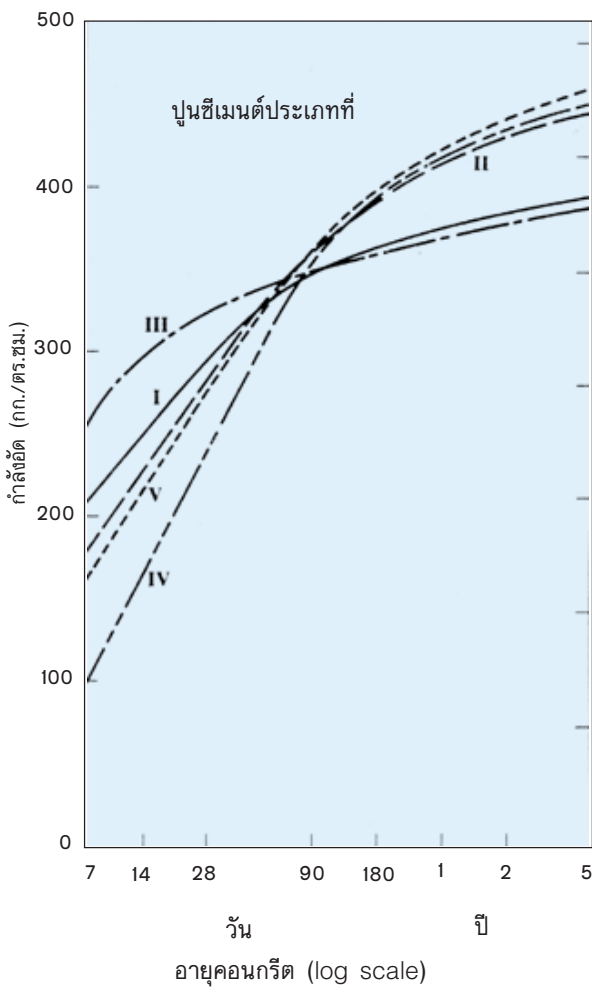
**ประเภทที่ 3** ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดสูงในระยะแรก เพราะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็วหรือถอดไม้แบบในเวลาอันสั้น ได้แก่ ปูนปอร์ตแลนด์ ทรายเอราวัณ ทรายสามเพชร ทรายพญานาคสีแดง ข้อควรระวังคือ ไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่เพราะความร้อนจาก ปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเกิดสูงมากในช่วงต้นอันอาจก่อให้เกิดโครงสร้างนั้นแตกร้าวได้

**ประเภทที่ 4** ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ได้ถูกพัฒนาขึ้นใช้ครั้งแรกในประเทศอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ เหมาะสำหรับงานคอนกรีตหยาบ (Mass Concrete) เช่น การสร้างเขื่อน เนื่องจากทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นซึ่งเป็นการลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking) ในประเทศไทยไม่มีการผลิตปูนประเภทนี้ ปัจจุบันประเภทนี้ถูกทดแทนโดยการใช้ปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับ Pulverized Fuel Ash (PFA) และ Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS) ซึ่งจะอธิบายละเอียดในเรื่องวัสดุใหม่ในงานก่อสร้าง

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มี  $C_3A$  ต่ำ เพื่อจะป้องกันไม่ให้ซัลเฟตจากภายนอก

มาทำลายเนื้อคอนกรีต เหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีการกระทำของซัลเฟต ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังอัดเข้าและให้ความร้อนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดที่หนึ่ง ได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทรายขี้เถ้าและทรายปลาดิบ

เกณฑ์กำหนด คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ แสดงไว้ในตารางที่ 2.7 และ 2.8 และรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การพัฒนากําลังของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ

	ประเภท หนึ่ง	ประเภท สอง	ประเภท สาม	ประเภท สี่	ประเภท ห้า
1. ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )	ต่ำสุดร้อยละ	21.0			
2. อลูมินัมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	สูงสุดร้อยละ	6.0			
3. เพอร์ริกออกไซด์ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	สูงสุดร้อยละ	6.0		6.5	
4. แมกเนเซียมออกไซด์ (MgO)	สูงสุดร้อยละ	5.0	5.0	5.0	5.0
5. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> )	สูงสุดร้อยละ				
5.1 เมื่อมี 3 CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ร้อยละ 8 หรือน้อยกว่า	3.0	3.0	3.5	2.3
5.2 เมื่อมี 3 CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	มากกว่าร้อยละ 8	3.5		4.5	
6. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss of Ignition)	สูงสุดร้อยละ	3.0	3.0	3.0	2.5
7. กากที่ไม่ละลายในกรดต่าง (Insoluble Residue)	สูงสุดร้อยละ	0.75	0.75	0.75	0.75
8. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (3 CaO · SiO <sub>2</sub> )	สูงสุดร้อยละ				35.0
9. ไดแคลเซียมซิลิเกต (2 CaO · SiO <sub>2</sub> )	ต่ำสุดร้อยละ				40.0
10. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (3 CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	สูงสุดร้อยละ		8.0	15.0	7.0
11. ผลบวกของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไตรแคลเซียมอลูมิเนต			58.0		5.0
12. เทตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์บวกสองเท่า ไตรแคลเซียมอลูมิเนต [4 CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 2 (3 CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )] หรือสารละลายแข็ง [4 CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 2 CaO · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ] แล้วแต่กรณี	สูงสุดร้อยละ			20.0	

**ตารางที่ 2.7** เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางเคมี ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน มอก.15-2514 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2517)

	ประเภท หนึ่ง	ประเภท สอง	ประเภท สาม	ประเภท สี่	ประเภท ห้า
1. ความละเอียด (Fineness) พื้นผิวจำเพาะ (Specific Surface) ตารางเซนติเมตรต่อกรัม (ให้เลือกวิธีทดสอบได้)					
1.1 ทดสอบด้วยเทอร์บิดิเมเตอร์ (Turbidimeter Test Wagner) ค่าเฉลี่ยต่ำสุด ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	1,600	1,600		1,600	1,600
ค่าต่ำสุดสำหรับตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่ง ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	1,500	1,500		1,500	1,500
1.2 ทดสอบด้วยแอร์เพอมีอะบิลิตี (Air Permeability Test, Blaine) ค่าเฉลี่ยต่ำสุด ตารางเซนติเมตร ต่อกรัม	2,800	2,800		2,800	2,800
ค่าต่ำสุดสำหรับตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่งตาราง เซนติเมตรต่อกรัม	2,600	2,600		2,600	2,600
2. ความอยู่ตัว (Soundness) การขยายตัวโดยวิธีออโตคลอว์ (Autoclave Expansion) สูงสุดร้อยละ	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
3. ระยะเวลาการก่อตัว (Time of Setting) (ให้เลือก ทดสอบได้)					
3.1 ทดสอบแบบกิลโมร์ (Gillmore Test) ก่อตัวระยะต้น (Initial Set) ไม่น้อยกว่า - นาที	60	60	60	60	60
การก่อตัวระยะปลาย (Final Set) ไม่มากกว่า - ชั่วโมง	10	10	10	10	10
3.2 ทดสอบแบบไวแคท (Vicat Test) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ (เล่ม 9) การเริ่มก่อตัวไม่น้อยกว่า- นาที	45	45	45	45	45
4. ปริมาณอากาศในมอร์ต้า (Air Content of Mortar) เมื่อเตรียมและทดสอบตามวิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 13 โดย ปริมาณกว่า ร้อยละ	12	12	12	12	12



	ประเภท หนึ่ง	ประเภท สอง	ประเภท สาม	ประเภท สี่	ประเภท ห้า
<p>5. แรงอัด (Compressive Strength) แรงอัดของก้อนลูกบาศก์ มอร์ตาร์ (Mortar Cube) ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1 ส่วน และทรายมาตรฐานที่ร่อนได้ตามขนาด (Graded Standard Sand) 2.75 ส่วน โดยน้ำหนักเตรียมและทดสอบตามวิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 12 ต้องเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่กำหนดตามเกณฑ์อายุข้างล่างนี้</p> <p>1 วันในอากาศชื้น    กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร</p> <p>1 วันในอากาศชื้น    ]    กิโลกรัมแรงต่อตาราง</p> <p>6 วันในน้ำ                ]    เซนติเมตร</p> <p>1 วันในอากาศชื้น    ]    กิโลกรัมแรงต่อตาราง</p> <p>27 วันในน้ำ             ]    เซนติเมตร</p> <p>6. ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ (Heat of Hydration)</p> <p>7 วัน สูงสุด    แคลอรีต่อกรัม</p> <p>28 วัน สูงสุด    แคลอรีต่อกรัม</p> <p>7. การก่อตัวผิดปกติ (False Set)</p> <p>ระยะจมสุดท้าย (Final Penetration) ต่ำสุดร้อยละ</p> <p>8. การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต (Sulphate Expansion)</p> <p>14 วัน สูงสุด    ร้อยละ</p>			120		
	150	130		55	105
	245	245		140	210
	50	50	50	50	50
					0.045

**ตารางที่ 2.8** เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน มอก. 15-2514 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2517)

### • ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์พิเศษ

นอกจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทั้ง 5 ชนิดที่กล่าวมาแล้ว ยังมีปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์อีกบางประเภทที่นิยมใช้กันในประเทศไทย

#### ปูนซีเมนต์ขาว (White Portland Cement)

เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่มี  $C_4AF$  อยู่ต่ำมากจึงมีสีขาว โดยทั่วไปความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนประเภทนี้จะสูงกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากมี  $C_3A$  และ  $C_3S$  สูงกว่า เหมาะสำหรับงานตกแต่งต่าง ๆ เช่น งานหินขัด การปูกระเบื้องและงานสถาปัตยกรรมอื่น ๆ ปูนซีเมนต์ขาวที่มีขายในประเทศไทยได้แก่ ตราช้างเผือก ตราเสือเผือก ตรามังกร ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 3.05-3.10 ซึ่งต่ำกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทั่วไปที่มีค่า 3.15 เล็กน้อย

#### ปูนซีเมนต์สำหรับบ่อน้ำมัน (Oil Well Cement)

โดยทั่วไปจะใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง ผสมกับสารหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปูนประเภทนี้จะใช้สำหรับงานเจาะบ่อน้ำมัน โดยจะผสมปูนซีเมนต์ประเภทนี้แล้วบ่มลงไปใต้ดิน บางที่ต้องบ่มลงไปถึงความลึก 6,000 เมตร หรือมากกว่าและอุณหภูมิถึง 170 องศาเซลเซียส ซีเมนต์เพสต์นี้ยังต้องเหลวพอที่จะทำงานได้จนถึงประมาณ 3 ชั่วโมงหลังจากนั้นจะแข็งตัวโดยเร็ว

**ปูนซีเมนต์ซิลิกา หรือปูนซีเมนต์ผสม (Silica Cement)** ผลิตโดยการบดปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับทรายหรือหินปูน ประมาณ 25-30% คุณสมบัติทั่วไปของปูนประเภทนี้คือ จะแข็งตัวช้า ไม่ยัดหรือหดตัวมาก ช่วยลดการแตกร้าวที่ผิว เหมาะสำหรับผสมทำปูนก่อปูนฉาบ นอกจากนี้ปูนประเภทนี้จะให้กำลังอัดไม่สูงนัก ตัวอย่างปูนประเภทนี้ เช่น ปูนซีเมนต์ตราเสือ ตรางูเห่า และตรานกอินทรีฯ คุณลักษณะของปูนซีเมนต์ประเภทนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 2.9

### • ปูนซีเมนต์อื่น ๆ

**High Alumina Cement (HAC)** หรือ Calcium Aluminate Cement ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ได้ถูกพัฒนาขึ้นใช้ครั้งแรกในประเทศฝรั่งเศส เพื่อทนทานต่อซัลเฟต แต่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในงานที่ต้องการกำลังอัดอันรวดเร็ว HAC ได้จากการเผาผลาญของหินปูน และ Bauxite ซึ่งก็คือ อลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 1,600 องศา จากนั้นนำมาบด สารประกอบของ HAC นี้จะแตกต่างอย่างมากจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทั่วไป รวมทั้งสีของ HAC ก็เข้มกว่า เนื่องจากมีปริมาณสารประกอบของเหล็กอยู่ในจำนวนมาก HAC บางที่เรียกว่า “Ciment Fondu” ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ราคาแพงกว่าปูนซีเมนต์ทั่วไป ดังนั้นจึงควรเลือกใช้เฉพาะในกรณีที่จำเป็นเท่านั้น เช่น ในงานที่ต้องการใช้คอนกรีตทนซัลเฟตได้ดีมาก ๆ งานซ่อมคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดสูงในเวลาอันรวดเร็ว โดยจะได้กำลังอัดสูงถึง 240 กก./ตร.ซม. ในเวลาเพียง 6-8 ชั่วโมง รวมไปถึงการทำอิฐทนไฟ แต่อย่างไรก็ตาม HAC มีข้อเสียคือ ในบริเวณที่มีสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น หรือเมื่อใช้คอนกรีตนี้เป็นเวลานานจะเกิดการสลายตัว “Conversion” โดยความพรุนในเนื้อคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น และความสามารถในการผ่านได้ของน้ำ (Permeability) ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ผลที่ตามมาคือ กำลังอัดจะลดลงถึง 80% ในการใช้งานไม่ควรที่จะนำ HAC ผสมกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทั่วไป เพราะจะก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว (Flash Set)

**Magnesium Phosphate Cement** หรือชื่อที่รู้จักทางการค้า คือ Set 45 ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ถูกคิดค้นขึ้นในประเทศอเมริกา มีคุณสมบัติที่สำคัญคือ จะแข็งตัวและให้กำลังอัดสูงมากภายในเวลาเพียง 45 นาที เหมาะสำหรับใช้ในงานซ่อมต่าง ๆ โดยเฉพาะจะใช้ซ่อมแซมพื้นสนามบินในเวลาเกิดสงคราม

คุณสมบัติ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
1. ความละเอียด (Fineness) พื้นผิวจำเพาะ (Specific Surface) ทดสอบด้วยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีแบบของเบลน (Air Permeability Test, Blaine) ต่ำสุด ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	2,800	ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 6 ข้อกำหนดการหาความ ละเอียดโดยแอร์เพอร์มีอะบิลิตี (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 204)
2. ความอยู่ตัว (Soundness) การขยายตัวโดยวิธีออโตเคลฟว์ (Autoclave Expansion) สูงสุดร้อยละ	0.6	ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 11 ข้อกำหนดการหาความ ขยายตัวโดยวิธีออโตเคลฟว์ (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 151)
3. ระยะเวลาการก่อตัว (Time of Setting) ทดสอบแบบไวแคต (Vicat Test) ไม่น้อยกว่า-นาที	45 นาที	ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 9 ข้อกำหนดการก่อตัว โดยใช้เข็มแบบไวแคต (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 191)
4. ปริมาณอากาศในมอร์ต้า (Air Content of Mortar) โดยปริมาณสูงสุดร้อยละ	12	ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 13 ข้อกำหนดการหาปริมาณ อากาศในมอร์ต้า (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 185)
5. แรงอัด (Compressive Strength) แรงอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ต้า (Mortar Cube) ต้องเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่กำหนดตามเกณฑ์อายุ ข้างล่างนี้		ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 12 ข้อกำหนดการหาแรงอัด (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 109)
หนึ่งวันในอากาศชื้น	เมกะปาสกาล (ประมาณกิโลกรัม แรงต่อตาราง เซนติเมตร)	6.4
สองวันในน้ำ		(65)
หนึ่งวันในอากาศชื้น	เมกะปาสกาล (ประมาณกิโลกรัม แรงต่อตาราง เซนติเมตร)	11.3
หกวันในน้ำ		(115)
6. การก่อตัวผิดปกติ (False Set) ระยะจมสุดท้าย (Final Penetration) ต่ำสุด ร้อยละ	50	ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 15 ข้อกำหนดการก่อตัวผิดปกติ (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 451)

**ตารางที่ 2.9** คุณสมบัติที่ต้องการของปูนซีเมนต์ผสม