

### บทที่ 3

#### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ข้อมูลพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอซโซลาน ผงหินปูน คุณสมบัติทางกล ทางกายภาพ และด้านความทนทานของซีเมนต์มอร์ตาร์ และ ทฤษฎี และหลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องมือวิจัยทางวัสดุ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

#### 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

##### 3.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วย ออกไซด์หลัก (Major oxides) ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และมี ออกไซด์รอง (Minor oxides) ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) โซเดียมออกไซด์ (Na<sub>2</sub>O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K<sub>2</sub>O) ไททานเนียมออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) ฟอสฟอรัส ออกไซด์ (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) และยิปซัม

##### 3.1.2 สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์

การรวมตัวทางเคมีของออกไซด์หลักที่มีปริมาณมากถึงร้อยละ 90 ทำให้เกิด สารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิด คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) และ เตตระแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็น ผลึก 6 เหลี่ยมมีสี่เหลี่ยม ส่วนประกอบทางเคมีคือ 3CaO.SiO<sub>2</sub> และย่อว่า C<sub>3</sub>S เมื่อผสมกับน้ำจะ ก่อตัวและแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง สามารถพัฒนากำลังอัดได้เร็วในช่วงสัปดาห์แรก การ เกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม โดยทั่วไปแล้วกำลังอัดในช่วงแรกของ ปูนซีเมนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อร้อยละของ C<sub>3</sub>S เพิ่มขึ้น ปริมาณของ C<sub>3</sub>S ในปูนซีเมนต์มีประมาณ ร้อยละ 50-70

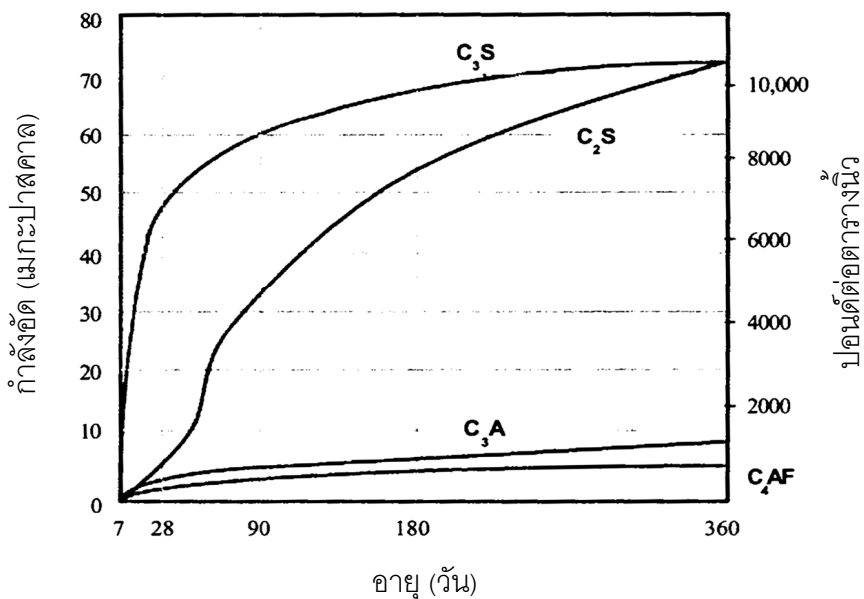
2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม ส่วนประกอบทางเคมีคือ 2CaO.SiO<sub>2</sub> และย่อว่า C<sub>2</sub>S เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดย

ปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวแล้วจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆในช่วงแรก และกำลังอัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอายุมากกว่า 7 วัน ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ  $C_3S$  ในปูนซีเมนต์มีไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) อยู่ประมาณร้อยละ 15-30

3. ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน ส่วนประกอบทางเคมีคือ  $3CaO \cdot Al_2O_3$  และย่อว่า  $C_3A$  จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีที่ก่อตัวและแข็งตัวเร็ว เกิดความร้อนสูงในช่วงแรกประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกันการก่อตัวและแข็งตัวเร็วทำได้โดยการเติมยิปซัมเข้าไปในขั้นตอนการบดเม็ดปูนซีเมนต์เพื่อทำหน้าที่หน่วงการก่อตัวเนื่องจากปฏิกิริยาของ  $C_3A$  ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีไตรแคลเซียมอะลูมิเนตอยู่ประมาณร้อยละ 5-10 นอกจากนี้ยังพบว่าปูนซีเมนต์ที่มี  $C_3A$  จะทนทานต่อซัลเฟตได้ดี

4. เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite) มีองค์ประกอบทางเคมีคือ  $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$  และย่อว่า  $C_4AF$  เป็นสารประกอบที่ได้จากการใช้วัตถุดิบที่มีสารประกอบแร่เหล็กและอะลูมิเนียม เพื่อลดอุณหภูมิของปูนเม็ดระหว่างกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ จะทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ไม่ค่อยมีส่วนในการพัฒนากำลังอัดทั้งในระยะแรกและระยะหลังความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม สารประกอบนี้ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีดำถึงเทา ในปูนซีเมนต์มี  $C_4AF$  อยู่ประมาณร้อยละ 5-15

ภาพที่ 3.1 แสดงกำลังอัดของสารประกอบหลักในช่วงเวลาต่างๆจะเห็นว่า  $C_3S$  ให้กำลังอัดตั้งแต่ช่วงต้นจนถึงช่วงปลาย (ที่อายุ 0 ถึง 360 วัน) สูงที่สุด รองลงมาคือ  $C_2S$  ซึ่งให้กำลังช่วงต้นช้ากว่า  $C_3S$  แต่พอช่วงปลายก็ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนการพัฒนากำลังของ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับ  $C_3S$  และ  $C_2S$



ภาพที่ 3.1

กำลังอัดของสารประกอบหลัก (ปริญญา, 2547)

### 3.1.3 สารประกอบรองในปูนซีเมนต์

สารประกอบรองที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ ถึงแม้จะมีปริมาณน้อย แต่สารประกอบบางตัวมีผลกระทบต่อซีเมนต์เฟสท์หรือคอนกรีตทั้งขณะที่ยังไม่แข็งตัวและที่แข็งตัวแล้ว

#### 1. ยิปซั่ม (Gypsum หรือ Calcium Sulfate Dihydrate หรือ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

การผลิตปูนซีเมนต์ในขั้นตอนสุดท้ายจะบดปูนเม็ดร่วมกับยิปซั่ม เพื่อป้องกันการก่อตัวเร็วเกินไปของซีเมนต์เฟสท์ เมื่อมีอยู่มากเกินไปจะทำให้ซีเมนต์เฟสท์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการขยายตัวและแตกร้าวได้ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{C}_3\text{A}$  กับยิปซั่มทำให้เกิดเอททริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งมีปริมาตรเพิ่มมากขึ้นจากเดิม เมื่อมียิปซั่มผสมอยู่น้อยปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{C}_3\text{A}$  กับยิปซั่มจะเกิดขึ้นเมื่อซีเมนต์เฟสท์ยังอยู่ในสภาพพลาสติก ทำให้การขยายตัวของปริมาตรเกิดขึ้นก่อนการแข็งตัวของซีเมนต์เฟสท์จึงไม่ก่อให้เกิดอันตราย แต่เมื่อมียิปซั่มผสมอยู่มากปฏิกิริยาจะยังคงเกิดขึ้นแม้หลังจากที่ซีเมนต์เฟสท์แข็งตัวแล้ว

#### 2. ปูนขาวอิสระ (Free Lime)

ปูนขาวอิสระสามารถเกิดขึ้นได้จากวัตถุดิบที่มีปริมาณของ  $\text{CaO}$  มากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ได้หมด หรืออาจเกิดขึ้นเมื่อปริมาณของ  $\text{CaO}$  ไม่มากแต่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ต่างๆไม่สมบูรณ์ในระหว่างการเผา การรวมตัวของ Free Lime กับ

น้ำทำให้เกิดสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่มีปริมาณมากขึ้น ถ้า Free Lime มีปริมาณที่มากเกินไป อาจทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ก่อตัวแล้วเกิดการขยายตัวและแตกร้าวได้ พฤติกรรมนี้เรียกว่า ความไม่อยู่ตัวของ Lime (Unsoundness Due to Lime)

### 3. แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide, MgO)

วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์มีแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{MgCO}_3$ ) ผสมอยู่เล็กน้อย เมื่อเผาวัตถุดิบ  $\text{MgCO}_3$  จะสลายตัวเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) และคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) โดยแมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ดที่เหลือจะอยู่ในรูปผลึกอิสระและรวมตัวกับน้ำ การรวมตัวกับน้ำจะเกิดได้ช้ามากกินเวลานับปี ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเหมือนกับ  $\text{CaO}$  คือ ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดความไม่อยู่ตัว (Unsoundness) และอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวได้ การขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของ  $\text{MgO}$  ในปูนซีเมนต์สามารถทดสอบการขยายตัวด้วยวิธีของ Autoclave ตามมาตรฐาน ASTM C 151

### 4. อัดคาไลออกไซด์ (Alkali Oxides หรือ $\text{Na}_2\text{O}$ , $\text{K}_2\text{O}$ )

อัดคาไลออกไซด์ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับมวลรวมบางประเภทที่มีซิลิกา ปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยาอัดคาไลซิลิกา (alkali-silica reaction) ได้อัดคาไลซิลิกาเจล (alkali-silica gel) ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย ในกรณีนี้จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัดคาไลได้ ควรเลือกปูนซีเมนต์ที่มีอัดคาไลต่ำ

### 5. ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )

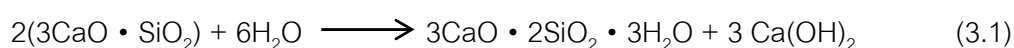
ทำให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวช้าเนื่องจาก  $\text{P}_2\text{O}_5$  ทำให้  $\text{C}_3\text{S}$  สลายตัวเป็น  $\text{C}_2\text{S}$  กับ  $\text{CaO}$  นอกจากนี้ถ้ามี  $\text{P}_2\text{O}_5$  มากพออาจทำให้เกิดความไม่คงตัวเพราะปูนขาวอิสระเพิ่มมากขึ้น

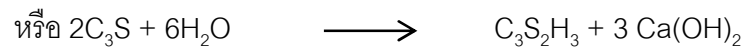
#### 3.1.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ก่อให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบนี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำสามารถเริ่มต้นด้วยปฏิกิริยาของแต่ละสารประกอบในปูนซีเมนต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบที่สำคัญมี 4 ชนิด คือ

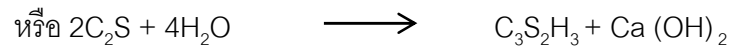
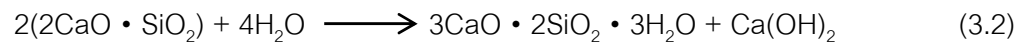
#### 1. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ และ $\text{C}_2\text{S}$ )

สมการของ  $\text{C}_3\text{S}$

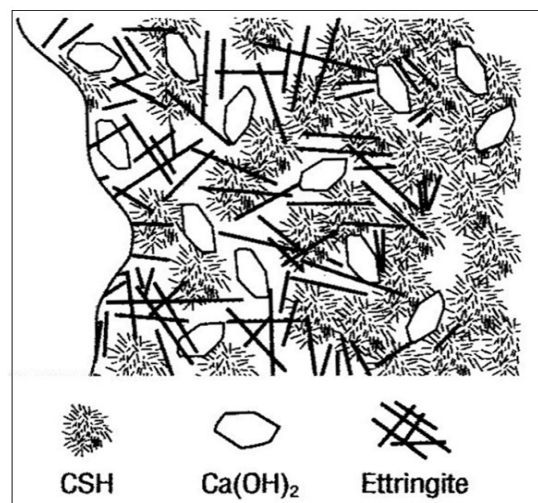




สมการของ  $\text{C}_2\text{S}$



จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) แสดงสมการทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกต  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  ตามลำดับ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) โดยอัตราส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ประมาณร้อยละ 15 – 25 ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมาก คือมีความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ประมาณ 12.5 ช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กได้เป็นอย่างดี ส่วนแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จะทำหน้าที่เป็นตัวประสาน



ภาพที่ 3.2

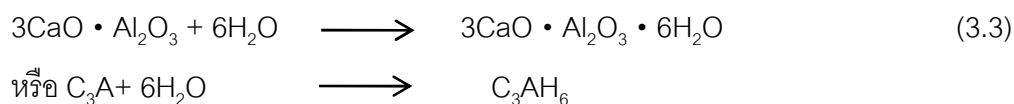
ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน



ภาพที่ 3.3

ตัวอย่างภาพถ่ายกำลังสูงของซีเมนต์เฟสที่แข็งตัวแล้ว (ปูนซีเมนต์ไทย, 2005, หน้า 31)

## 2. ปฏิกริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $C_3A$ )



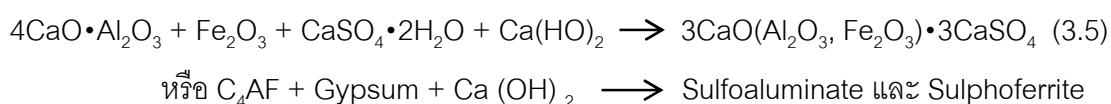
สมการทางเคมีที่ (3.3) ปฏิกริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $C_3A$ ) จะเกิดขึ้นกับน้ำได้ในทันทีและก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เฟส เพื่อหวังไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็วจึงใส่ยิบซั่ม ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิบซั่มจะทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $C_3A$ ) ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $C_3A$ ) ดังสมการที่ (3.4)



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ  $C_3A$  และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซัลไฟเกต ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ) เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ

C<sub>3</sub>A แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้อีกจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C<sub>3</sub>A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate ดังแสดงในตารางที่ 3.3

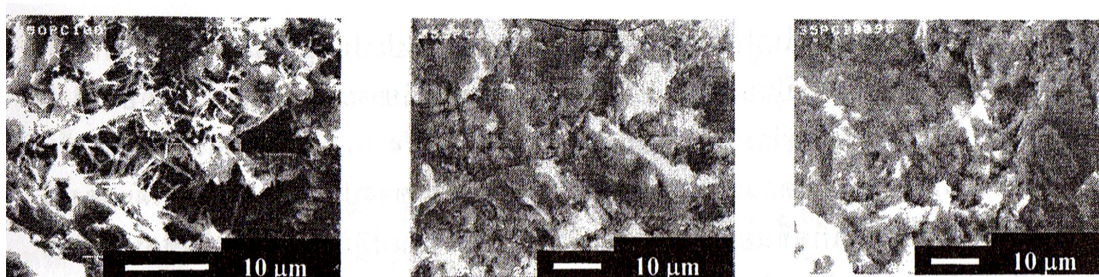
### 3. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (C<sub>4</sub>AF)



สมการที่ (3.5) แสดงปฏิกิริยาระหว่าง C<sub>4</sub>AF และ ยิปซั่มก่อให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตและแคลเซียมซัลโฟเฟอไรต์ ซึ่งปฏิกิริยาของ C<sub>4</sub>AF มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน C<sub>3</sub>A แต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าและมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า ยิปซั่มจะหน่วงการทำปฏิกิริยาของ C<sub>4</sub>AF มากกว่าที่หน่วงใน C<sub>3</sub>A

#### 3.1.5 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

ภาพที่ 3.4 แสดงภาพขยายด้วยเทคนิค SEM ของซีเมนต์พบว่าที่อายุ 7 วันโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์มีช่องว่างหรือโพรงมาก Ettringite มีลักษณะเป็นเข็มยาวเกิดขึ้นรอบเม็ดปูนและขยายเข้าไปในช่องว่าง ที่อายุ 28 วัน ผลผลิตไฮเดรชันขยายเข้าไปในโพรงหรือช่องว่างมากขึ้นทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นยิ่งขึ้น



ก.อายุ 7 วัน

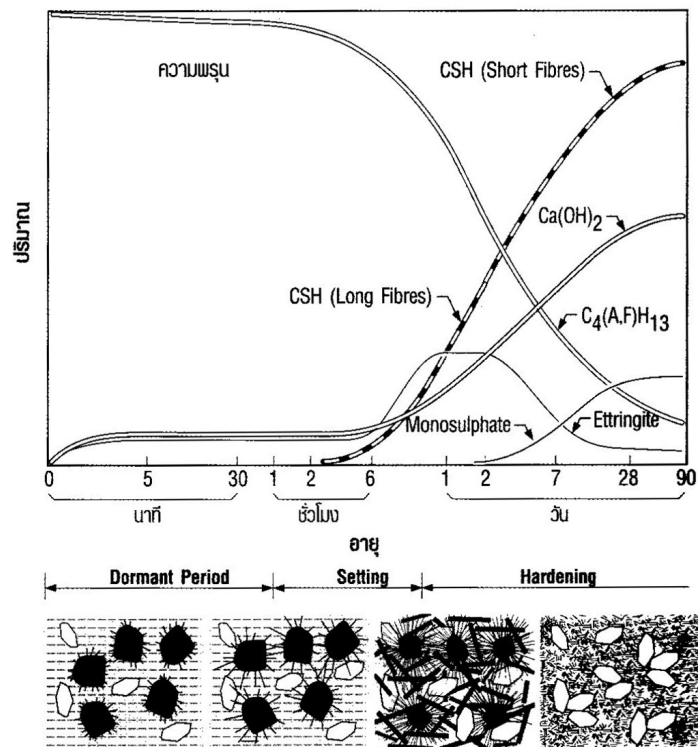
ข.อายุ 28 วัน

ค.อายุ 90 วัน

ภาพที่ 3.4

ภาพขยายของซีเมนต์เพสต์ (ปริญญาและชัย, 2006)

ภาพที่ 3.5 อนุภาคของเม็ดปูนจะแสดงด้วยเม็ดสีดำ ในขณะที่  $\text{Ca(OH)}_2$  จะแสดงด้วยรูปหกเหลี่ยม ส่วน Ettringite และ C-S-H จะแสดงด้วยเส้นสั้นทึบและเส้นสั้นบางตามลำดับ ซึ่งในช่วง Dormant Period อนุภาคของปูนซีเมนต์จะอยู่แยกกัน และจะเกิด  $\text{Ca(OH)}_2$  กับ Ettringite เป็นส่วนใหญ่ หลังจาก 1 ชั่วโมง CSH Gel จะเริ่มเกิดขึ้นโดยมีรูปร่างเป็นเส้นใยยาว การเกิดและขยายตัวของ C-S-H Gel นี้ก่อให้เกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังเพิ่มขึ้น หลังจากผ่านไป 24 ชั่วโมง Sunphate Ions ถูกใช้หมดไป ออกไซด์อลูมิเนียมและเหล็กเริ่มก่อตัว โดย Ettringite เปลี่ยนไปเป็น Monosulphate ส่วนปฏิกิริยาของ  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ได้ C-S-H เป็นเส้นใยสั้น ผลผลิตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้งหมดนี้ จะไปอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้ความพรุนของซีเมนต์เฟสลดลงในระยะยาว



ภาพที่ 3.5

แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้าง  
ของซีเมนต์เฟส (ปูนซีเมนต์ไทย, 2005, หน้า 33)

### 3.2 วัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลาน (Pozzolan) ปัจจุบันเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีตเพื่อช่วยในการลดต้นทุนและปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างให้ดียิ่งขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตในคอนกรีต ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดให้สามารถทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น โดยมาตรฐาน ASTM C 618 ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกาหรือซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน เกณฑ์การจำแนกประเภทวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 (ดังตารางที่ 3.1) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

1. ชนิด N (Class N) เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ มีปริมาณผลรวมของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 618 ดังแสดงในตารางที่ 3.4 เช่น หินเซอร์พ หินชั้น ถ้ำภูเขาไฟ และถ้ำเกลบ เป็นต้น วัสดุปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาตินี้จะต้องนำมาบดให้ละเอียดก่อนนำมาใช้งาน

2. ชนิด F (Class F) เป็นถ้ำลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัสที่มีปริมาณผลรวมของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 618 ถ้ำลอยชนิด F นี้ มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำสามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าถ้ำแคลเซียมต่ำ และมีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  มากซึ่งได้จากแร่ดินเหนียวและควอตซ์ในถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัส

3. ชนิด C (Class C) เป็นถ้ำลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัส เป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณผลรวมของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 50 และมีคุณสมบัติอื่นเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 618 มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์สูงเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่าถ้ำลอยแคลเซียมสูง สำหรับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มาจากแร่ดินเหนียวซึ่งมีปริมาณต่ำในลิกไนต์ ทำให้ถ้ำลอยชนิด C นอกจากมี  $\text{SiO}_2$  ต่ำแล้วปริมาณของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ยังต่ำอีกด้วย นอกจากนี้ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่สูงในถ้ำลอยชนิด C ทำให้มีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง ซึ่งมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานอีกด้วย

## ตารางที่ 3.1

ข้อกำหนดของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด Pozzolan		
	N	F	C
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	70.0	50.0
SO <sub>3</sub> สูงสุด, ร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา(LOI) สูงสุด, ร้อยละ	10.0	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na <sub>2</sub> O, ร้อยละ	1.5	1.5	1.5
ข้อกำหนดทางกายภาพ	N	F	C
ความละเอียด			
ปริมาณค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร่อนโดยใช้น้ำ, สูงสุดร้อยละ	34.0	34.0	34.0
ดัชนีกำลัง เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์			
ที่อายุ 7 วัน อย่างต่ำร้อยละ	75.0	75.0	75.0
ที่อายุ 28 วัน อย่างต่ำร้อยละ	75.0	75.0	75.0
ความต้องการน้ำสูงสุดร้อยละ	115	105	105
ความคงตัว (Soundness)			
การขยายตัวหรือหดตัวออกโตเคลฟ สูงสุดร้อยละ	0.8	0.8	0.8
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ			
ความหนาแน่น ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5.0	5.0	5.0
ร้อยละที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5.0	5.0	5.0

## 3.2.1 เถ้าแกลบ

เถ้าแกลบ คือ วัสดุปอซโซลานที่อยู่ในหมวด N (ปอซโซลานธรรมชาติ) โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของเถ้าแกลบเป็นซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) ซึ่งซิลิกานี้มีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการเผา ถ้าเผาที่อุณหภูมิต่ำทำให้มีสารอินทรีย์หลงเหลืออยู่เยอะ และไม่เหมาะนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ แต่ถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงเกินไปซิลิกาที่ได้จะเป็นผลึกซึ่งเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก การเผาเถ้าแกลบที่อุณหภูมิที่เหมาะสมใน

ช่วงอุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียสทำให้ซิลิกาอยู่ในรูปอสัณฐานซึ่งมีความไวต่อการทำปฏิกิริยา

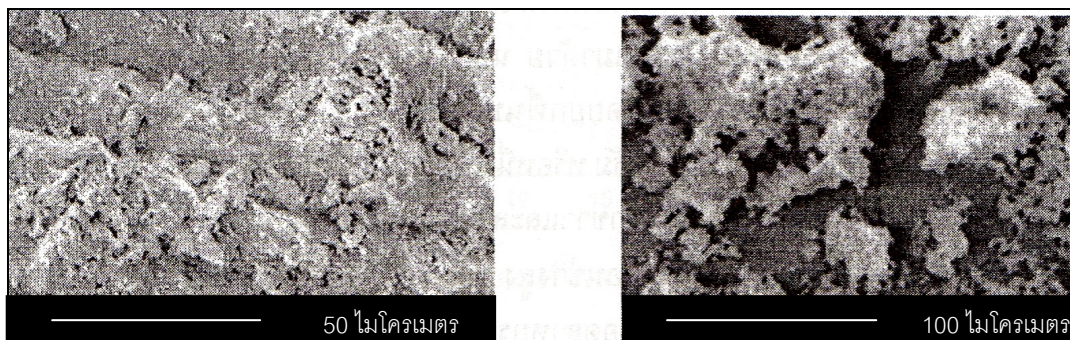
### 1. องค์ประกอบทางเคมีของแก้วเคลือบ

แก้วเคลือบมีปริมาณของ  $\text{SiO}_2$  สูงประมาณร้อยละ 90 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผลาญมีผลต่อค่า LOI โดยถ้าเผาไหม้ไม่สมบูรณ์แก้วเคลือบจะมี LOI สูงขึ้น ส่วนใหญ่จะเป็นธาตุอานุดน้ำสูง และถ้ามีจำนวนมากจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง ถึงแม้แก้วที่ผ่านการเผาไหม้แบบสมบูรณ์โดยมี LOI ต่ำและมีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) สูง แต่ซิลิกานี้ยังไม่แน่ว่าจะสามารถทำปฏิกิริยาได้ ความสามารถในการทำปฏิกิริยาของแก้วเคลือบนั้นขึ้นอยู่กับสถานะอสัณฐาน (Amorphous) และผลึกของซิลิกา (Crystalline) ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ ในการเผา โดยซิลิกาที่เป็นผลึกจะเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก แต่ซิลิกาที่มีสถานะเป็นอสัณฐานจะมีความไวต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

### 2. การเผาและชนิดของเคลือบ

การเผาเคลือบจะได้แก้วเคลือบ 2 ลักษณะ คือ แก้วเคลือบขาวกับแก้วเคลือบดำ โดยแก้วเคลือบขาวเกิดจากการเผาที่อุณหภูมิสูงและมีอากาศเพียงพอ ส่วนแก้วเคลือบดำเกิดจากการเผาในที่อากาศไม่เพียงพอและที่อุณหภูมิต่ำ ถึงแม้การเผาที่อุณหภูมิสูงแต่อยู่ในสภาวะอากาศไม่เพียงพอหรือระยะเวลาสั้นแก้วเคลือบที่ได้ก็ยังมี LOI สูงเช่นกัน นอกจากนี้แก้วเคลือบที่ได้จากการเผาจะต้องนำมาบดให้ละเอียดก่อนจะนำไปผสมกับปูนซีเมนต์ได้

ภาพที่ 3.6 แสดงลักษณะโครงสร้างเซลล์ของแก้วเคลือบ การเผาเคลือบในอุณหภูมิที่ไม่สูงจนเกินไปจะทำให้แก้วเคลือบอยู่ในลักษณะพรุนและยังคงรักษาโครงสร้างเซลล์ไว้ได้ แก้วเคลือบที่เผาแล้วมีขนาดค่อนข้างใหญ่ การนำแก้วเคลือบที่เป็นวัสดุปอซโซลานไปใช้งานจะต้องนำมาบดให้ละเอียดเพื่อให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกับขนาดของผงปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นความละเอียดที่ใช้งานได้ดี การบดแก้วเคลือบนิยมใช้การบดแห้งเพราะบดได้ง่ายและเร็ว ส่วนการบดแบบเปียกถึงแม้ได้แก้วเคลือบที่อนุภาคละเอียดมากกว่า แต่วิธีการยุ่งยากกว่าการบดแบบแห้ง



(ก) ผิวน้ำแก้ว

(ข) เซลล์ที่เป็นรูพรุนของน้ำแก้ว

## ภาพที่ 3.6

ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM แสดงลักษณะของน้ำแก้ว (ปริญญญาและชัย, 2006)

### 3. น้ำแก้วจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้า

กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งใช้น้ำจากโรงไฟฟ้าที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 14 เป็นเชื้อเพลิง โดยน้ำจะถูกต้มจนเดือดในไอน้ำขนาด 200 ตัน จากนั้นน้ำจะถูกต้มในหม้อต้ม (Boiler) ที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดความร้อนจากการเผาไหม้ น้ำในหม้อต้ม (Boiler) เกิดเป็นไอน้ำ (Super heat Steam) ที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส และความดัน 18 บาร์ ไอน้ำที่ได้จะถูกนำมาหมุนด้วยกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 9.2 เมกะวัตต์ จากกระบวนการดังกล่าวจะทำให้มีการกระจายของฝุ่นเกิดขึ้น แต่ฝุ่นจะถูกกรองด้วยระบบ Multi Cyclone เพื่อลดปริมาณฝุ่นให้น้อยลงและลดความเร็วลมลง ปริมาณฝุ่นในอากาศที่ผ่านระบบ Multi Cyclone แล้วจะนำมาผ่านระบบ Wet Scupper เพื่อลดอุณหภูมิของไอเสียลง(เมื่ออุณหภูมิลดลง ปริมาตรของอากาศก็จะลดลงไปด้วย) ความเร็วลมในระบบ Wet Scupper จะถูกลดลงเหลือประมาณ 4 เมตรต่อวินาที และฝุ่นจะถูกดักจับด้วยเครื่องดูดฝุ่น ทำให้สามารถควบคุมปริมาณฝุ่นให้มีปริมาณผสมในอากาศน้อยกว่า 300 ppm ซึ่งต่ำกว่ากฎหมายกำหนด โดยปกติน้ำแก้วที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ น้ำแก้วผ่านเกณฑ์โรงไฟฟ้าและขายให้กับต่างประเทศซึ่งมีประมาณร้อยละ 95 หรือคิดเป็นปริมาณ 45 ตันต่อวัน น้ำแก้วไม่ผ่านเกณฑ์โรงไฟฟ้าเป็นน้ำแก้วที่นำไปทิ้งและมีปัญหาในการจัดการมีประมาณร้อยละ 5 หรือคิดเป็นปริมาณ 3 ตันต่อวัน

#### 4. การบดเถ้าแกลบ

เถ้าแกลบที่นำมาพิจารณาต้องนำมาบดให้ละเอียดก่อนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ ทั้งทางเคมีและทางกายภาพ การประเมินขั้นต้นจะประเมินคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C 618 การบดเถ้าแกลบในงานวิจัยนี้ใช้วิธีบดแบบแห้งโดยใช้เครื่องบดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.61 เมตร กว้าง 0.88 เมตร ความเร็วรอบ 52 รอบ/นาที ใช้เหล็กเส้นกลมเป็นตัวกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9, 12 และ 15 มิลลิเมตร จำนวน 45, 45 และ 35 ตามลำดับ ภายในเครื่องบดสามารถบรรจุเถ้าแกลบได้ในปริมาณ 20 กิโลกรัม แสดงดังภาพที่ 3.7



ก. เครื่องบดเถ้าแกลบ



ข. เหล็กเส้นกลมที่ใช้เป็นตัวกลาง

#### ภาพที่ 3.7

เครื่องบดเถ้าแกลบแบบแห้งและเหล็กตัวกลาง

ตารางที่ 3.2 เป็นตัวอย่างเถ้าแกลบดำที่ได้จากโรงไฟฟ้าที่ผ่านการบด 1-6 ชั่วโมง (อนัญญ์ รอดอนันต์, 2006) พบว่า การบดเถ้าแกลบดำเป็นเวลา 4 ชั่วโมงขึ้นไป ทำให้มีคุณสมบัติ ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618

ตารางที่ 3.2  
ตัวอย่างเข้าแลบดำที่ผ่านการบดเป็นเวลา1-6 ชั่วโมง

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ASTM C 618	เวลาในการบด(ชั่วโมง)					
		1	2	3	4	5	6
SiO <sub>2</sub>	-	90.61	91.84	91.02	90.63	93.1	90.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.5	0.5	0.53	0.52	0.52	0.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	2.43	1.4	1.55	2	1.35	2.42
SiO <sub>2</sub> +AlO <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ร้อยละต่ำสุด 70	93.54	93.74	93.10	93.15	94.97	93.54
CaO	-	0.84	0.82	0.93	0.85	0.8	0.77
MgO	-	0.38	0.5	0.47	0.37	0.4	0.32
K <sub>2</sub> O	-	1.98	1.92	2.3	1.95	2	1.86
Na <sub>2</sub> O	ร้อยละสูงสุด1.5	0.03	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02
SO <sub>3</sub>	ร้อยละสูงสุด1.4	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
TiO <sub>2</sub>	-	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09
Free CaO	-	0.06	0.06	0.08	0.06	0.06	0.06
<b>คุณสมบัติทางกายภาพ</b>	<b>ASTM C 618</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
LOI (%)	ร้อยละสูงสุด 10	0.82	0.65	0.58	0.84	0.64	0.62
Moisture Content (%)	ร้อยละสูงสุด 3	1.09	1.23	1.02	1.13	0.98	0.98
พื้นที่ผิว(ตร.ซม./กรัม)	-	2,734	2,958	4,809	5,372	5,548	5,685
Specific Gravity	-	2.13	2.18	2.30	2.30	2.35	2.38
ความละเอียด (ค้ำตะแกรงเบอร์ 325)	ร้อยละสูงสุด 34	38.63	32.08	28.35	7.01	6.90	3.85
Strength Index (% of Control)							
7 day	ร้อยละต่ำสุด 75	71	77	77	79	87	91
28 day	ร้อยละต่ำสุด 75	63	73	73	75	88	91
Water Requirement(%)	ร้อยละสูงสุด 115	112	110	110	103	103	103
Bulk Density(kg/l)	-	0.66	0.67	0.68	0.70	0.71	0.72

### 3.3 ปฏิกริยาปอซโซลานิก

ปฏิกริยาปอซโซลานิก คือ ปฏิกริยาของซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และ/หรือ อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในสารปอซโซลานทำปฏิกริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ กรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ทำปฏิกริยาปอซโซลานิกได้ C-S-H สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ



กรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็น อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ทำปฏิกริยาปอซโซลานิก ได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ( $\text{C}_3\text{A}_2\text{H}_3$ ) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ



### 3.4 ผงหินปูน (Limestone Powder)

ผงหินปูน (Limestone Powder) เป็นวัสดุที่เกิดขึ้นจากขบวนการไหมหินปูนเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตเม็ดปูนซีเมนต์ (Clinker) และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ ผงหินปูนสามารถใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตบางอย่างได้ อาทิเช่น ช่วยเพิ่มการเกาะตัวของคอนกรีต ลดการแตกร้าวและการแตกร้าวทำได้ง่ายขึ้น ช่วยพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นทำให้คอนกรีตก่อตัวได้เร็ว ผงหินปูนที่ใช้ผสมในคอนกรีตควรมีอนุภาคที่เหมาะสมสามารถเข้าแทรกระหว่างอนุภาคของซีเมนต์ ทำให้ซีเมนต์สามารถทำปฏิกริยาไฮเดรชันกับน้ำได้อย่างทั่วถึงและเสร็จสมบูรณ์เร็วขึ้น

### 3.4.1 ประเภทของผงหินปูน

ผงหินปูนที่เกิดจากหินปูนโดโลมิติก (Dolomitic Limestone) และหินปูนโดโลไมท์ (Dolomite Limestone) จัดเป็นหินคาร์บอเนต (Carbonate Rock) ที่ให้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมมากที่สุดเมื่อเทียบกับหินประเภทอื่น มีองค์ประกอบหลักคือ แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) โดยหินปูนประเภทโดโลมิติกจะมีแร่โดโลไมท์ต่ำกว่าร้อยละ 50 หินปูนโดโลไมท์จะมีแร่โดโลไมท์มากกว่าร้อยละ 50

### 3.4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของหินปูน

ตารางที่ 3.6 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของหินปูนทั้งโดโลมิติก และโดโลไมท์ ซึ่งมีรายละเอียดของรูปร่างของผลึกที่มีลักษณะที่เหมือนกัน โดยที่หินโดโลไมท์แข็งและมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าหินโดโลมิติก มีสีขาวยและชมพูทั้งสองชนิด และมีธาตุเจือปนใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3.3

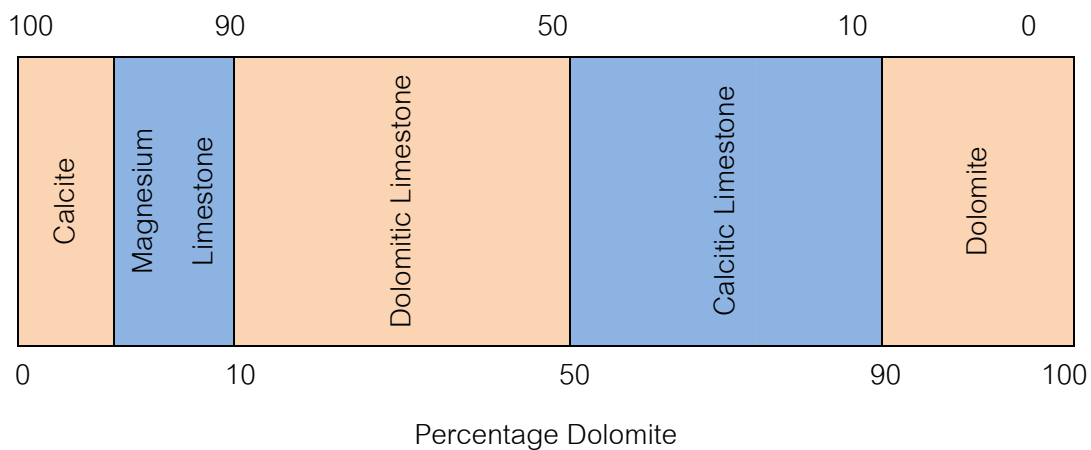
คุณสมบัติทางกายภาพของหินปูนทั้งสองชนิด (เซวาลิตร์ ทองประดับ, 2538)

คุณสมบัติทางกายภาพ	ประเภทของหินปูน	
	โดโลมิติก	โดโลไมท์
รูปร่างผลึก	Hexagonal/Rhombohedral ที่มีผิวหน้าโค้ง	Hexagonal/Rhombohedral ที่มีผิวหน้าโค้ง
ความแข็ง	3.0-3.5 ตามมาตรฐาน Mohs' Scale	3.5-4.0 ตามมาตรฐาน Mohs' Scale
ความถ่วงจำเพาะ	2.65-2.75	2.82
สี	สีขาว สีเทา หรือสีส้มอมชมพู	สีขาวหรือสีชมพู
ธาตุเจือปน	Fe, Mn, Co, Zn และ Mg	Fe, Mn, Co, Zn และ Pb

### 3.4.3 คุณสมบัติทางเคมีของหินปูนทั้งสองชนิด

การจำแนกชื่อของหินปูนทั้งสองชนิดนั้นต้องอาศัยปริมาณร้อยละของแร่โดโลไมท์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) แร่แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{MgCO}_3$ ) ดังภาพที่ 3.8 และตารางที่ 3.4

Percentage Calcite



ภาพที่ 3.8

แผนภูมิแสดงการจำแนกชื่อของหินปูน (Murray, R. C. & Lucia, F. J., 1967)

ตารางที่ 3.4

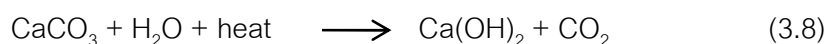
การเรียกชื่อหินคาร์บอเนต พิจารณาจากร้อยละของแร่โดโลไมท์ แมกนีเซียมออกไซด์ และ แมกนีเซียมคาร์บอเนต (Murray, R. C. & Lucia, F. J., 1967)

ประเภท	ร้อยละ ของ โดโลไมท์	ปริมาณแมกนีเซียม ออกไซด์ โดยประมาณ ร้อยละเทียบเท่า	ปริมาณแมกนีเซียม คาร์บอเนต โดยประมาณ ร้อยละเทียบเท่า
High Calcium Calcite	0-10	0 to 1.1	0 to 2.3
Magnesium Dolomitic Limestone	10-15	1.1 to 2.1	2.3 to 4.4
Calcitic Dolomite	50-90	2.1 to 10.8	4.4 to 22.7
Dolomite	90-100	10.8 to 19.5	22.7 to 41.0
		19.5 to 21.6	41.0 to 45.4

#### 3.4.4 บทบาทของผงหินปูนในการแทนที่ปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ในหินปูน คือ แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{MgCO}_3$ ) มีคุณสมบัติเป็นทั้งวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี (Inert Material) และเป็นวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive Material) ดังนี้

1. วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมี (Inert Material) ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้แทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมี จึงทำให้เสถียรภาพเชิงปริมาตรดีขึ้นและยังช่วยเพิ่มความสามารถต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ดีขึ้น แต่อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับกำลังของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{MgCO}_3$ ) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมี แต่สารทั้งสองสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ถ้ามีความละเอียดมากเพียงพอและ/หรือให้ความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ดังสมการต่อไปนี้



2. วัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมี (Reactive Material) ในกรณีที่มีการนำส่วนวัสดุที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีมาใช้เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ เขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



### 3.5 คุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และความทนทานของซีเมนต์มอร์ตาร์

#### 3.5.1 ความต้องการน้ำ (Water Requirement)

การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้ความต้องการน้ำของส่วนผสมเปลี่ยนไป การหาค่าความต้องการน้ำของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมวัสดุแทนที่จะวัดที่ค่าการไหลผ่าน โดยค่าการไหลผ่านจะขึ้นอยู่กับปริมาณและความละเอียดของส่วนผสม ตารางที่ 3.5 แสดงค่าความต้องการน้ำของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมแล้วลอย พบว่า ถ้าวัดที่ละเอียดมากกว่าจะทำให้ความต้องการน้ำลดลง การเพิ่มปริมาณแล้วลอยทำให้ส่วนผสมไหลดีขึ้นทำให้ต้องการน้ำลดลง ถ้าวัดที่ละเอียดมีความเป็นเม็ดกลมสูงและมีผิวเรียบทำให้ความต้องการน้ำลดลงได้อีก แต่การ

ใช้เถ้าลอยที่ละเอียดมากจะลดน้ำได้ไม่มากนักเนื่องจากพื้นที่ผิวที่สูงทำให้ต้องการน้ำมาเคลือบผิวมากขึ้น กลับกันเถ้าลอยที่หยาบมากจะมีผิวไม่เรียบเป็นรูพรุนทำให้อุณหภูมิและต้องการน้ำมากขึ้น

### ตารางที่ 3.5

ความต้องการน้ำและกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (ปริญญา, 2006)

ส่วนผสม	ความละเอียด ซม <sup>2</sup> /ก.	อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุผง (W/B)	กำลังอัด (MPa)			
			3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3,500	0.500	20	31.5	48.5	52
เถ้าลอย	3,000	0.485	11.5	20.5	30.5	41.1
เถ้าลอยผ่านตะแกรงเบอร์ 200	3,900	0.402	15.5	19	38.5	53.5
เถ้าลอยส่วนละเอียด	9,300	0.439	25	31	53.5	61.1
เถ้าลอยส่วนหยาบ	1,800	0.572	8.5	13.5	23	29

หมายเหตุ : มอร์ตาร์ทำจากปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 40 โดยใช้สารซีเมนต์ 1 ส่วน

ทรายมาตรฐาน 2.75 ส่วน โดยน้ำหนัก ค่าการไหลแพร่ร้อยละ  $110 \pm 5$

#### 3.5.2 กำลังอัด (Compressive Strength)

กำลังอัดเป็นคุณสมบัติของคอนกรีตในสถานะแข็งตัว (Hardened State) หมายถึงคอนกรีตที่พัฒนาการของกำลังรับน้ำหนักได้เต็มที่ตามที่ออกแบบไว้ คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วต้องมีกำลังที่ดีโดยมีปัจจัย คืออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชัน กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม บ่งบอกถึงความต้านทานต่อการเสียรูปของวัสดุ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตาร์จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ เช่นรูปร่าง ลักษณะผิวของมวลรวม และปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับแร่ธาตุของวัสดุผสม ในทางปฏิบัติปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตมีดังนี้

1. คุณสมบัติของวัสดุผสม ประกอบด้วยวัสดุผง มวลรวม และน้ำที่ต้องเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพ
2. การควบคุมการผลิตตั้งแต่การชั่งตวงส่วนผสม การผสม การลำเลียง การเทเข้าแบบหล่อ และการอัดแน่น

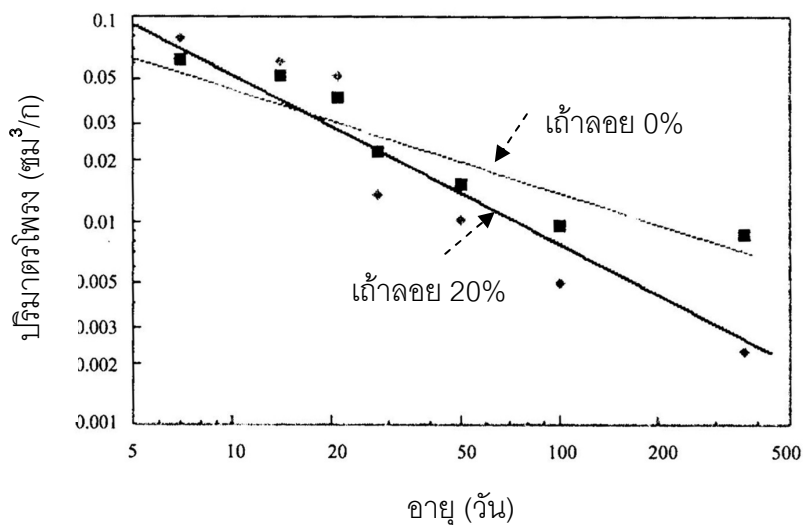
3. กำลังอัดของคอนกรีตจะสูงสุดหากบ่มขึ้นตลอดเวลา เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต้องการน้ำอย่างต่อเนื่อง กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ราวเท่าที่ยังมีความชื้นให้ซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ต่อไปอีก

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นต่ำกว่าปกติ เป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานิคต้องรอผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ลดลง จนกระทั่งปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นพอที่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิค กำลังอัดของซีเมนต์แทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานจะมีกำลังที่สูงขึ้นเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ปกติ หรือสูงกว่า ตามคุณสมบัติของวัสดุแทนที่นั้น

### 3.5.3 โพร่งและโครงสร้างของโพร่ง

โครงสร้างโพร่งมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โพร่งของเพสต์ มอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วนอกจากจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ยังขึ้นอยู่กับปริมาณอากาศ โดยโพร่งในเพสต์ที่แข็งตัวแล้ว แบ่งได้เป็น โพร่งขนาดใหญ่ โพร่งคาпилลารี (Capillary Pore) และโพร่งเจล (Gel Pore) การเรียกชนิดของโพร่งนิยมดูจากขนาดของโพร่ง คือ โพร่งใหญ่กว่า 10 ไมโครเมตรเป็นโพร่งขนาดใหญ่ โพร่งขนาด 0.01 ถึง 10 ไมโครเมตรเป็นโพร่งคาпилลารี และขนาดเล็กกว่า 0.01 ไมโครเมตรเป็นโพร่งของเจล ปริมาตรโพร่งในเพสต์ส่วนใหญ่มาจาก โพร่งคาпилลารี ส่วนในคอนกรีตส่วนมากจะเป็นโพร่งขนาดใหญ่ มีหลายประเภทได้แก่ โพร่งจากการอัดแน่น (Compaction Pore) โพร่งจากสารกักกระจายฟองอากาศ และโพร่งจากน้ำส่วนเกิน

ภาพที่ 3.9 แสดงปริมาตรของโพร่งเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 5 ถึง 500 วัน พบว่าหลังจาก 20 วัน ปริมาตรโพร่งของเพสต์ผสมเถ้าลอยต่ำกว่าเพสต์ซีเมนต์ปกติ ซึ่งตรงกับพฤติกรรมด้านกำลังรับแรง กล่าวคือกำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุต้นจะต่ำแต่จะดีขึ้นช่วงปลาย และมีความที่บ้น้ำและความทนทานสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้พบว่าเถ้าลอยที่มีขนาดเล็กกว่า ขนาดกลมกว่า และผิวเรียบกว่าสามารถลดขนาดและปริมาตรโพร่งที่ดีกว่าเถ้าลอยที่หยาบ จะเห็นได้ว่าผลจากทางกายภาพของวัสดุมีอิทธิพลต่อโครงสร้างของโพร่ง



ภาพที่ 3.9

ปริมาณรโพรงของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย W/B = 0.8 (ปริญญา, 2006)

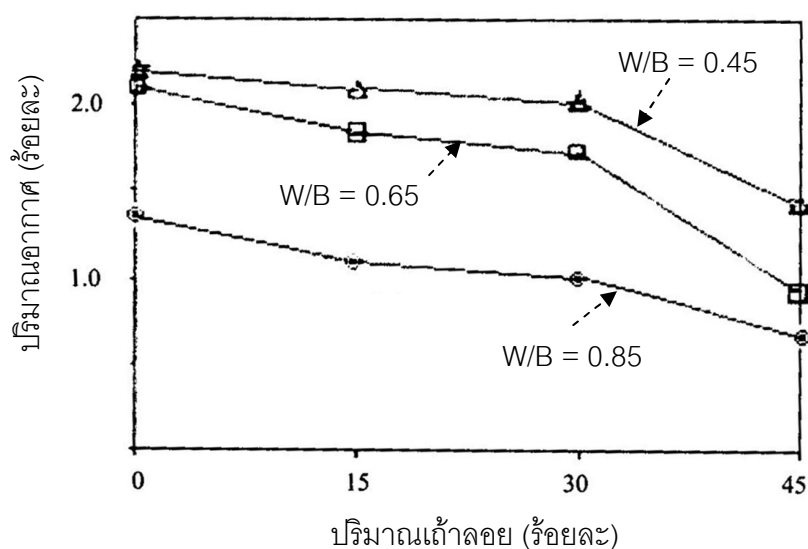
### 3.5.4 ปริมาณอากาศ (Air Content)

ปริมาณอากาศ คือ สัดส่วนของปริมาตรอากาศที่มีอยู่ภายในคอนกรีตต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต การวัดปริมาณอากาศในคอนกรีตในงานก่อสร้างบางประเภท เช่น งานก่อสร้างพื้นห้องเย็น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทดสอบว่าปริมาณอากาศเป็นไปตามข้อกำหนดหรือไม่ ทั้งนี้ในการใช้งานห้องเย็น ที่จุดเยือกแข็ง (Freezing) น้ำในโพรงคาปิลลารี (Capillary Pores) ในคอนกรีตเริ่มเปลี่ยนเป็นน้ำแข็งซึ่งมีปริมาตรเพิ่มขึ้น จึงเกิดการขยายตัวจนเต็ม แล้วน้ำส่วนเกินจะถูกผลักดันไปยังโพรงอากาศ (Air Void) ผ่านทางเนื้อซีเมนต์เพสต์ ความดันที่เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการไหลของน้ำจากโพรงคาปิลลารีไปยังโพรงอากาศ ถ้าความดันมีค่ามาก อาจส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ ปริมาณอากาศในคอนกรีตถ้ามีน้อยกว่าค่าที่กำหนดจะไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ด้านความคงทน แต่ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง

โพรงขนาดใหญ่จะเกิดมากในบริเวณที่การจี้เขย่าคอนกรีตไม่ดีเพียงพอ จะทำให้เหลือน้ำและฟองอากาศส่วนหนึ่งถูกกักอยู่ใต้เม็ดหิน กรวด เหล็กเสริม หรือน้ำส่วนเกินอาจมีมากเกินไป โพรงอากาศในเนื้อคอนกรีตนี้ทำให้ ความตึงน้ำ ความแข็งแรง และความคงทนของคอนกรีตลดลง สำหรับฟองอากาศที่ถูกกักกระจาย ฟองอากาศชนิดนี้เกิดจากการใส่สารกระจายกักฟองอากาศ ในคอนกรีตทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบนผิวอนุภาคที่อยู่ระหว่างผิวน้ำกับอากาศ

ก่อให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 50 ถึง 200 ไมครอนกระจายและคงอยู่ในเนื้อคอนกรีต ฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นนี้จะช่วยเพิ่มความทนทานให้แก่คอนกรีตในงานห้องเย็น นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถเทได้ ลดการแยกตัวแต่กำลังคอนกรีตลดลง โดยปริมาณของอากาศนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของวัสดุ ส่วนผสม และการจัดเขย่าคอนกรีต

ภาพที่ 3.10 แสดงการนำวัสดุปอซโซลานที่เป็นเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ ปริมาณอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เพิ่มขึ้น การเพิ่มอัตราส่วนน้ำเป็นการเพิ่มปริมาณของเพสต์ เนื่องจากเถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณอากาศเพิ่มมากขึ้น ปริมาณอากาศของคอนกรีตสดจะลดลง เมื่อ W/B เท่ากัน โดยจะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น การใส่เถ้าลอยโดยไม่ลดน้ำทำให้มีน้ำส่วนเกิน ซึ่งจะไปแทนที่โพรงอากาศทำให้ปริมาณอากาศที่วัดได้ลดลง



ภาพที่ 3.10

ปริมาณอากาศของคอนกรีตสดที่ผสมเถ้าลอย (ปริญญา, 2006)

### 3.5.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของซีเมนต์เพสต์และ/หรือมอร์ตาร์

#### 1. การหดตัวแบบออโตจีเนียส (Autogenous Shrinkage)

การหดตัวแบบออโตจีเนียส เป็นการหดตัวเนื่องจากน้ำในโพรงคาปิลลารีถูกดูดไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยไม่พิจารณาถึงผลของการสูญเสียน้ำให้กับสิ่งแวดล้อม ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดอย่างต่อเนื่องจนน้ำในโพรงคาปิลลารีเกิดไม่อิ่มตัวและไม่มี

น้ำภายนอกเข้าทำเข้าทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา เรียกกระบวนการนี้ว่า Self-Desiccation มีผลทำให้ความดันในช่องว่างคาпилลารีลดลง เกิดการหดตัวแบบอโตจีเนียส ซึ่งจะเกิดในทุกทิศทุกทาง การใช้วัสดุปอซโซลานในปูนซีเมนต์สามารถช่วยลดการหดตัวนี้ได้ (ปริญญา และชัย, 2007) การดูดน้ำหรือความชื้นจากโพรงคาพิลารีจะมีค่าสูงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำจึงทำให้เกิดการหดตัวแบบอโตจีเนียสที่สูงขึ้นได้

## 2. การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)

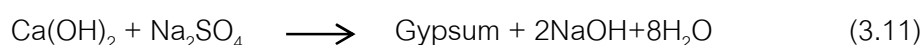
การหดตัวแบบแห้งเป็นการหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียน้ำของซีเมนต์เพสต์ไปสู่บรรยากาศที่มีสภาวะความชื้นต่ำ ซึ่งเกิดจากการสูญเสียน้ำทั้งโพรงคาพิลารี (Capillary Pore) และโพรงเจล (Gel Pore) ในซีเมนต์เพสต์ ให้กับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากความแตกต่างกันของความชื้นสัมพัทธ์เพื่อทำให้ระบบสมดุล ความชื้นที่สูญเสียน้ำไปไม่สามารถกลับคืนมาได้ ปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ที่หดตัวมีค่าไม่เท่ากับปริมาตรของน้ำที่สูญเสียน้ำไป อันเนื่องมาจากการยึดรั้งของโครงสร้างของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต

## 3. การกัดกร่อนโดยซัลเฟต

เกลือซัลเฟตที่อยู่ในรูปของสารละลายสามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ โดยที่ซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับทุกๆผลิตภัณฑ์ของซีเมนต์เพสต์อันจะก่อให้เกิดการขยายตัว (Expansion) การแตกร้าว (Crack) และการหลุดร่อน (Spelling) ในระยะยาว โดยซัลเฟตแต่ละชนิดมีความสามารถละลายน้ำไม่เท่ากัน เช่น แคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) ละลายน้ำเพียง 1.2 กรัม/ลิตร โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ละลายน้ำ 240 กรัม/ลิตร แมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) ละลายน้ำ 300 กรัม/ลิตร

เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นในการศึกษาความทนทานต่อสารซัลเฟตจึงใช้เฉพาะ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ  $\text{MgSO}_4$

การกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ขึ้นอยู่กับปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ในปูนซีเมนต์และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยกลไกเริ่มจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ได้ยิบซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ดังสมการที่ (3.11)

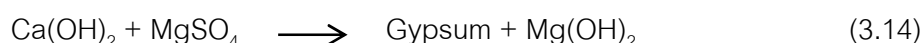


ยิบซั่มที่ได้จากสมการที่ (3.11) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรตโมโนซัลเฟต (C-A-H) หรือไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $C_3A$ ) ทำให้ได้ Secondary Ettringite ดังสมการที่ (3.13) และ (3.12)



ยิบซั่มและ Ettringite ที่เกิดขึ้นจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นกว่า 2 เท่า ทำให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์จนแตกร้าว ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายซีเมนต์เพสต์โดยซัลเฟต คือปริมาณของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $C_3A$ ) โดยยิ่งปูนซีเมนต์มีปริมาณ  $C_3A$  น้อยจะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนโดยซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มี  $C_3A$  มาก ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ในเพสต์ยิ่งมีปริมาณน้อยลงจะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต โดยยิ่งมีปริมาณมากจะเป็นอันตรายต่อเพสต์มากขึ้น

การกัดกร่อนของแมกนีเซียมซัลเฟตเริ่มจากการทำปฏิกิริยาของแมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ยิบซั่มและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Mg(OH)}_2$ ) ดังสมการที่ (3.14)



ปฏิกิริยานี้ทำให้ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของสารละลายลดลงซึ่งส่งผลให้เกิดการไม่อยู่ตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) โดยจะเกิดการสลายตัวเพื่อทำให้ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) สูงขึ้นดังสมการที่ (3.15)



จะพบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) นี้จะทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) ก่อให้เกิดการสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) มากขึ้น การลดลงของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Mg(OH)}_2$ ) มาจากการที่แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Mg(OH)}_2$ ) ทำปฏิกิริยากับ  $\text{SiO}_2$  ที่อยู่ในรูปสารละลายได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต (M-S-H) ซึ่งไม่มีความสามารถในการ

เชื่อมประสาน ดังนั้นจะพบว่าแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) นี้จะก่อให้เกิดความเสียหายรุนแรงมากกว่าโซเดียมซัลเฟต ( $Na_2SO_4$ )

### 3.6 ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องมือวิจัยทางวัสดุ

#### 3.6.1. การกระจายขนาดคละของอนุภาค (Particle Size Distribution, PSD)

ปัจจุบันการวัดการกระจายขนาดคละของอนุภาคมีเทคนิคในการวิเคราะห์หลายวิธี อาทิเช่น เทคนิคการแยกขนาดด้วยตะแกรง (Sieve techniques) เทคนิคการตกตะกอน (Sedimentation techniques) เทคนิคทางไฟฟ้า (Electric Sensing techniques) เทคนิคทางแสง (Optical techniques) เป็นต้น ซึ่งเทคนิคทางแสงเป็นเทคนิคที่ได้เปรียบกว่าสามวิธีแรก เป็นเทคนิคที่สามารถวัดขนาดของอนุภาคได้อย่างรวดเร็ว ใช้ตัวอย่างทดสอบในปริมาณน้อย และผลการทดสอบในแต่ละครั้งมีค่าใกล้เคียงกันในกรณีทำซ้ำ สามารถวัดขนาดอนุภาคในช่วง 0.1 ถึง 1000 ไมครอน ( $10^6$  เมตร) จากภาพที่ 3.11 เป็นเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดคละของวัสดุอนุภาครุ่น Mastersizer-s (Malvern) ซึ่งใช้เทคนิค Laser Diffraction



ภาพที่ 3.11

เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาครุ่น Mastersizer-s (Malvern)

เทคนิคนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีข้อดีที่ใช้งานได้ง่ายใช้เวลาในการวิเคราะห์และให้ข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว ไม่เกิน 1 ถึง 2 นาที สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งที่เป็นแผ่นผงและสารแขวนลอย แยกอนุภาคได้หลายขนาด ตั้งแต่ขนาดใหญ่ในระดับมิลลิเมตรไปจนน้อยกว่า 0.1 ไมโครเมตร ตัวอย่างที่ผ่านการแยกด้วยเทคนิคนี้จะไม่ถูกทำลายสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้แต่อนุภาคที่นำมาแยกด้วยเทคนิคนี้จะต้องมีขนาดต่างกันอย่างน้อยร้อยละ 15 ถึง 20 ถึงจะสามารถแยกออกได้ และความแม่นยำนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรทางแสงของอนุภาคที่ถูกต้องรวมถึงรูปร่างที่ถูกต้อง เช่น ตัวอย่างที่มีคุณสมบัติการดูดกลืนแสงสูงจะไม่ทำให้เกิดการกระเจิง หรือตัวอย่างที่อนุภาคมีคุณสมบัติทางแสงแตกต่างกันออกไปจะทำให้การตรวจวัดยุ่งยากมากยิ่งขึ้น อนุภาคขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างซับซ้อนหรือมีรูพรุน หรืออนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลมจะให้ผลการวัดที่ไม่ถูกต้อง เป็นต้น

### 3.6.2 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

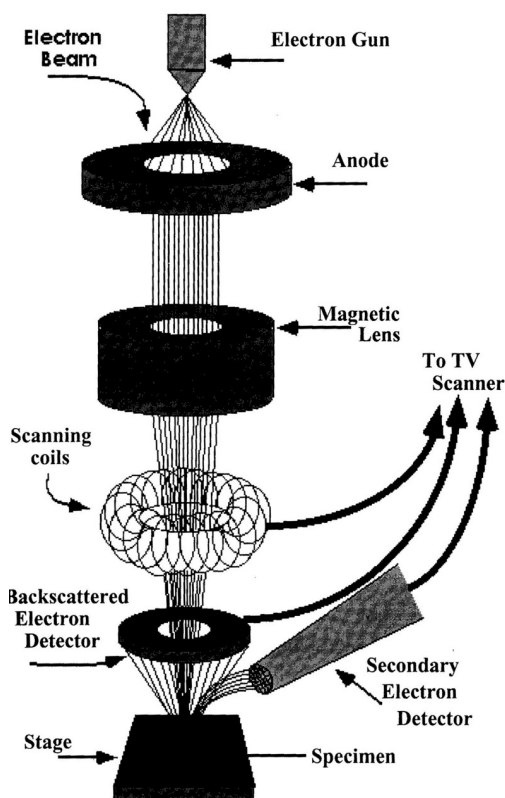
ภาพที่ 2.12 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope) คิดค้นขึ้นมาเพื่อประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุให้สามารถแจ่มแจ้งรายละเอียดของภาพได้มากขึ้นกว่าเดิม โดยการประยุกต์นำเอาอิเล็กตรอนที่มีช่วงคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงมาใช้แทนคลื่นแสงและใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาแทนเลนส์กระจก และมีตัวตรวจวัด (Detector) ที่จะมาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง จากนั้นจะมีอุปกรณ์แปลงสัญญาณปรากฏบนจอรับภาพต่อไป



ภาพที่ 3.12

เครื่อง SEM รุ่น JSM-5410 (JEOL)

ภาพที่ 3.13 แสดงหลักการทำงานของ SEM ภายในคอลัมน์ของเครื่องจะมีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนนั้นด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงๆ และใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าโฟกัสให้อิเล็กตรอนนั้นตกกระทบบนชิ้นงาน และเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบบนชิ้นงานจะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ได้สัญญาณแบบต่างๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนในชิ้นงานที่หลุดออกมา (Secondary electron) อิเล็กตรอนที่กระดอนกลับ (Backscattered electron) สัญญาณแต่ละชนิดจะถูกจับโดย Detector และแปลผลเป็นสัญญาณไฟฟ้า และแปลเป็นภาพในที่สุด



ภาพที่ 3.13

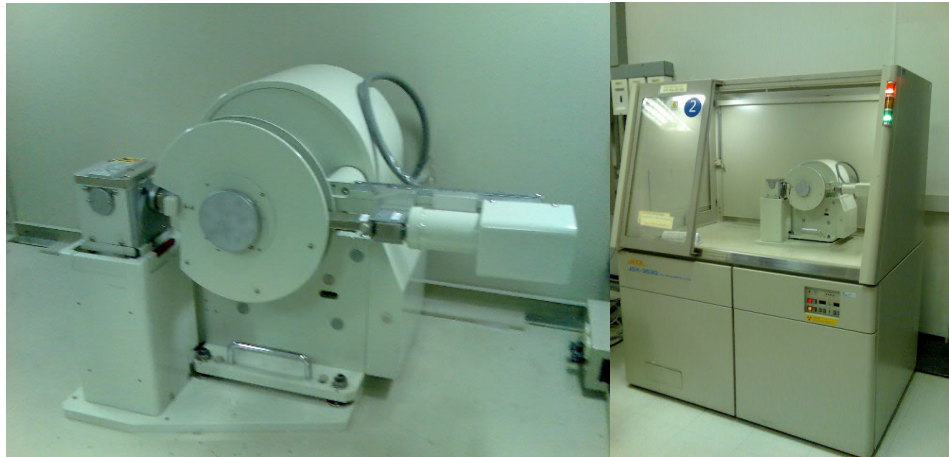
ส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของ SEM

การเตรียมตัวอย่างต้องคำนึงถึง 2 ปัจจัย คือ ชนิดของ SEM และข้อมูลที่ต้องการศึกษา สำหรับ SEM แบบที่ต้องการสภาพสุญญากาศสูง ตัวอย่างที่จะศึกษาต้องแห้งไม่มีความชื้น และไม่ปนเปื้อนสารจำพวกไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมัน เพราะเมื่อชิ้นงานอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ความชื้นหรือสารไฮโดรคาร์บอนจะแตกตัวเป็นโมเลกุลเล็กๆ ทั่วขวางเส้นทางของ

อิเล็กตรอน ทำให้ภาพที่ได้ไม่ชัดเจน อีกทั้งโมเลกุลเหล่านี้อาจไปเกาะส่วนต่าง ๆ ของกล้อง เช่น ผิวของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เป็นเหตุให้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนมีอายุการใช้งานสั้นลง หากตัวอย่างเป็นวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าต้องเคลือบผิวหน้าชิ้นงานด้วยฟิล์มที่นำไฟฟ้าบาง ๆ (ประมาณ 100 อังสตรอม) ซึ่งวัสดุที่นิยมนำมาใช้เคลือบผิวได้แก่ ทอง ทองผสมแพลทินัม และคาร์บอน การเคลือบด้วยทองหรือทองผสมแพลทินัมจะให้ภาพที่คมชัดกว่าการเคลือบด้วยคาร์บอน เราเคลือบผิวหน้าชิ้นงานเพื่อให้อิเล็กตรอนมีการไหลออกจากผิวหน้าของชิ้นงานได้มากที่สุด หากมีอิเล็กตรอนสะสมอยู่มาก อิเล็กตรอนที่สะสมจะรบกวนทั้งอิเล็กตรอนที่จะตกลงมา (Primary electron) และอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดภาพ (Secondary electron) ทำให้ไม่สามารถโฟกัสภาพและควบคุมความสว่างได้ หากไม่ต้องการเคลือบก็สามารถดูด้วย SEM ได้ โดยใช้ศักย์น้อย ๆ เพื่อจำกัดปริมาณอิเล็กตรอนให้พอเหมาะ แต่อาจจะได้ภาพที่ไม่ชัดเจนนัก

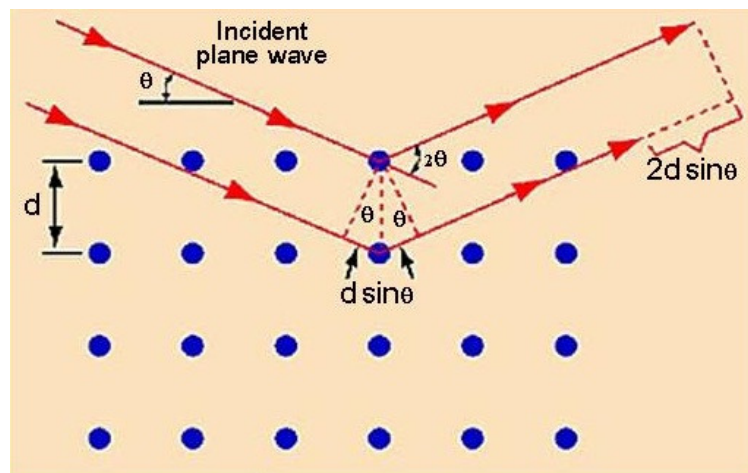
### 3.6.3 ทฤษฎีความเป็นผลึกของสารด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

ภาพที่ 3.14 แสดงเครื่องที่ใช้ทดสอบความเป็นผลึกของสารด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) มีประโยชน์ในการระบุชนิดและปริมาณผลึกของสารที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุ จากหลักการที่ว่าธาตุหรือสารประกอบมีคุณสมบัติในการแทรกสอดต่างกันทำให้สามารถระบุธาตุหรือสารประกอบนั้นได้ นอกจากนั้นสามารถพิจารณาได้ว่าผลึกประกอบด้วยชั้นหรือระนาบของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน โดยทั่วไปผลึกของวัสดุต่างๆในธรรมชาติมีโครงสร้างที่แน่นอน มีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ มีมุมและระยะห่างระหว่างอะตอมที่แน่นอนและซ้ำกันในทุกทิศทาง การจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ  $d$  ดังภาพที่ 3.15 ค่าระยะห่าง  $d$  จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึก ในปี ค.ศ.1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดว่าเมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ รังสีเอ็กซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ ความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ถูกเสนอในรูปแบบสมการที่ (3.16)



ภาพที่ 3.14

เครื่องวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD



ภาพที่ 3.15

แบบจำลองของ Bragg's Law

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.16)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น (เมตร)

$n$  คือ ลำดับของการสะท้อนมีค่าเท่ากับ 1, 2, 3...,  $n$

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ(เมตร)

$\theta$  คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา