

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ความหมายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หมายถึง ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cement) ชนิดหนึ่งซึ่งได้จากการบดปูนเม็ด (Clinker) กับแคลเซียมซัลเฟต ($\text{Ca}(\text{SO}_4)$) โดยมีคุณสมบัติที่เมื่อผสมกับน้ำ สารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้

3.2 สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารประกอบหลัก 2 กลุ่มใหญ่ คือ

3.2.1 สารประกอบหลัก ได้แก่

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยมมีสี่เทาเข้ม คุณสมบัติของ C_3S จะเหมือนกับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2 – 3 ชั่วโมง และสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะให้ความร้อน 500 จูลต่อกรัม ปริมาณของไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 35 – 55

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดยไดแคลเซียมซิลิเกตสามารถมีได้หลายรูปแบบ แต่มีเพียง $\beta\text{-C}_2\text{S}$ เท่านั้นที่สามารถคงตัวอยู่ได้ที่อุณหภูมิทั่วไป เนื่องจากเลขโคออดิเนชันของแคลเซียม (Ca^{2+}) มีลักษณะที่ผิดปกติ (Irregular) เป็นผลให้เกิดความไม่เสถียร จึงสามารถทำปฏิกิริยาได้ $\beta\text{-C}_2\text{S}$ มีคุณสมบัติในการยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อนประมาณ 250 จูลต่อกรัม จะมีการพัฒนากำลังในระยะยาว ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีไดแคลเซียมซิลิเกตอยู่ประมาณร้อยละ 15 – 35

3. ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) เป็นสารประกอบที่มีภาพร่างเป็นเหลี่ยมมุม สี่เทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ทำให้เกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม กำลังรับ

แรงอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1 – 2 วัน แต่จะมีค่าค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ในปริมาณร้อยละ 7 – 15

4. เติตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) จะทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดขึ้นประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังรับแรงอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในปริมาณร้อยละ 5 – 10

3.2.2 สารประกอบรอง

1. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfur Trioxide, SO_3) ในการผลิตปูนซีเมนต์ปูนเม็ด (Clinker) จะถูกบดรวมกับยิปซัม (Gypsum, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ หรือ CSH_2) เพื่อป้องกันการก่อตัวที่เร็วเกินไป ในทางกลับกันปริมาณของยิปซัมจะต้องมีปริมาณที่ไม่มากเกินไปเพราะจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการแตกร้าวได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมอะลูมิเนตกับยิปซัม ทำให้เกิดเอ็ทริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้น เมื่อยิปซัมผสมอยู่น้อยปฏิกิริยาระหว่าง C_3A กับยิปซัมจะเกิดเมื่อซีเมนต์เพสต์อยู่ในสภาพที่เป็นพลาสติก การขยายตัวของปริมาตรเกิดก่อนที่ซีเมนต์เพสต์จะแข็งตัว แต่เมื่อยิปซัมผสมอยู่ในปริมาณที่มากปฏิกิริยาจะเกิดต่อเนื่องไปหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้ว และอาจทำให้เกิดการแตกร้าวได้

2. ปูนขาวอิสระ (Free Lime, CaO) จะเกิดขึ้นเนื่องจากวัตถุดิบที่มีปูนขาวมากเกินไปสำหรับการทำปฏิกิริยากับ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อะลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al_2O_3) และไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) ในเตาเผา ปูนขาวอิสระสามารถรวมตัวกับน้ำ ซึ่งการรวมตัวดังกล่าวหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้ว ผลที่ได้คือปริมาตรที่เพิ่มขึ้น ถ้าปูนขาวอิสระมีปริมาณมากพออาจทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ก่อตัวแล้วขยายตัวและแตกร้าวได้

3. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โดยวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่ จะมี $MgCO_3$ ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้ MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมตัวเป็นปูนเม็ด ที่เหลือจะอยู่ในภาพของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเหมือนกัน CaO คือมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดความไม่อยู่ตัว (Unsoundness)

4. ออกไซด์ของอัลคาไลด์ (Alkali Oxide, K_2O และ Na_2O) ออกไซด์ของอัลคาไลด์ จะมีบทบาทสำคัญเมื่อวัสดุผสม (Aggregate) สามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลด์ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า “ปฏิกิริยาอัลคาไลด์มวลรวม” ซึ่งจะก่อให้เกิดการขยายตัวและอาจทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้

5. ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (Phosphorous Pentoxide, P_2O_5) ส่วนมากมาจากหินปูน สารนี้ทำให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวช้า เนื่องจาก P_2O_5 ทำให้ C_3S สลายตัวเป็น C_2S กับ CaO

3.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

3.3.1 ปฏิกิริยาของสารประกอบ

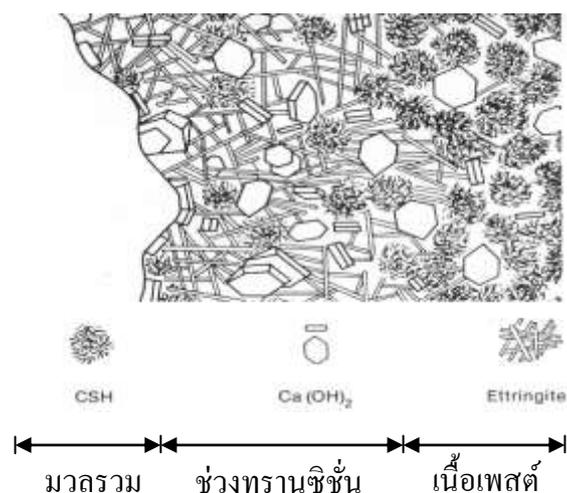
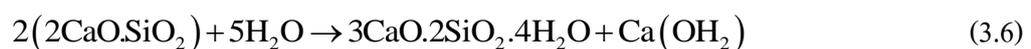
ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า “ปฏิกิริยาไฮเดรชัน” ซึ่งจะให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบนี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำสามารถเริ่มต้นด้วยปฏิกิริยาของแต่ละสารประกอบในปูนซีเมนต์

1. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S, C_2S)

แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $C-S-H$) ดังสมการที่ (3.5) และ (3.6) โดยมีลักษณะดังภาพที่ 3.1



และ

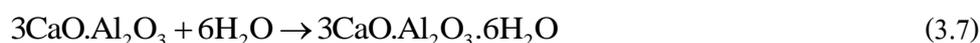


ภาพที่ 3.1 ปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S, C_2S)

จากภาพจะเห็นได้ว่า C-S-H จะอยู่ในภาพของอนุภาคเล็กๆ มีขนาดเท่ากับสารแขวนลอย (เล็กกว่า 1 μm) มีลักษณะปรากฏเป็นอสัณฐาน (Amorphous) และมีผลึกที่หยาบมาก (Poorly Crystalline) โดยอัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลิเกต (C/S) ใน C-S-H ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิและปริมาณน้ำ สัญลักษณ์ทางเคมีของไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีอัตราส่วน $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ เป็นเพียงค่าเฉลี่ยเท่านั้น

2. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตและยิปซัม

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) จะเกิดขึ้นที่ทันที และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการที่ (3.7)



เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยาเกิดอย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างขบวนการบดปูนเม็ด ยิปซัมจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับก่อให้เกิดชั้นของเอ็ททริงไคต์ (Ettringite) ในภาพที่ 3.2 บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการที่ (3.8)



ชั้นของเอ็ททริงไคต์ (Ettringite) ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต ($\text{C}_3\text{S}, \text{C}_2\text{S}$)



ภาพที่ 3.2 ลักษณะของเอ็ททริงไคต์ (Ettringite) มีภาพทรงอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเข็มผลึก

3. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียม อะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาของ C_4AF คล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน C_3A แต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าและมีความร้อนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยานี้น้อยกว่า ยิบซั่มจะหน่วงปฏิกิริยาของ C_4AF มากกว่าที่หน่วงใน C_3A ปฏิกิริยาระหว่าง C_4AF และ ยิบซั่มจะทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Calcium Sulfoaluminate) และแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์ (Calcium Sulfoferrite) ดังสมการที่ (3.9)



3.3.2 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยปฏิกิริยาเคมีของแต่องค์ประกอบ แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) และน้ำที่ต่อเนื่องกัน โดยปกติสารประกอบที่เข้าทำปฏิกิริยาได้แก่ เฮไลต์ (ไตรแคลเซียมซลิเกตซึ่งโครงสร้างถูกแทนที่ไอออนอื่น) เบไลต์ (ไดแคลเซียมซลิเกตซึ่งโครงสร้างถูกแทนที่ไอออนอื่น) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต แคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ แคลเซียมออกไซด์อิสระ ซัลเฟตของอัลคาไลด์ แคลเซียมซัลเฟต และน้ำ

ปฏิกิริยาของเพสต์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อุณหภูมิแวดล้อมจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอน พบว่าจะมีลักษณะที่คล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในไตรแคลเซียมซลิเกต ดังต่อไปนี้

1. ระยะ Pre-induction (นาทีแรก)

โดยเมื่อปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำจะมีการแตกตัวอย่างรวดเร็วของไอออนบางชนิดไปยังสถานะของของเหลวและมีการฟอร์มตัวของไฮเดรต ซัลเฟตของอัลคาไลด์จะแตกตัวอย่างสมบูรณ์ภายในไม่กี่วินาทีทำให้ในสารละลายมีทั้งไอออนของโพแทสเซียม (K^+) โซเดียม (Na^+) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ในขณะที่แคลเซียมซัลเฟตก็มีการแตกตัวจนกระทั่งอิ่มตัวด้วยไอออนแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) เช่นเดียวกัน

ไตรแคลเซียมซลิเกตจะมีการแตกตัวอย่างต่อเนื่องและจะมีชั้นของแคลเซียมซลิเกตไฮเดรตเกิดขึ้นบนผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (CaO/SiO_2) ของผลิตภัณฑ์ไฮเดรตนี้จะมีค่าต่ำกว่าในไตรแคลเซียมซลิเกตซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สภาวะนี้จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในขณะที่ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตจะแตกตัวและทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอ็ททริงไกท์ (Ettringite) ซึ่งปริมาณของไตร

แคลเซียมอะลูมิเนตที่ทำปฏิกิริยาจะต่างกันตามชนิดของปูนซีเมนต์ เช่นเดียวกับเฟอร์ไรต์ที่ให้ผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกัน ส่วนเบต้าไคแคลเซียมซัลเฟต ($\beta\text{-C}_2\text{S}$) จะให้แคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต

2. ระยะ Induction หรือ ระยะดอร์แมนท์ (Dormant) (ในช่วงโมงแรก)

หลังจากช่วงสั้นๆของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ผ่านไปอย่างรวดเร็ว อัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยรวมจะลดลงในช่วงช่วงโมงแรก เหตุผลที่ปฏิกิริยาตกลงอันเนื่องมาจากความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในของเหลวที่เริ่มเข้าสู่จุดสูงสุดและกำลังจะลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) อยู่ในระดับที่คงที่ตามสัดส่วนที่ใช้ในการเกิดของเอ็ททริงไกท์ (Ettringite)

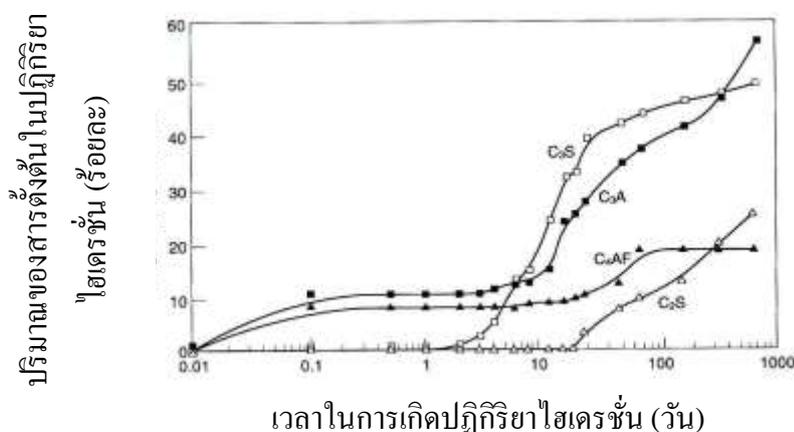
3. ระยะเร่ง (Acceleration Stage) (3 – 12 ชั่วโมงหลังการผสม)

ในช่วงนี้จะมีการพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้นอีกครั้งและจะถูกควบคุมโดยการเกิดและพัฒนาโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเริ่มตกผลึกทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ลดลง ในขณะที่แคลเซียมซัลเฟตจะกลับมาแตกตัวอย่างสมบูรณ์แต่ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) จะลดลงเนื่องจากการฟอร์มตัวของเอ็ททริงไกท์

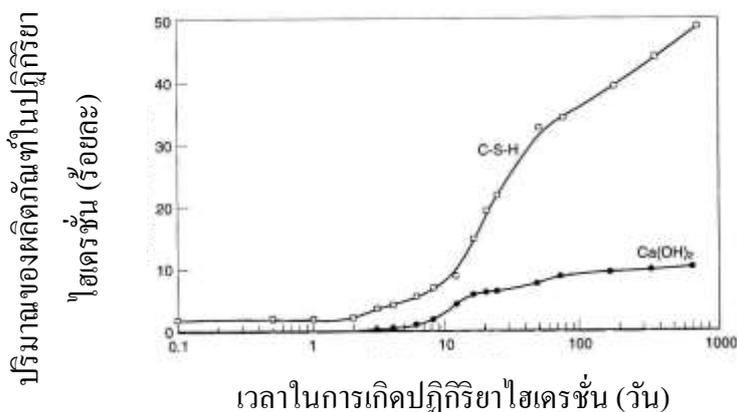
4. ระยะหลังการเร่ง (Post – Acceleration Period)

ในระยะนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงตามปริมาณของสารตั้งต้นของปฏิกิริยาที่ลดลง ในขณะที่แคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต (C-S-H) จะมีการฟอร์มตัวอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่อเนื่องของไตรแคลเซียมซัลเฟตและเบต้าไคแคลเซียมซัลเฟต และเมื่อแคลเซียมซัลเฟตใช้หมดไปจะทำให้ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ลดลง ตามาคด้วยเอ็ททริงไกท์จะฟอร์มตัวขึ้นจะเริ่มทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และไคแคลเซียมซึ่งมีโมเลกุลของอะลูมิเนียมและ/หรือเฟอร์ไรต์ได้โมโนซัลเฟต

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงได้ในภาพที่ 3.3 และ 3.4



ภาพที่ 3.3 การพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันในแต่ละสารประกอบหลัก



ภาพที่ 3.4 การเกิดไฮดรต

3.4 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

3.4.1 ความหมายของสารปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Material) ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า วัสดุที่มีส่วนประกอบเป็นซิลิกอน (Siliceous) หรือมีทั้งซิลิกอนและอะลูมินา (Siliceous and Alumineous) ซึ่งที่อุณหภูมิจะไม่ทำปฏิกิริยาแต่เมื่อทำการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ได้

3.4.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของสารปอซโซลาน

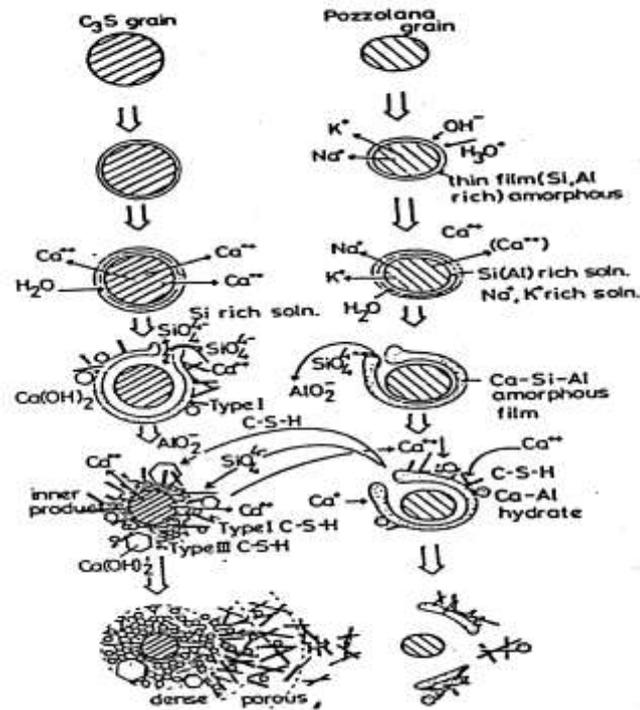
ปฏิกิริยาปอซโซลานิกคือ ปฏิกิริยาของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และ/หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการไฮดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต โดยที่ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกอนไดออกไซด์ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต ในขณะที่ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของอะลูมิเนียมออกไซด์ ได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต ($\text{C}_3\text{A}_2\text{H}_3$) ดังสมการที่ (3.10) และ (3.11)





3.4.3 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีสารปอชโซลาน

จากภาพที่ 3.5 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในระบบซึ่งมีทั้งไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และสารปอชโซลานเริ่มขึ้นจากไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) จะละลายออกจากสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) อย่างอิสระลงไปในช่วงเวลา แต่ไอออนดังกล่าวจะถูกดักจับด้วยอนุภาคที่มีประจุลบจากสารปอชโซลาน โดยอาศัยการชนกันและถูกดูดซับที่ไว้ที่ผิวของอนุภาคปอชโซลาน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะเกิดการตกตะกอนที่อัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ (CaO/SiO_2) สูง ในขณะที่บนผิวของสารปอชโซลานจะเกิดขึ้นเช่นเดียวกันแต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ต่ำและมีความพรุนสูง โดยปกติเมื่ออนุภาคปอชโซลานสัมผัสกับน้ำผิวของสารปอชโซลานจะมีคุณสมบัติเป็นประจุบวกอันเนื่องมาจากการดึงดูดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำไว้และจะทำให้มีการแตกตัวของไฮเดียมไอออน (Na^+) และโพแทสเซียมไอออน (K^+) และไอออนอื่นๆ ที่ละลายตามมาเป็นผลให้เกิดชั้นที่ผิวของอนุภาคปอชโซลานซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิกอนและ/หรืออะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ การละลายของไฮเดียมไอออนและโพแทสเซียมไอออนจะช่วยเร่งการแตกตัวของน้ำให้มีปริมาณของไฮโดร-เนียมไอออนเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเร่งการแตกตัวของซิลิเกตไอออน (SiO_4^{4-}) และอะลูมิเนียมไอออน (AlO_2^-) ด้วยและเมื่อรวมกับผลของแคลเซียมไอออนจึงทำให้ความหนาของชั้นบนอนุภาคปอชโซ-ลานเพิ่มขึ้นและแตกออกในที่สุด



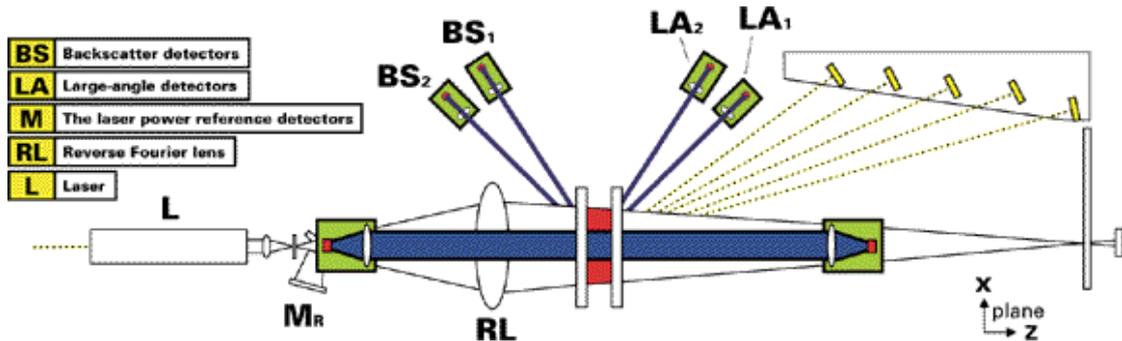
ภาพที่ 3.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลานิก

3.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับคุณสมบัติที่ทำการทดสอบ

3.5.1 การกระจายขนาดผลึกของอนุภาค (Particle Size Distribution)

การกระจายขนาดผลึกของอนุภาคเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในสถานะสดและแข็งตัวแล้ว โดยมีเทคนิคในการทดสอบการกระจายขนาดผลึกหลายวิธีอาทิเช่น วิธีการร่อน (Sieve) วิธีการตกตะกอน (Sedimentation Method) และการแทรกสอดของเลเซอร์ (Laser Diffraction Method) เป็นต้น ซึ่งในวิธีการแทรกสอดของเลเซอร์จะมีข้อได้เปรียบกว่าสองวิธีแรกหลายกล่าวคือ จำนวนตัวอย่างน้อยและทดสอบได้เร็ว ความแม่นยำสูง แต่ก็มีข้อจำกัดข้อหนึ่งคือ ค่าใช้จ่ายสูงตั้งแต่เครื่องมือดังแสดงในภาพที่ 3.6 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง ระบบการตรวจวัด ระบบการกระจายอนุภาคตลอดจนกระจกและโปรแกรมในการวิเคราะห์ นอกจากนี้จะมีการเตรียมตัวอย่าง และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ เป็นต้น

สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะใช้ทฤษฎีทรงกลมเทียบเท่า (Equivalent Sphere Theory) ซึ่งมีหลักการที่การเปลี่ยนปริมาตรของรูปทรงต่างๆ (โดยปกติจะบอกขนาดด้วยมิติกว้าง ยาว และ สูง) ให้มีปริมาตรเทียบเท่ากับทรงกลมแล้วแสดงขนาดในรูปของจำนวนเดียว (Unique Number) ซึ่งก็คือ รัศมีหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม



ภาพที่ 3.6 เครื่อง Laser Particle Size Analyzer

3.5.2 ทฤษฎีความเป็นผลึกของสาร

การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray มีประโยชน์ในการระบุชนิดและปริมาณของเป็นผลึกของสารที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุ โดยจากหลักการที่ว่าธาตุหรือสารประกอบจะมีคุณสมบัติในการแทรกสอดต่างกันทำให้สามารถระบุธาตุหรือสารประกอบนั้นได้ นอกจากนั้นสามารถพิจารณาได้ว่าผลึกประกอบด้วยชั้นหรือระนาบของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขว่าลำคลื่นที่ตกกระทบจะต้องมีความเข้มสูงและความแตกต่างของระยะเดินทาง (Path Difference) ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียงกันมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังแสดงในภาพที่ 3.7 และสมการที่ (3.12)

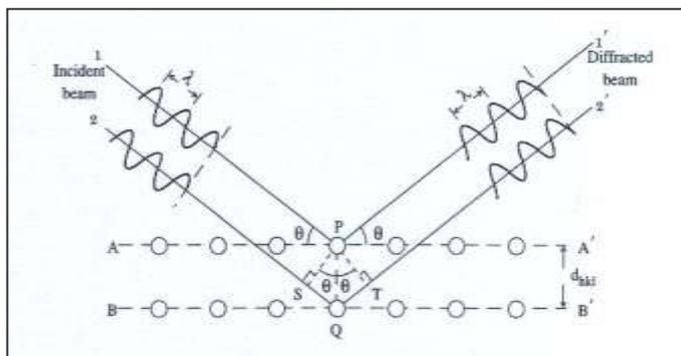
$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (3.12)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น (เมตร)

n คือ ลำดับของการสะท้อนซึ่งมีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, ..., n

d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ (เมตร)

θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา



ภาพที่ 3.7 แบบจำลองสำหรับการแทรกสอดของคลื่นตามสมการ $2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$

3.5.3 คุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพสด

3.5.3.1 ค่าการยุบตัว (Slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss)

ความสามารถในการทำงานได้ (Workability) คือ คุณสมบัติของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ในสถานะสด (Fresh State) ซึ่งคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันตั้งแต่การผสม เทเข้าแบบ การยุบตัวและการตบแต่ง (ACI 116R-90) โดยสามารถทดสอบได้หลายวิธี แต่วิธีและง่ายในทางปฏิบัติคือ การทดสอบค่าการยุบตัว (Slump) และปัจจัยที่มีผลต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีต (สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2542) ประกอบด้วย

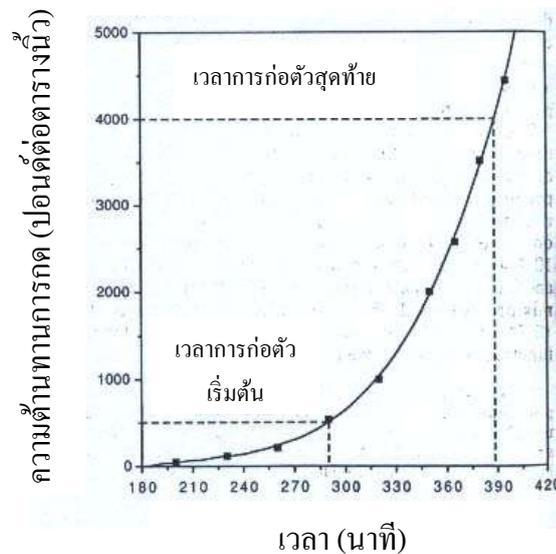
1. อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) โดยคอนกรีตที่มีปริมาณเพสต์มากหรือค่า γ สูงจะมีค่าการยุบตัวมากกว่า γ ต่ำ
2. พื้นที่ผิวทั้งหมดของมวลรวม ซึ่งคอนกรีตที่มีพื้นที่ผิวทั้งหมดของมวลรวมมากจะมีความสามารถในการเทได้น้อยกว่าคอนกรีตที่มีพื้นที่ผิวทั้งหมดของมวลรวมน้อย ทั้งนี้เพราะการที่มีพื้นที่ผิวทั้งหมดของมวลรวมมากจะทำให้แรงเสียดทานระหว่างผิวอนุภาคมากขึ้น
3. พื้นที่ผิวทั้งหมดของปูนซีเมนต์และ/หรือสารปอซโซลาน โดยมีผลกระทบเช่นเดียวกับมวลรวม นอกจากนั้นอนุภาคดังกล่าวจะมีความสามารถในการกักเก็บน้ำอิสระได้ซึ่งจะเป็นผลให้ความสามารถในการเทได้ลดลง

4. ปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) โดยปกติน้ำคอนกรีตจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ น้ำที่ถูกกักเก็บในอนุภาคซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่และน้ำอิสระ คอนกรีตจะมีค่าการยุบตัวมากจะต้องมีน้ำอิสระมาก

สำหรับการสูญเสียค่าการยุบตัว คือ การสูญเสียความชื้นเหลวของคอนกรีตสดเมื่อเวลาไป การสูญเสียค่าการยุบตัวเนื่องจากผลของการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ การสูญเสียน้ำอิสระ (Free Water) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากการดูดซึมของมวลรวมและการระเหย ดังนั้นเมื่อคอนกรีตถูกผสมขึ้นมาแล้ว ควรรีบลำเลียง เท และแต่งผิวให้ทันกับเวลาที่คอนกรีตยังสามารถทำงานได้เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียค่าการยุบตัว โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียค่าการยุบตัวคือ อุณหภูมิ ปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) หรืออัลคาไลน์สูงในปูนซีเมนต์ และสารผสมเพิ่ม

3.5.3.2 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

การก่อตัว (Setting) และการแข็งตัว (Hardening) ของคอนกรีตเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ของคอนกรีตตามนิยามของมาตรฐาน ASTM 403-99 (Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixture by Penetration Resistance) ได้กำหนดด้วยค่าความต้านทานการกด (Penetration Resistance) ของมอร์-ตาร์ทที่ได้จากการร่อนคอนกรีตผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เพื่อคัดแยกมวลรวมหยาบ (หิน) ออกเป็น 2 ช่วงคือ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) คือระยะเวลาที่แรงต้านทานต่อพื้นที่เท่ากับ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และ 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3.8 โดยค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ชนิดของปูนซีเมนต์ อุณหภูมิ และน้ำยาผสมคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัว



ภาพที่ 3.8 ระยะเวลาการกวดตัวของตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM 403-99

3.5.4 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

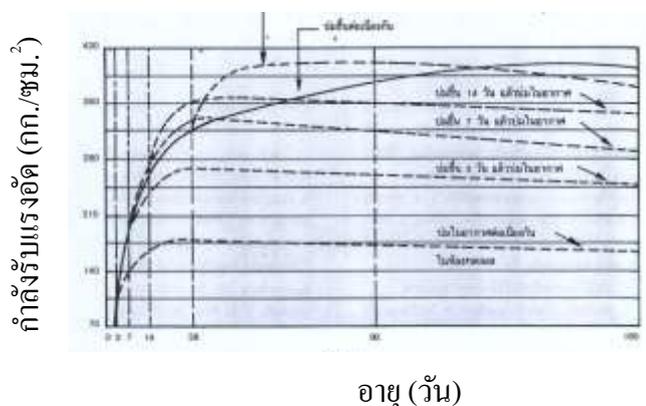
3.5.4.1 กำลังรับแรงของคอนกรีต

กำลังรับแรงเป็นคุณสมบัติของคอนกรีตในสถานะแข็งตัวแล้ว (Hardened State) หมายถึง คอนกรีตที่พัฒนาการของกำลังรับน้ำหนักได้เต็มที่ตามที่ออกแบบไว้ โดยทั่วไปคือ คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เป็นต้นไป คอนกรีตในสถานะแข็งตัวแล้วต้องมีกำลังที่ดี โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการคือ

1. กำลังของมอร์ตาร์ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชัน
2. กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวมซึ่งโดยทั่วไปกำลังของมวลรวมจะมากกว่ามอร์ตาร์หลายเท่า ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของมวลรวมลงในส่วนผสมจะเป็นการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต
3. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตาร์กับผิวของมวลรวม โดยแรงยึดเหนี่ยวนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพเช่น รูปร่าง ลักษณะผิวของมวลรวม และปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับแร่ธาตุในเนื้อมวลรวม

ในทางปฏิบัติปัจจัยที่ผลต่อกำลังของคอนกรีตจะมีตั้งแต่ คุณสมบัติของวัสดุผสม การทำคอนกรีต และการบ่มคอนกรีต กล่าวคือ

1. คุณสมบัติของวัสดุผสมซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ มวลรวม และน้ำที่จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดจึงจะได้คอนกรีตที่มีคุณภาพ
2. การทำคอนกรีตตั้งแต่การชั่งส่วนผสม การผสมคอนกรีตและการเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อ และการอัดแน่น
3. การบ่มคอนกรีต ซึ่งเป็นที่ทราบดีว่าความชื้นมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต้องการน้ำอย่างต่อเนื่อง นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบ่ม สำหรับการพัฒนากำลังของคอนกรีตแสดงในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 การพัฒนากำลังของคอนกรีตที่อายุต่าง

3.5.4.2 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

โมดูลัสยืดหยุ่นเป็นคุณสมบัติยืดหยุ่นของคอนกรีตมีความสำคัญต่อการเสีรูปของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักกระทำ ทั้งนี้เพราะคอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่มีการยืดหยุ่นเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ดังนั้นการเสีรูปอย่างถาวรอาจเกิดขึ้นได้ภายใต้น้ำหนักกระทำ โดยปกติจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังรับแรงอัดและขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสและปริมาณของมวลรวมในคอนกรีต จากการทดสอบพบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต โดยแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.13) ดังต่อไปนี้

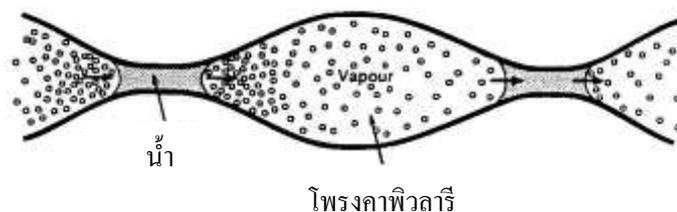
$$E_c = W_c^{1.5} 33\sqrt{f'_c} \quad \text{หน่วย ปอนด์ต่อตารางนิ้ว} \quad (3.13)$$

โดยที่ W_c คือ ให้น้ำหนักของคอนกรีต (ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)
 ซึ่งมีค่าระหว่าง 90 ถึง 155 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต
 f_c' คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)

3.5.5 คุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีต

3.5.5.1 การหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งเป็นการหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียน้ำของซีเมนต์เพสต์ไปสู่บรรยากาศที่มีสถานะความชื้นต่ำ ซึ่งเกิดจากการสูญเสียน้ำทั้งจากโพรงคาพิลลารี (Capillary Pore) และโพรงเจล (Gel Pore) ในซีเมนต์เพสต์ดังแสดงในภาพที่ 3.10 ให้กับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากความแตกต่างกันของความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างคอนกรีตและสิ่งแวดล้อมเพื่อทำให้ระบบอยู่ในภาวะสมดุล ซึ่งความชื้นที่สูญเสียน้ำไปไม่สามารถกลับคืนมาได้ (Irreversible Process) โดยที่ปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ที่หดตัวจะมีค่าไม่เท่ากับปริมาตรของน้ำที่สูญเสียน้ำไป อันเนื่องจากการยึดรั้งของโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต



ภาพที่ 3.10 การสูญเสียน้ำผ่านทางโพรงคาพิลลารีและเจล

3.5.5.2 การกระทำเนื่องจากซัลเฟต

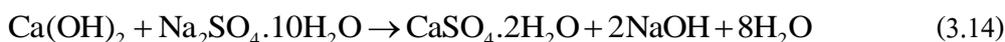
สถานะแวดล้อมที่มีซัลเฟตจะมีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต โดยทั่วไปซัลเฟตจะพบในรูปของโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ซึ่งเมื่อเกลือซัลเฟตมีความเข้มข้นมากกว่า 1000 ส่วนในล้านส่วน (ppm) จะทำให้คอนกรีตเกิดความเสียหาย โดยซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับทุกๆ

ผลิต-ภัณฑ์ของซีเมนต์เพสต์อันจะก่อให้เกิดการขยายตัว (Expansion) การแตกร้าว (Crack) และการหลุดร่อน (Spalling) ในระยะยาว

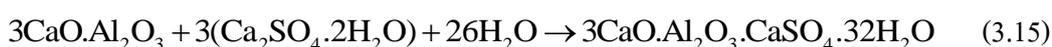
ปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และซีเมนต์เพสต์เป็นปฏิกิริยาที่มีความซับซ้อนและขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเช่น ความเข้มข้นของซัลเฟต ไอออน อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม ชนิดและสัดส่วนของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง และเวลาในการบ่ม เป็นต้น และเป็นปฏิกิริยาที่ขึ้นอยู่กับเวลาเพราะการแพร่กระจายของซัลเฟต ไอออนมีอัตราค่อนข้างช้า ผลิต-ภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจะทำให้เกิดเอ็ททริงไกต์ (AFt-phase) ที่มีคุณสมบัติในขยายตัวมาก

สำหรับปฏิกิริยาของโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) กับซีเมนต์เพสต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

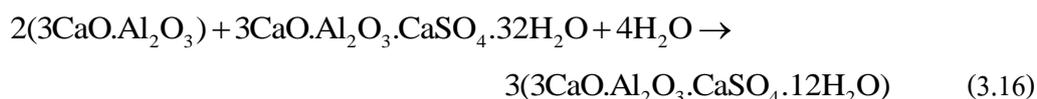
1. การเกิดยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โดยโซเดียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เกิดผลิต-ภัณฑ์เป็นยิปซัม ดังแสดงในสมการที่ (3.14)



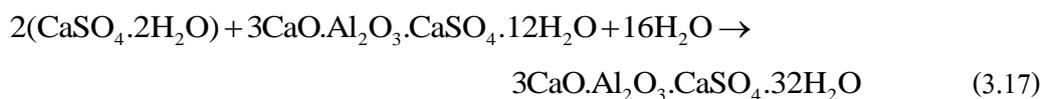
2. การเกิดเอ็ททริงไกต์ (AFt-phase) ซึ่งยิปซัมที่ได้จากปฏิกิริยาในสมการที่ (3.14) จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) เกิดเอ็ททริงไกต์ผลิต-ภัณฑ์ ดังแสดงในสมการที่ (3.15)



3. การเกิดโมโนซัลโฟอะลูมิเนต โดยเมื่อไตรแคลเซียมอะลูมิเนตทำปฏิกิริยากับซัลเฟตจะทำให้ปริมาณซัลเฟตในเพสต์ลดลง ส่งผลให้เอ็ททริงไกต์เปลี่ยนรูปไปอยู่ในสถานะกึ่งเสถียรที่เรียกว่า โมโนซัลโฟอะลูมิเนต (AFm-phase) ดังแสดงในสมการที่ (3.16)



4. การเกิดเอ็ททริงไกต์ซ้ำ (AFt-phase) เมื่อปริมาณซัลเฟตเพิ่มขึ้น โมโนซัลโฟอะลูมิเนตจะเปลี่ยนรูปไปเป็นเอ็ททริงไกต์ซ้ำ ดังแสดงในสมการที่ (3.17)



ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำลายโดยซัลเฟตมีดังต่อไปนี้

1. ปริมาณของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ในปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะยิ่งปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) น้อยจะมีความต้านทานต่อการกระทำเนื่องจากซัลเฟตได้กว่าปูนซีเมนต์ที่มีไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) มาก
2. ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในเพสต์ ที่ยังมีปริมาณน้อยลงจะเพิ่มความต้านทานต่อการทำลายจากซัลเฟต
3. ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต โดยยิ่งปริมาณมากจะเป็นอันตรายต่อเพสต์มากขึ้น

3.5.5.3 การกระทำเนื่องจากกรด

ในหลายๆ กิจกรรมของมนุษย์จะมีกรดเกิดขึ้นและกรดสามารถกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีต โดยทั่วไปกรดจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. กรดอินทรีย์ (Organic Acid) ซึ่งมาจากกิจกรรมทางการเกษตรและมีการย่อยทิ้งเป็นไอซ์และไม่ใช่ออกซิเจน อาทิเช่น กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดฟอร์มิก (HCOOH) เป็นต้น โดยปกติกรดประเภทนี้จะมีความสามารถในการละลายต่ำและสามารถแบ่งกรดออกเป็น 3 กลุ่มตามความสามารถในการละลายของเกลือแคลเซียมในกรดอินทรีย์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1

การแบ่งกลุ่มความสามารถในการละลายของเกลือแคลเซียมในกรดอินทรีย์
(หน่วยเป็นกรัมในน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

กลุ่ม	ชื่อกรด	ความสามารถในการละลายของเกลือแคลเซียม (Ca^{2+})
1. ละลายได้สูง	1. CH_3COOH (Acetic Acid)	52.0
	2. HCOOH (Formic Acid)	16.1
	3. $\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$ (Lactic Acid)	10.5

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

การแบ่งกลุ่มความสามารถในการละลายของเกลือแคลเซียมในกรดอินทรีย์
(หน่วยเป็นกรัมในน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส)

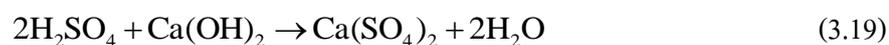
กลุ่ม	ชื่อกรด	ความสามารถในการละลาย ของเกลือแคลเซียม (Ca ²⁺)
2. ละลายได้ ปานกลาง	1. (CH ₂) ₂ COH(COOH) ₃ (Cetric Acid)	0.085
	2. (CH ₂) ₂ (OH) ₂ (COOH) ₂ (Tartanic Acid)	0.037
3. ละลายได้ น้อย	1. (COOH) ₂ (Oxalic Acid)	0.00067

โดยกรดที่นำมาทดสอบกับคอนกรีตผสมผงปูนทรายใส่แบบเป็นกรดอะซิติก (CH₃COOH) ที่จัดอยู่ในกลุ่มที่ละลายน้ำสูง และสามารถทำให้คอนกรีตสลายตัวได้หลังจาก 2 เดือน ปฏิริยาของกรดดังกล่าวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) (โดยปกติกรดจะทำปฏิริยากับสารประกอบแคลเซียมที่มีในคอนกรีตทั้งหมด แต่เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีความไวในการปฏิริยาและอยู่สถานะที่ละลายในรูปของไอออนจึงนำมาพิจารณาก่อน เมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้ในการทำปฏิริยาหมดจึงจะละลายสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตออกมา) แสดงในสมการที่ (3.18) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือแคลเซียมซิลิเกต (Ca(CH₃COO)₂) ที่มีความสามารถในการละลายได้สูงมากทำให้บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตที่สัมผัสกับกรดมีการชะล้างออกไปและทำให้กรดสามารถกระทำต่อผิวใหม่ได้ต่อไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและการละลายของผลิตภัณฑ์



2. กรดอนินทรีย์ (Inorganic Acid) ที่ได้จากกระบวนการทางอุตสาหกรรม โดยกรดที่นำมาศึกษาคือ กรดซัลฟูริก (H₂SO₄) ซึ่งปกติจะเกิดในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม ปฏิริยาของกรดซัลฟูริกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) แสดงสมการที่ (3.19) โดยมีการทำปฏิริยาใน 2 อย่างคือ ไฮโดรเจนไอออน (H⁺) จะทำปฏิริยากับไฮดรอกไซด์ (OH⁻) ที่ละลายอยู่ในโพรงคาพิวลารี ในขณะที่ไอออนของซัลเฟต (SO₄²⁻) จะทำปฏิริยากับแคลเซียมไอออน (Ca²⁺) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และเมื่อปรากฏไอออน

ของอะลูมิเนียม (Al^{3+}) จะทำให้แคลเซียมซัลเฟตทำปฏิกิริยาต่อเนื่องเกิดเป็นเอ็ททริงไกท์ ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$) ดังสมการที่ (3.8) ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น



ตารางที่ 3.2

การแบ่งกลุ่มความสามารถในการละลายของเกลือแคลเซียมในกรดอินทรีย์
(หน่วยเป็นกรัมในน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส)

กลุ่ม	ชื่อกรด	ความสามารถในการละลาย ของเกลือแคลเซียม (Ca^{2+})
1. ละลายได้สูง	1. HCl (Hydrochloric Acid)	73.9
	2. HNO ₃ (Nitric Acid)	127.0
2. ละลายได้ปานกลาง	1. H ₂ SO ₄ (Sulfuric Acid)	0.256
3. ละลายได้น้อย	1. HF (Hydrogensulfide Acid)	0.00067