

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 และจะสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงสัปดาห์แรก 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. เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (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) เพื่อป้องกันการก่อตัวที่เร็วเกินไปในทางกลับกันปริมาณของยิปซัมจะต้องมีปริมาณที่ไม่มากเกินไปเพราะจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการแตกร้าวได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมอะลูมิเนตกับยิปซัม ทำให้เกิดเอทริงไกต์ (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 ที่เหลือจะอยู่ในสภาพของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเหมือนกับ 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

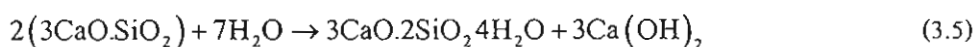
3.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

3.3.1 ปฏิกิริยาของสารประกอบ

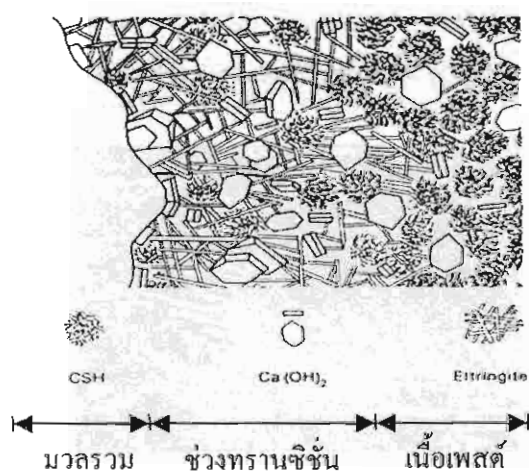
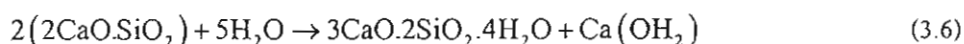
ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า “ปฏิกิริยาไฮเดรชัน” ซึ่งจะให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบนี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำสามารถเริ่มต้นด้วยปฏิกิริยาของแต่ละสารประกอบในปูนซีเมนต์

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

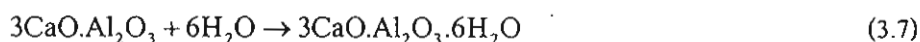


ภาพที่ 3.1 ปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S, C_2S)

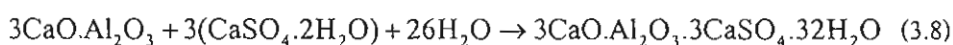
จากภาพจะเห็นได้ว่า C-S-H จะอยู่ในสภาพของอนุภาคเล็กๆ มีขนาดเท่ากับสารแขวนลอย (เล็กกว่า $1\text{ }\mu\text{m}$) มีลักษณะปรากฏเป็นอสัณฐาน (Amorphous) และมีผลึกที่หยาบมาก (Poorly Crystalline) โดยอัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลิกेट (C/S) ใน C-S-H ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิและปริมาณน้ำ สัญลักษณ์ทางเคมีของไตรแคลเซียมซิลิกेटไฮเดรตที่มีอัตราส่วน $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ เป็นเพียงค่าเฉลี่ยเท่านั้น

2. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตและยิปซัม

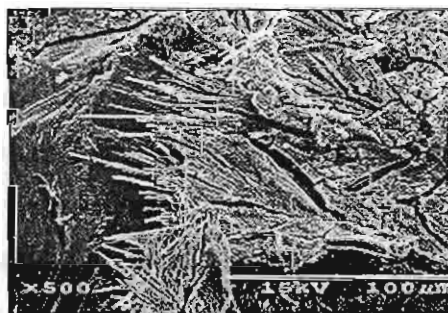
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการที่ (3.7)



เพื่อหน่วงไม่ให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างขบวนการบดปูนเม็ด ยิปซัมจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับก่อให้เกิดชั้นของเอ็ททริงไกต์ (Ettringite) ในภาพที่ 3.2 บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการที่ (3.8)



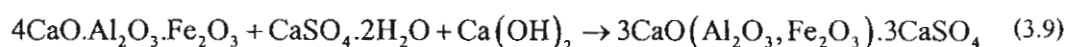
ชั้นของเอ็ททริงไกต์ (Ettringite) ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิกेट ($\text{C}_3\text{S}, \text{C}_2\text{S}$)



ภาพที่ 3.2 ลักษณะของเอ็ททริงไกต์ (Ettringite) มีภาพทรงอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเข็มผลึก

3. ปฏิกริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียม อะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาของ C_4AF คล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน C_3A แต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าและมีความร้อนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาที่น้อยกว่า ยิบซัมจะหน่วงปฏิกิริยาของ C_4AF มากกว่าที่หน่วงใน C_3A ปฏิกิริยาระหว่าง C_4AF และ ยิบซัมจะทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอะลูมินेट (Calcium Sulfoaluminate) และแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์ (Calcium Sulfoferrite) ดังสมการที่ (3.9)



3.3.2 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยปฏิกิริยาเคมีของเตตระแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) และน้ำที่ต่อเนื่องกัน โดยปฏิกิริยาประกอบที่เข้าทำปฏิกิริยาได้แก่ เอไลต์ (ไตรแคลเซียมซิลิเกตซึ่งโครงสร้างถูกแทนที่ออลอนอื่น) เบไลต์ (ไดแคลเซียมซิลิเกตซึ่งโครงสร้างถูกแทนที่ออลอนอื่น) ไตรแคลเซียมอะลูมินेट แคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ แคลเซียมออกไซด์อิสระ ซัลเฟตของอัลคาไลด์ แคลเซียมซัลเฟต และน้ำ

ปฏิกิริยาของเฟสในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อุณหภูมิแวดล้อมจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอน พบว่าจะมีลักษณะที่คล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในไตรแคลเซียมซิลิเกต ดังต่อไปนี้

1. ระยะ Pre-induction (นาที่แรก)

โดยเมื่อปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำจะมีการแตกตัวอย่างรวดเร็วของออลอนบางชนิดไปยังสถานะของของเหลวและมีการฟอร์มตัวของไฮเดรต ซัลเฟตของอัลคาไลด์จะแตกตัวอย่างสมบูรณ์ภายในไม่กี่วินาทีทำให้ในสารละลายมีทั้งออลอนของโพแทสเซียม (K^+) โซเดียม (Na^+) และซัลเฟตออลอน (SO_4^{2-}) ในขณะที่แคลเซียมซัลเฟตก็มีการแตกตัวจนกระทั่งอิ่มตัวด้วยออลอนแคลเซียมออลอน (Ca^{2+}) และซัลเฟตออลอน (SO_4^{2-}) เช่นเดียวกัน

ไตรแคลเซียมซิลิเกตจะมีการแตกตัวอย่างต่อเนื่องและมีชั้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดขึ้นบนผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (CaO/SiO_2) ของผลิตภัณฑ์ไฮเดรตนี้จะมีค่าต่ำกว่าในไตรแคลเซียมซิลิเกตซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สภาวะนี้จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของแคลเซียมออลอน (Ca^{2+}) และ ไฮดรอกไซด์ออลอน (OH^-) ในขณะที่ไตรแคลเซียมอะลูมินेटจะแตกตัวและทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออลอน (Ca^{2+}) และซัลเฟตออลอน (SO_4^{2-}) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอ็ททริงไกท์ (Ettringite) ซึ่งปริมาณของไตรแคลเซียม

อะลูมิเนียมที่ทำปฏิกิริยาจะต่างกันตามชนิดของปูนซีเมนต์ เช่นเดียวกับเฟอร์ไรต์ที่ให้ผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกัน ส่วนเบต้าไคแคลเซียมซิลิเกต ($\beta\text{-C}_2\text{S}$) จะให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

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

หลังจากช่วงสั้นๆของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ผ่านไปอย่างรวดเร็ว อัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยรวมจะลดลงในช่วงชั่วโมงแรก เหตุผลที่ปฏิกิริยาลดลงอันเนื่องมาจากความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ในของเหลวที่เริ่มเข้าสู่จุดสูงสุดและกำลังจะลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) อยู่ในระดับที่คงที่ตามสัดส่วนที่ใช้ในการเกิดของเอ็ททริงไกท์ (Etringite)

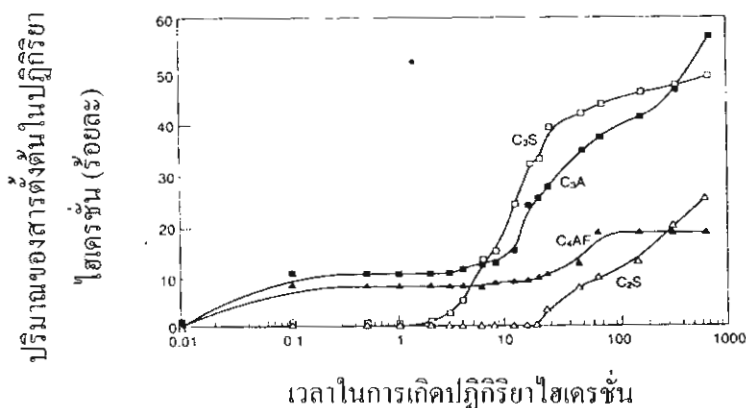
3. ระยะเร่ง (Acceleration Stage) (3 – 12 ชั่วโมงหลังการผสม)

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

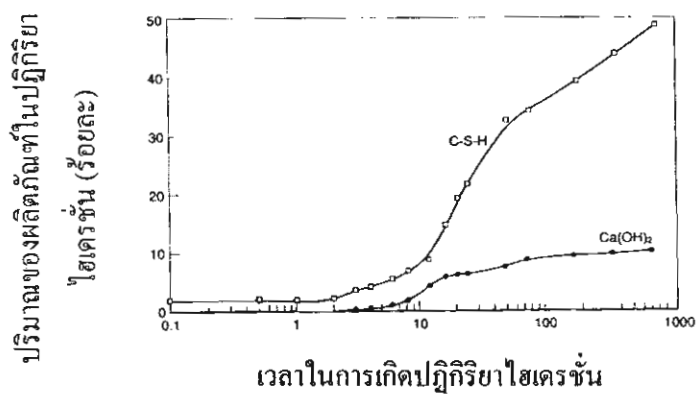
4. ระยะหลังการเร่ง (Post – Acceleration Period)

ในระยะนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงตามปริมาณของสารตั้งต้นของปฏิกิริยาที่ลดลง ในขณะที่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จะมีการฟอร์มตัวอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่อเนื่องของไตรแคลเซียมซิลิเกตและเบต้าไคแคลเซียมซิลิเกต และเมื่อแคลเซียมซัลเฟตใช้หมดไปจะทำให้ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ลดลง ตามด้วยเอ็ททริงไกท์จะฟอร์มตัวขึ้นจะเริ่มทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และไคแคลเซียมซึ่งมีโมเลกุลของอะลูมิเนียมและ/หรือเฟอร์ไรต์ได้โมโนซัลเฟต

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงได้ในภาพที่ 3.3 และ 3.4



ภาพที่ 3.3 การพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันในแต่ละสารประกอบหลัก



ภาพที่ 3.4 การเกิดไฮเดรต

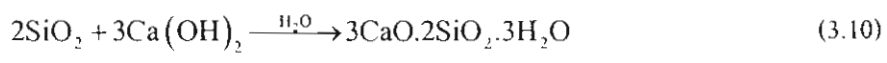
3.4 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

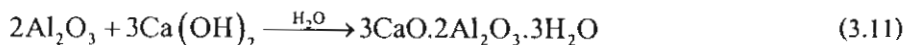
3.4.1 ความหมายของสารปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Material) ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า วัสดุที่มีส่วนประกอบเป็นซิลิคอน (Siliceous) หรือมีทั้งซิลิคอนและอะลูมินา (Siliceous and Alumineous) ซึ่งที่อุณหภูมิจะไม่ทำปฏิกิริยาแต่เมื่อทำการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ได้

3.4.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของสารปอซโซลาน

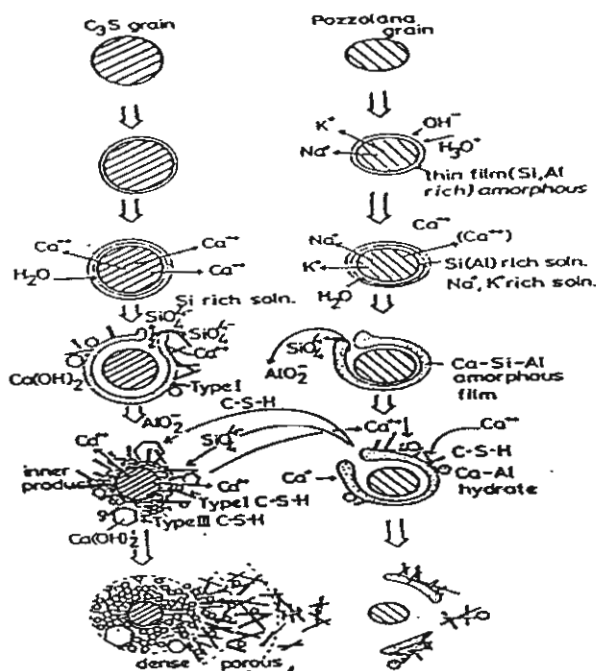
ปฏิกิริยาปอซโซลานิกคือ ปฏิกิริยาของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) และ/หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ในสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต โดยที่ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิคอนไดออกไซด์ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ในขณะที่ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของอะลูมิเนียมออกไซด์ ได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C₃A₂H₃) ดังสมการที่ (3.10) และ (3.11)





3.4.3 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีสารปอซโซลาน

จากภาพที่ 3.5 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในระบบซึ่งมีทั้งไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และสารปอซโซลานเริ่มขึ้นจากไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) จะละลายออกจากสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) อย่างอิสระลงไปในของเหลว แต่ไอออนดังกล่าวจะถูกดักจับด้วยอนุภาคที่มีประจุลบจากสารปอซโซลานโดยอาศัยการชนกันและถูกดูดซับที่ไว้ที่ผิวของอนุภาคปอซโซลาน ไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะเกิดการตกตะกอนที่อัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ (CaO/SiO_2) สูง ในขณะที่บนผิวของสารปอซโซลานจะเกิดขึ้นเช่นเดียวกันแต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ต่ำและความพรุนสูง โดยปกติเมื่ออนุภาคปอซโซลานสัมผัสกับน้ำผิวของสารปอซโซลานจะมีคุณสมบัติเป็นประจุบวกอันเนื่องมาจากการดึงดูดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำไว้และจะทำให้มีการแตกตัวของไฮเดียมไอออน (Na^+) และโพแทสเซียมไอออน (K^+) และไอออนอื่นๆ ที่ละน้อยตามมาเป็นผลให้เกิดชั้นที่ผิวของอนุภาคปอซโซลานซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิกอนและ/หรืออะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ การละลายของไฮเดียมไอออนและโพแทสเซียมไอออนจะช่วยเร่งการแตกตัวของน้ำให้มีปริมาณของไฮโดรเนียมไอออนเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเร่งการแตกตัวของซิลิเกตไอออน (SiO_4^{4-}) และอะลูมิเนียมไอออน (AlO_3^-) ด้วยและเมื่อรวมกับผลของแคลเซียมไอออนจึงทำให้ความหนาของชั้นบนอนุภาคปอซโซลานเพิ่มขึ้นและแตกออกในที่สุด



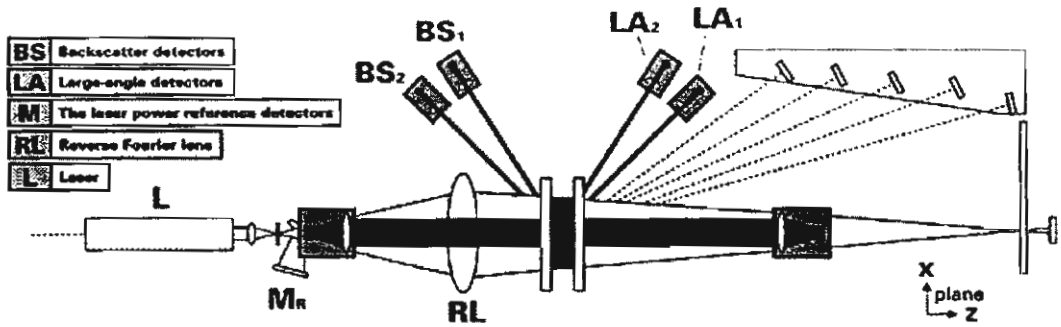
ภาพที่ 3.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลานิก

3.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับคุณสมบัติที่ทำการทดสอบ

3.5.1 การกระจายขนาดผลของอนุภาค (Particle Size Distribution)

การกระจายขนาดผลของอนุภาคเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในสถานะสดและแข็งตัวแล้ว โดยมีเทคนิคในการทดสอบการกระจายขนาดผลหลายวิธีอาทิเช่น วิธีการร่อน (Sieve) วิธีการตกตะกอน (Sedimentation Method) และการแทรกสอดของเลเซอร์ (Laser Diffraction Method) เป็นต้น ซึ่งในวิธีการแทรกสอดของเลเซอร์จะมีข้อได้เปรียบกว่าสองวิธีแรกหลายกล่าวคือ จำนวนตัวอย่างน้อยและทดสอบได้เร็ว ความแม่นยำสูง แต่ก็มีข้อจำกัดมากตั้งแต่เครื่องมือดังแสดงในภาพที่ 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 นอกจากนั้นสามารถพิจารณาได้ว่าผลึกประกอบด้วยชั้นหรือระนาบของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขว่าลำคลื่นที่ตกกระทบจะต้องมีความเข้มสูงและความแตกต่างของระยะเดินทาง (Path Difference) ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียงกันมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังแสดงในภาพที่ 3.7 และสมการที่ (3.12)

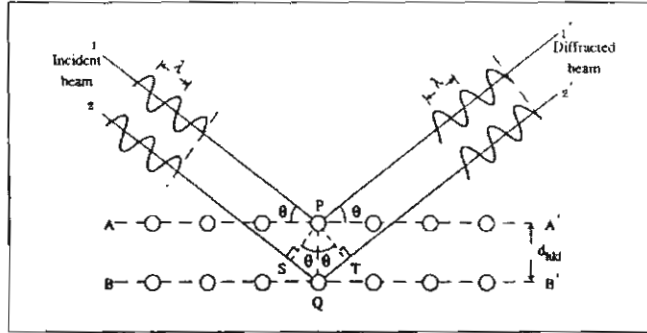
$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (3.12)$$

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 การยุบตัวและการคดโค้ง (ACI 116R-90) โดยสามารถทดสอบได้หลายวิธี แต่วิธีและง่ายในทางปฏิบัติคือ การทดสอบค่าการยุบตัว (Slump) และปัจจัยที่มีผลต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีต (สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล, 2542) ประกอบด้วย

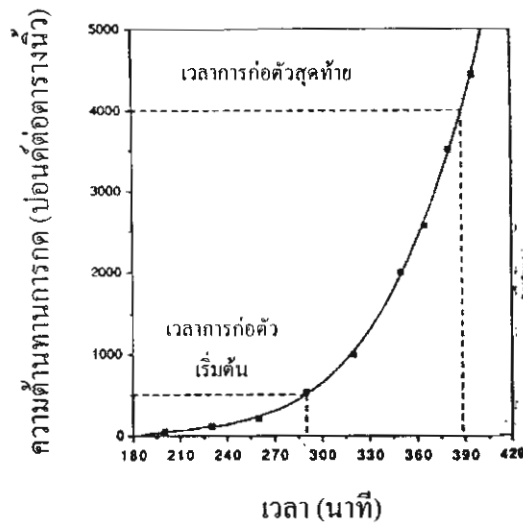
1. อัตราส่วนปริมาตรเฟสตันต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) โดยคอนกรีตที่มีปริมาตรเฟสตันมากหรือค่า γ สูงจะมีค่าการยุบตัวมากกว่า γ ต่ำ
2. พื้นที่ผิวทั้งหมดของมวลรวม ซึ่งคอนกรีตที่มีพื้นที่ผิวทั้งหมดของมวลรวมมากจะมีความสามารถในการเทได้น้อยกว่าคอนกรีตที่มีพื้นที่ผิวทั้งหมดของมวลรวมน้อย ทั้งนี้เพราะการที่มีพื้นที่ผิวทั้งหมดของมวลรวมมากจะทำให้แรงเสียดทานระ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

4. ปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) โดยปกติ น้ำคอนกรีตจะแบ่งออกเป็น 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) ของมอร์ตาร์ที่ได้จากการร่อนคอนกรีตผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เพื่อคัดแยกมวลรวมหยาบ (หิน) ออกเป็น 2 ช่วง คือ 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 ระยะเวลาก่อตัวของตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM 403-99

3.5.4 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

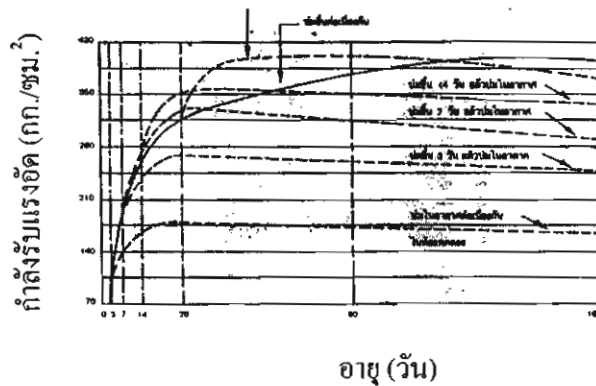
3.5.4.1 กำลังรับแรงของคอนกรีต

กำลังรับแรงเป็นคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาวะแข็งตัวแล้ว (Hardened State) หมายถึง คอนกรีตที่พัฒนาการของกำลังรับน้ำหนักได้เต็มที่ตามที่ออกแบบไว้ โดยทั่วไปคือ คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เป็นต้นไป คอนกรีตในสภาวะแข็งตัวแล้วต้องมีกำลังที่ดี 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)

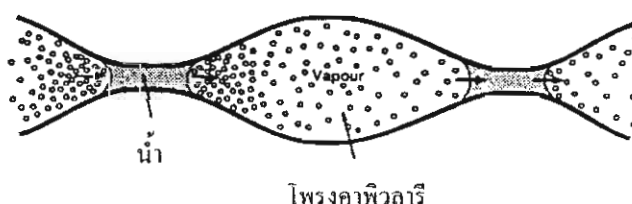
ซึ่งมีค่าระหว่าง 90 ถึง 155 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต

f_c' คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)

3.5.5 คุณสมบัติทางด้านการทนทานของคอนกรีต

3.5.5.1 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)

การหดตัวแบบแห้งเป็นการหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียน้ำของซีเมนต์เพสต์ไปสู่บรรยากาศที่มีสถานะความชื้นต่ำ ซึ่งเกิดจากการสูญเสียน้ำทั้งจากโพรงคาพิลลารี (Capillary Pore) และโพรงเจล (Gel Pore) ในซีเมนต์เพสต์ดังแสดงในภาพที่ 3.10 ให้กับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากความแตกต่างของความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างคอนกรีตและสิ่งแวดล้อมเพื่อให้ระบบอยู่ในภาวะสมดุล ซึ่งความชื้นที่สูญเสียน้ำไปไม่สามารถกลับคืนมาได้ (Irreversible Process) โดยที่ปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ที่หดตัวจะมีค่าไม่เท่ากับปริมาตรของน้ำที่สูญเสียน้ำไป อันเนื่องจากการยึดรั้งของโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์



ภาพที่ 3.10 การสูญเสียน้ำผ่านทางโพรงคาพิลลารีและเจล

3.5.5.2 การกระทำเนื่องจากซัลเฟต

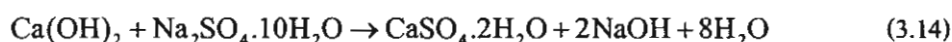
สถานะแวดล้อมที่มีซัลเฟตจะมีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต โดยทั่วไปซัลเฟตจะพบในรูปของโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ซึ่งเมื่อเกลือซัลเฟตมีความเข้มข้นมากกว่า 1000 ส่วนในล้านส่วน (ppm) จะทำให้คอนกรีตเกิดความเสียหาย โดยซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับทุกๆ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

กันซ์ของซีเมนต์เพสต์อันจะก่อให้เกิดการขยายตัว (Expansion) การแตกร้าว (Crack) และการหลุดร่อน (Spalling) ในระยะยาว

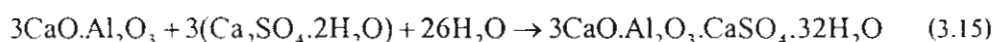
ปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และซีเมนต์เพสต์เป็นปฏิกิริยาที่มีความซับซ้อนและขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเช่น ความเข้มข้นของซัลเฟต ไอออน อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม ชนิดและสัดส่วนของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง และเวลาในการบ่ม เป็นต้น และเป็นปฏิกิริยาที่ขึ้นอยู่กับเวลาเพราะการแพร่กระจายของซัลเฟต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

สำหรับปฏิกิริยาของโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) กับซีเมนต์เพสต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

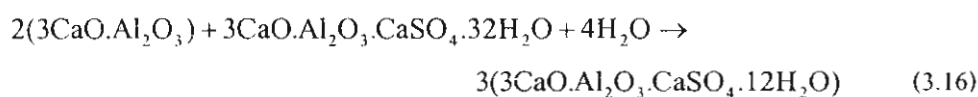
1. การเกิดยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โดยโซเดียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เกิดผลิตภัณฑ์เป็นยิปซัม ดังแสดงในสมการที่ (3.14)



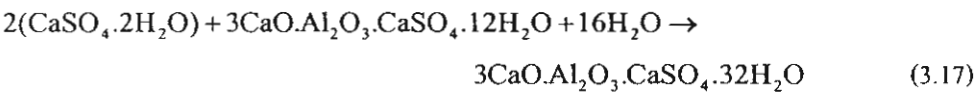
2. การเกิดเอ็ททริงไกต์ (AFt-phase) ซึ่งยิปซัมที่ได้จากปฏิกิริยาในสมการที่ (3.14) จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับไตรแคลเซียมอะลูมินेट (C_3A) เกิดเอ็ททริงไกต์ผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในสมการที่ (3.15)



3. การเกิดโมโนซัลโฟอะลูมินेट โดยเมื่อไตรแคลเซียมอะลูมินेटทำปฏิกิริยากับซัลเฟตจะทำให้ปริมาณซัลเฟตในเพสต์ลดลง ส่งผลให้เอ็ททริงไกต์เปลี่ยนรูปไปอยู่ในสถานะกึ่งเสถียรที่เรียกว่า โมโนซัลโฟอะลูมินेट (AFm-phase) ดังแสดงในสมการที่ (3.16)



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



ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำลายโดยซัลเฟตมีดังต่อไปนี้

1. ปริมาณของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ในปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะยังปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (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) ซึ่งมาจากกิจกรรมทางการเกษตรและมีการย่อยทั้งเป็นไข่และไม่ไข่ออกซิเจน 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)

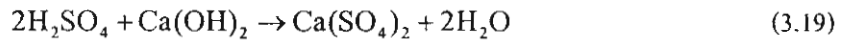
กลุ่ม	ชื่อกรด	ความสามารถในการละลาย ของเกลือแคลเซียม (Ca ²⁺)
2. ละลายได้ ปานกลาง	1. (CH ₂) ₂ COH(COOH) ₃ (Cetric Acid)	0.085
	2. (CH ₂) ₂ (OH) ₂ (COOH) ₂ (Tartanic Acid)	0.037
3. ละลายได้ น้อย	1. (COOH) ₂ (Oxalic Acid)	0.00067

โดยกรดที่นำมาทดสอบกับคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบเป็นกรดอะซิติก (CH₃COOH) ที่จัดอยู่ในกลุ่มที่ละลายน้ำสูง และสามารถทำให้คอนกรีตละลายตัวได้หลังจาก 2 เดือน ปฏิกริยาของกรดดังกล่าวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) (โดยปกติกรดจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมที่มีในคอนกรีตทั้งหมด แต่เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีความไวในการปฏิกิริยาและอยู่สภาวะที่ละลายในรูปของไอออนจึงนำมาพิจารณาก่อน เมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาหมดจึงจะละลายสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตออกมา) แสดงในสมการที่ (3.18) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือแคลเซียมซิลิเกต (Ca(CH₃COO)₂) ที่มีความสามารถในการละลายได้สูงมากทำให้บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตที่สัมผัสกับกรดมีการชะล้างออกไปและทำให้กรดสามารถกระทำต่อผิวใหม่ได้ต่อไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและการละลายของผลิตภัณฑ์



2. กรดอนินทรีย์ (Inorganic Acid) ที่ได้จากกระบวนการทางอุตสาหกรรม โดยกรดที่นำมาศึกษาคือ กรดซัลฟูริก (H₂SO₄) ซึ่งปกติจะเกิดในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม ปฏิกริยาของกรดซัลฟูริกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) แสดงสมการที่ (3.19) โดยมีการทำปฏิกิริยาใน 2 อย่างคือ ไฮโดรเจนไอออน (H⁺) จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ (OH⁻) ที่ละลายอยู่ในโพรงคานัลลารี ในขณะที่ไอออนของซัลเฟต (SO₄²⁻) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน (Ca²⁺) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และเมื่อปรากฏไอออน

ของอะลูมิเนียม (Al^{3+}) จะทำให้แคลเซียมซัลเฟตทำปฏิกิริยาต่อเนื่องเกิดเป็นเอ็ทพริงไกท์ ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) 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. ละลายได้ ปานกลาง	1. H ₂ SO ₄ (Sulfuric Acid)	0.256
3. ละลายได้ น้อย	1. HF (Hydrogensulfide Acid)	0.00067

บทที่ 4

วิธีการศึกษา

4.1 แผนการทดสอบ

ในการศึกษานี้ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, Green Sand and Molding Waste (GSW) และ Shell Sand Waste (SSW)
2. การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสม Green Sand and Molding Waste (GSW) และ Shell Sand Waste (SSW)

การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตประกอบด้วย 2 ส่วนคือ คุณสมบัติทางกล ได้แก่ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น กำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต โมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน และคุณสมบัติด้านความทนทาน ได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดซัลฟริก (H_2SO_4) และอะซิติก (CH_3COOH) และความทนทานต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)

4.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราภูเขา ของบริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด (มหาชน)
2. ผงฝุ่นทรายไส้แบบที่ใช้ในการทดสอบ เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการหล่อ 2 ชนิด คือ Green Sand and Molding Waste (GSW) และ Shell Sand Waste (SSW) จากบริษัท โตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดชลบุรี
3. น้ำ ใช้น้ำประปาที่มีค่าความเป็นกรดค่าเท่ากับ 7
4. ทราย ทรายที่ใช้ในการทดสอบเป็นทรายแม่น้ำที่มีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33
5. หิน เป็นหินปูน (Limestone) มีขนาดใหญ่สุด 25 มิลลิเมตร และขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33
6. สารเคมีที่ใช้ดังต่อไปนี้
 - 6.1 กรดซัลฟริก (H_2SO_4) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.84 และปริมาณรีเอเจนต์ (เนื้อสาร) ร้อยละ 98 (โดยน้ำหนัก)

6.2 กรดอะซิติก (CH_3COOH) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.05 และปริมาตรไอเจนต์ (เนื้อสาร) ร้อยละ 99.5 (โดยน้ำหนัก)

6.3 โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

4.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

4.1.2.1 เครื่องมือวัด ได้แก่

1. เครื่องชั่ง
2. เวอร์เนียคาลิเปอร์
3. เทอร์โมมิเตอร์

4.1.2.2 อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม

1. ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาขนาดกะและโมดูลัสความละเอียดของมวลรวม
2. ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซับน้ำ

4.1.2.3 อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

1. เครื่องผสมคอนกรีต
2. เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ขนาด 200 ตัน
3. ชุด Cap หัวคอนกรีต และเครื่องดัดก้ามฉัน
4. เครื่องวัดการหดตัวแบบดิจิตอล (Digital Length Comparator)
5. ห้องบ่มที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้
6. เครื่องจักรคอนกรีต เหล็กกระทุ้ง เครื่องเหล็ก
7. ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต
8. ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต
9. แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 สูง 20 เซนติเมตร
10. แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 สูง 30 เซนติเมตร
11. แบบหล่อขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร
12. แบบหล่อลูกบาศก์ขนาด 10 และ 15 เซนติเมตร

4.1.3 สถานที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.3.1 ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

4.1.3.2 โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จของทางบริษัท เอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด

4.1.3.3 โรงฝึกงาน 1 โปรแกรมเทคโนโลยีก่อสร้าง สถาบันราชภัฏพระนคร

4.1.4 รายละเอียดวิธีการทดสอบ

4.1.4.1 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของ Green Sand and Molding Waste (GSW) และ Shell Sand Waste (SSW) เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทดสอบโดยบริษัท เอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

คุณสมบัติที่ทำการทดสอบ เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	คุณสมบัติทางกายภาพ
1. ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	1. ความถ่วงจำเพาะ
2. อะลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al_2O_3)	2. Bulk Density (กรัม/ตร.ซม.)
3. ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3)	*3. ความละเอียด (ตร.ซม./กรัม)
4. แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	4. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	5. ดัชนีกำลัง (Strength Index, (SI))
6. โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	6. การกระจายขนาดผละ
7. โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	7. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI)
8. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	(ร้อยละ)
	8. ความต้องการน้ำ (ร้อยละ)

การทดสอบเพื่อหาลักษณะของอนุภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ความเป็นผลึกของ GSW กับ SSW ด้วยวิธี X-Ray และการกระจายขนาดคละของอนุภาค (Particle Size Distribution) ทดสอบโดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.4.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

การทดสอบหาคุณสมบัติของคอนกรีตปกติและคอนกรีตที่ผสม Shell Sand Waste (SSW) หรือ Green Sand Waste (GSW) โดยมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) ดังต่อไปนี้

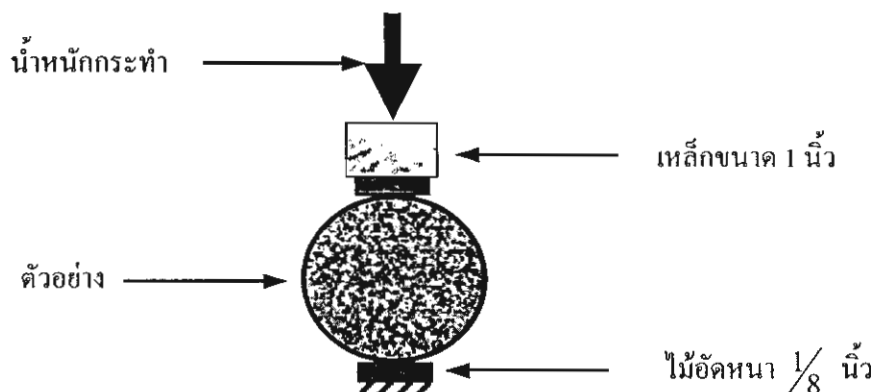
1. การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสดตามมาตรฐาน ASTM C 138 (Standard Method of Test for Weight per Cubic Foot, Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete)

2. การทดสอบหาค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 143 (Standard Method for Slump of Portland Cement Concrete)

3. การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 403 (Standard Test Method of Time of Setting of Concrete Mixture by Penetration Resistance)

4. การทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 469 (Standard Method of Test for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression)

5. การทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 สูง 20 เซนติเมตร โดยทำการหล่อ 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปทำการบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่ 3, 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดึงใช้วิธีทดสอบแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Test) ตามมาตรฐาน ASTM C 39 (Standard Method Test for Compressive Strength of Cylinder Concrete Specimens) และ ASTM C 496 (Standard Method Test for Splitting Tensile Test of Cylinder Concrete Specimens) ตามลำดับ โดยที่ลักษณะของการติดตั้งเครื่องมือทดสอบแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 การติดตั้งเครื่องทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 496

6. การทดสอบการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) โดยทำการผสมคอนกรีตแล้วจึงนำมาเทลงแบบหล่อขนาด 75x75x285 มิลลิเมตร ถอดแบบออกหลังจากผสม 1 วัน จากนั้นนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน ระหว่างนั้นให้นำมาทำการวัดด้วยเครื่อง Digital Length Comparator ทุกๆ 3 วัน เมื่อครบกำหนด 28 วันให้นำขึ้นจากน้ำมาทำการบ่มในตู้บ่มที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 60 ± 5 ทำการวัดเช่นเดียวกับขณะที่ทำการบ่มในน้ำ โดยความยาวเริ่มต้น L_0 และความยาวของแท่งตัวอย่าง ณ วันที่ทำการวัดต่อไปเป็น L_i แล้วจึงนำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ดังสมการที่ (4.1) ทำการวัดไปจนกระทั่งความยาวที่เปลี่ยนไปมีแนวโน้มค่าคงที่

$$Strain = \frac{L_0 - L_i}{L_0} \quad (4.1)$$

7. ความทนทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลฟูริกและอะซิดิก โดยทำการผสมคอนกรีตแล้วจึงนำมาเทลงแบบหล่อลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร ถอดแบบหล่อเมื่อคอนกรีตมีอายุ 1 วัน จึงนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นจึงนำคอนกรีตมาทำการผึ่งจนมีน้ำหนักคงที่แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นนำไปทำการแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกและอะซิดิกที่มีความเข้มข้น 1 นอร์มอลิตี โดยทำการควบคุมอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของสารละลายกรดเท่ากับ 1 ต่อ 3 เพื่อให้กรดสามารถกระทำต่อทุกผิวของคอนกรีต เมื่อแช่ครบอายุที่ 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ จึงนำมาทำการชั่งผิวตัวอย่างคอนกรีตและผึ่งให้แห้งจนมีน้ำหนักคงที่แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนัก

ที่เหลืออยู่ นำผลการทดสอบมาคำนวณหาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักจากน้ำหนักที่ลดลงเปรียบเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น

8. การทดสอบความทนทานต่อซัลเฟตในรูปของการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งอ้างอิงมาจากมาตรฐาน ASTM C 1012 เป็นแนวทางเบื้องต้น โดยเริ่มจากการหล่อแท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาด 75x75x285 มิลลิเมตร และทำการถอดแบบที่อายุ 23.5 ± 0.5 ชั่วโมงหลังการผสมจึงวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่าง จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปทำการบ่มในน้ำปูนใสเป็นเวลา 28 วัน แล้วจึงนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่มีความเข้มข้นรวมเท่ากับ 50 กรัมต่อลิตร ทำการวัดความยาวโดยใช้เครื่อง Digital Length Comparator วัดเป็นประจำทุกสัปดาห์และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาหน่วยการยืดหดจากความยาวที่เปลี่ยนไปเทียบกับความยาวเริ่มต้น

4.1.4.3 สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ทำการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วย GSW แสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

จากสัดส่วนผสมของคอนกรีตผสมเสร็จที่มีส่วนประกอบของ SSW และ GSW ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 และจากขอบเขตของศึกษาที่กำหนดค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้ดังที่แสดงในตารางเพื่อทำให้คอนกรีตผสมเสร็จมีค่าการยุบตัวดังกล่าวมีปริมาณแตกต่างกัน โดยกำหนดให้ต้องมีการทดสอบจากงานจริง ในขณะที่ตัวเลขดังที่แสดงในตารางได้มาจากการทดสอบแล้วเบื้องต้นว่าคอนกรีตผสมเสร็จมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 2.5 เซนติเมตร

4.1.4.4 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

จำนวนตัวอย่างของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.2

สัดส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ด้วย Shell Sand Waste (SSW) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ปริมาณปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³)	สัญลักษณ์	$\frac{SSW}{C + SSW} (\%)$	ปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³)	SSW (กก./ม. ³)	น้ำ (กก./ม. ³)	ทราย (กก./ม. ³)	หิน (กก./ม. ³)
300	300(10)SSW0	0	300	0	165	840	1195
300	300(10)SSW10	10	270	30	165	840	1195
300	300(10)SSW20	20	240	60	165	840	1195
300	300(10)SSW30	30	210	90	165	840	1195
300	300(10)SSW40	40	180	120	165	840	1195
350	350(10)SSW0	0	350	0	165	810	1165
350	350(10)SSW10	10	315	35	165	810	1165
350	350(10)SSW20	20	280	70	165	810	1165
350	350(10)SSW30	30	245	105	165	810	1165
350	350(10)SSW40	40	210	140	165	810	1165
400	400(10)SSW0	0	400	0	165	740	1160
400	400(10)SSW10	10	360	40	165	740	1160
400	400(10)SSW20	20	320	80	165	740	1160
400	400(10)SSW30	30	280	120	165	740	1160
400	400(10)SSW40	40	240	160	165	740	1160

หมายเหตุ : SSW คือ Shell Sand Waste, $\frac{SSW}{C + SSW}$ คืออัตราส่วน SSW โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ตารางที่ 4.3

สัดส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ด้วย Green Sand Waste (GSW) ในทรายธรรมชาติ

ปริมาณปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³)	สัญลักษณ์	$\frac{GSW}{S + GSW} (\%)$	ปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³)	น้ำ (กก./ม. ³)	ทราย (กก./ม. ³)	GSW (กก./ม. ³)	หิน (กก./ม. ³)
300	300(10)GSW0	0	300	165	840	0	1195
300	300(10)GSW5	5	300	165	798	42	1195
300	300(10)GSW10	10	300	165	756	84	1195
300	300(10)GSW15	15	300	165	714	126	1195
350	350(10)GSW0	0	350	165	810	0	1165
350	350(10)GSW5	5	350	165	769.5	41	1165
350	350(10)GSW10	10	350	165	729	81	1165
350	350(10)GSW15	15	350	165	688.5	122	1165
400	400(10)GSW0	0	400	165	740	0	1160
400	400(10)GSW5	5	400	165	703	37	1160
400	400(10)GSW10	10	400	165	666	74	1160
400	400(10)GSW15	15	400	165	629	111	1160

หมายเหตุ : GSW คือ Green Sand Waste. $\frac{GSW}{S + GSW}$ คือ อัตราส่วนการแทนที่ของ GSW ในมวลรวมละเอียด (ทรายปกติ, S) โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.4

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสม Shell Sand Waste (SSW)
สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³

ร้อยละการแทนที่ SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม
			ค่าการยุบตัว (Slump) ซม.			
			5 ± 0.5	10 ± 0.5	15 ± 0.5	
0	SSW0	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	1	1	1	3
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	1	1	1	3
		กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน	21	21	21	63
		กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ	21	21	21	63
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	3	3	3	9
		การหดตัวแบบแห้ง	3	3	3	9
		การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟต	3	3	3	9
		ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกและอะซิดิก	6	6	6	6

หมายเหตุ SSW0; SSW ____ คือ Shell Sand Waste
0 ____ คือ ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักของ Shell Sand Waste (SSW)

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสริม Shell Sand Waste (SSW)
สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³

ร้อยละการแทนที่ SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			
			ค่าการยุบตัว (Slump) ซม.			รวม
			5 ± 0.5	10 ± 0.5	15 ± 0.5	
10	SSW10	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	1	1	1	3
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	1	1	1	3
		กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน	21	21	21	63
		กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ	21	21	21	63
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	3	3	3	9
		การหดตัวแบบแห้ง	3	3	3	9
		การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟต	3	3	3	9
		ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก				
		และอะซิติก	6	6	6	6

หมายเหตุ SSW0; SSW___ คือ Shell Sand Waste
10___ คือ ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักของ Shell Sand Waste (SSW)

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสม Shell Sand Waste (SSW)
สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³

ร้อยละการแทนที่ SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม
			ค่าการยุบตัว (Slump) ซม.			
			5±0.5	10±0.5	15±0.5	
20	SSW20	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	1	1	1	3
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	1	1	1	3
		กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน	21	21	21	63
		กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ	21	21	21	63
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	3	3	3	9
		การหดตัวแบบแห้ง	3	3	3	9
		การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟต	3	3	3	9
		ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกและอะซิติก	6	6	6	6

หมายเหตุ SSW0; SSW ____ คือ Shell Sand Waste

20 ____ คือ ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักของ Shell Sand Waste (SSW)

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสม Shell Sand Waste (SSW)
สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³

ร้อยละการแทนที่ SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ I	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม
			ค่าการยุบตัว (Slump) ซม.			
			5 ± 0.5	10 ± 0.5	15 ± 0.5	
30	SSW30	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	1	1	1	3
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	1	1	1	3
		กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน	21	21	21	63
		กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ	21	21	21	63
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	3	3	3	9
		การหดตัวแบบแห้ง	3	3	3	9
		การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต	3	3	3	9
		ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกและอะซิติก	6	6	6	6

หมายเหตุ SSW0; SSW___ คือ Shell Sand Waste

30___ คือ ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักของ Shell Sand Waste (SSW)

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสม Green Sand and Molding Waste (GSW)
 สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³

รายละเอียดการแทนที่ SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม
			ค่าการยุบตัว (Slump) ซม.			
			5 ± 0.5	10 ± 0.5	15 ± 0.5	
5	GSW5	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	1	1	1	3
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	1	1	1	3
		กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน	21	21	21	63
		กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ	21	21	21	63
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	3	3	3	9
		การหดตัวแบบแห้ง	3	3	3	9
		การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟต	3	3	3	9
		ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก				
		และอะซิดิก	6	6	6	6

หมายเหตุ GSW0; GSW___ คือ Green Sand and Molding Waste (GSW)

5___ คือ ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักของ Shell Sand Waste (SSW)

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสม Green Sand and Molding Waste (GSW)
สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³

ร้อยละการแทนที่ SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม
			ค่าการยุบตัว (Slump) ซม.			
			5 ± 0.5	10 ± 0.5	15 ± 0.5	
10	.	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	1	1	1	3
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	1	1	1	3
		กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน	21	21	21	63
		กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ	21	21	21	63
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	3	3	3	9
		การหดตัวแบบแห้ง	3	3	3	9
		การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟต	3	3	3	9
		ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากการคาร์บอนไดออกไซด์และอะซิดิก	6	6	6	6

หมายเหตุ GSW0; GSW___ คือ Green Sand and Molding Waste (GSW)
10___ คือ ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักของ Shell Sand Waste (SSW)

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสม Green Sand and Molding Waste (GSW)
สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³

รายละเอียดการแทนที่ SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม
			ค่าการยุบตัว (Slump) ซม.			
			5 ± 0.5	10 ± 0.5	15 ± 0.5	
15	GSW15	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	1	1	1	3
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	1	1	1	3
		กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน	21	21	21	63
		กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ	21	21	21	63
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	3	3	3	9
		การแตกตัวแบบแห้ง	3	3	3	9
		การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟต	3	3	3	9
		ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกและอะซิติก	6	6	6	6
		รวม	177	177	177	531
		รวมคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม. ³	531	531	531	1593

หมายเหตุ GSW0; GSW___ คือ Green Sand and Molding Waste (GSW)

15___ คือ ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักของ Shell Sand Waste (SSW)

บทที่ 5

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

5.1 คุณสมบัติของผงฝุ่นทรายไส้แบบ

ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของผงฝุ่นทรายไส้แบบประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมีของของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) กับกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) คุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) พื้นที่ผิวจำเพาะในรูปของความละเอียดด้วยวิธีเบลน (Blaine Fineness) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) Size Distribution Microscopic Analysis ได้แก่ Scanning Electron Microscope (SEM) และ X-Ray Diffraction และ ค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index, SAI)

5.1.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างผงฝุ่นทรายไส้แบบที่ได้จากการเก็บตัวอย่างที่ขณะเริ่มต้นงานวิจัย (ครั้งที่ 1) เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงได้ในตารางที่ 5.1 พบว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) โดยผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีปริมาณน้อยกว่ากลุ่ม SSW ในขณะที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่จะสังเกตเห็นว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีปริมาณของไอรอนออกไซด์มากกว่ากลุ่ม SSW เล็กน้อย ทั้งนี้เพราะผงฝุ่นทรายไส้แบบดังกล่าวมาจากการทำแบบหล่อภายนอกซึ่งต้องมีความแข็งแรงมากจึงมีความจำเป็นต้องใส่ส่วนผสมที่เป็นเหล็กมากขึ้น

สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญได้แก่ การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ที่มีค่าน้อย อันเนื่องมาจากในกระบวนการทำแม่แบบดังที่แสดงในภาพที่ 2.1 จะเห็นว่าแม่แบบจะผ่านกระบวนการทำแบบโดยจะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,400 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถพิจารณาในสองประเด็นคือ ประการแรกคืออุณหภูมิดังกล่าวปริมาณของคาร์บอนได้ถูกกำจัดไปแล้วบางส่วน ประการที่สองคือ การทดสอบหาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้จะเผาวัสดุที่อุณหภูมิ 950 ± 50 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าสภาพความเป็นจริงที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบ

กลุ่ม GSW แต่เนื่องจากสารปรับปรุงคุณสมบัติของแม่แบบเพิ่มเติมทำให้ปรากฏค่าขึ้น ในทำนองผกผันทรายไส้แบบชนิด SSW จะมีค่าดังกล่าวปรากฏขึ้น อันเนื่องมาจากในกระบวนการผลิตแบบหล่อภายใน ทรายจะได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส ทำให้ส่วนผสมบางอย่างที่ใส่เข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแบบหล่อยังคงตกค้างอยู่ เมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิ 950 ± 50 องศาเซลเซียส ส่วนผสมที่ตกค้างจะสลายไปดังที่ปรากฏเป็นค่าของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ขึ้น สำหรับค่าความละเอียดของ SSW จะมีค่าสูงกว่าความละเอียดในปูนซีเมนต์เล็กน้อย ในขณะที่ GSW จะมีความละเอียดต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก

เมื่อพิจารณาสัณฐานภาพในการผงฝุ่นทรายไส้แบบมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยดูได้จากค่าดัชนีกำลังที่ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่าค่าดัชนีกำลังที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีค่าร้อยละ 78 และกลุ่ม GSW มีค่าร้อยละ 55 ที่อายุ 7 วัน ในขณะที่อายุ 28 วัน ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีค่าร้อยละ 82 และผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW จะมีค่าร้อยละ 60 โดยเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานในการนำสารปอซโซลานมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ (ASTM C 618 (Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete)) ดังแสดงในตารางที่ 5.2 พบว่าคุณสมบัติของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดค่าดัชนีกำลังที่ 7 และ 28 วัน ซึ่งจะต้องมีไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ในขณะที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ซึ่งมีแนวโน้มที่สามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้

สำหรับการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาพิจารณาความแปรปรวนในส่วนคุณสมบัติของผงฝุ่นทรายไส้แบบ โดยกระทำทุกๆ 2 เดือน เป็นระยะเวลา 12 เดือน (ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2546 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2546) พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของผงฝุ่นทรายไส้แบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เก็บและนำมาใช้ในผสมเป็นคอนกรีตผสมเสร็จ (ตัวอย่างในที่เก็บครั้งที่ 1) ดังจะเห็นได้จากปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีปริมาณในช่วงร้อยละ 88 ถึง 90 สำหรับผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW และร้อยละ 70 ถึง 75 สำหรับกลุ่ม GSW เป็นต้น ในขณะที่ด้านคุณสมบัติทางกายภาพมีลักษณะความแปรปรวนคล้ายกัน โดยเฉพาะค่าความต้องการน้ำที่ต้องการเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนมีค่าคงที่ร้อยละ 102 และ 106 สำหรับผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW และ GSW ตามลำดับ ตลอดช่วงการเก็บตัวอย่าง เป็นต้น

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบเคมีของผงปูนทรายใช้แบบกลุ่ม SSW Green Sand and Molding Waste (GSW) และ Shell Sand Waste (SSW)
เปรียบเทียบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	1		2		3		4		5		6	
		SSW	GSW	SSW	GSW	SSW	GSW	SSW	GSW	SSW	GSW	SSW	GSW
1. ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	20.84	83.35	77.05	88.78	70.46	89.65	73.19	90.07	75.22	87.35	73.46	88.77	74.59
2. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	5.22	6.80	1.58	4.29	9.27	4.68	8.05	4.81	8.02	4.95	7.81	5.04	7.79
3. ไอรอนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	3.20	3.32	4.43	2.00	3.49	2.86	4.10	2.46	3.99	2.95	4.18	2.90	3.91
4. แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	66.28	1.73	0.45	2.70	3.12	1.32	2.70	1.09	1.84	1.32	2.63	1.31	2.58
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.24	1.02	0.13	0.75	1.89	0.70	1.96	0.66	1.19	0.94	1.59	0.95	1.69
6. โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.22	0.84	0.16	0.55	0.63	0.56	0.56	0.60	0.54	0.56	0.53	0.56	0.54
7. โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.10	0.93	0.17	0.84	1.97	0.85	1.78	0.89	1.62	0.96	1.48	1.00	1.59
8. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	2.41	0.05	0.02	0.02	0.08	0.02	0.06	0.02	0.07	0.02	0.06	0.02	0.06
9. แคลเซียมออกไซด์อิสระ (free lime)	0.57	0.39	0.65	0.34	0.63	0.32	0.65	0.33	0.64	0.37	0.67	0.35	0.61
10. ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก จากการเผาไหม้ (LOI)	0.96	0.87	1.00	1.09	1.78	1.03	1.36	1.25	1.44	0.65	1.89	0.64	1.29

หมายเหตุ ในการเก็บตัวอย่างผงปูนทรายใช้แบบกระทำทุกๆ 2 เดือน เป็นระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2546 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2546

ตารางที่ 5.1 (ต่อ) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผงผู้พรายใช้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) และ Shell Sand Waste (SSW) เปรียบเทียบ กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

คุณสมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	1		2		3		4		5		6	
		SSW	GSW	SSW	GSW	SSW	GSW	SSW	GSW	SSW	GSW	SSW	GSW
1. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.19	0.19	2.56	0.09	3.88	0.05	2.23	0.06	2.86	0.20	2.57	0.14	1.21
2. พื้นที่ผิวจำเพาะ (ความละเอียดด้วยวิธีเบลน (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม))	3248	3974	745	3867	561	4160	877	4208	867	3555	592	4109	664
3. ความถ่วงจำเพาะ	3.14	2.58	2.57	2.28	2.57	2.25	2.59	2.22	2.60	2.24	2.56	2.24	2.57
4. ดัชนีการพัฒนากำลัง (SAI) ที่ 7 วัน (ร้อยละเทียบกับควบคุม) ที่ 28 วัน (ร้อยละเทียบกับควบคุม)	• 100 100	78 82	55 60	77 80	46 55	75 84	44 54	78 85	58 60	79 80	54 62	78 80	51 57
5. ปริมาณน้ำที่ต้องการ (ร้อยละเทียบกับควบคุม)	100	102	106	102	106	102	106	102	106	102	106	102	106
6. ร้อยละกำลังตะแกรง													
- 38 ไมโครเมตร	8.7	51.6	57.0	59.3	58.5	57.5	53.1	54.6	53.4	60.3	61.3	57.4	56.9
- 45 ไมโครเมตร	4.8	47.0	52.7	55.3	54.7	55.9	47.7	53.3	53.0	58.8	55.4	54.4	55.6
- 90 ไมโครเมตร	0.2	31.5	25.3	41.2	27.5	42.5	16.1	30.7	20.9	45.2	30.8	39.9	30.1

หมายเหตุ ในการเก็บตัวอย่างผงผู้พรายใช้แบบกระทำได้ๆ 2 เดือน เป็นระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2546 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2546

ตารางที่ 5.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของผงปูนทรายสีเขียวแบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) และกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) กับสารปอชโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618-93 ที่ได้จากการประเมินจากการเก็บตัวอย่างในครั้งที่ 1

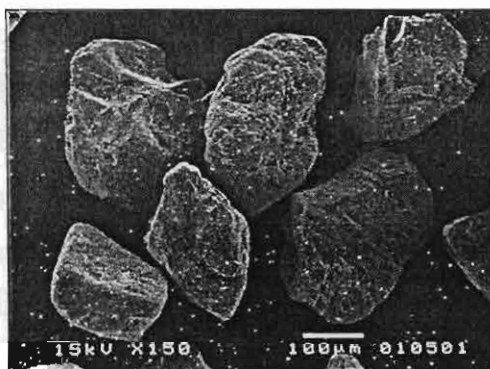
คุณสมบัติทางเคมี	วัสดุปอชโซลาน ⁽¹⁾			SSW	GSW
	N	F	C		
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , min., %	70.0	70.0	50.0	93.47	83.06
Sulfur Trioxide (SO ₃), max., %	4.0	5.0	5.0	0.05	0.02
Alkalis as Na ₂ O, Na ₂ O (%) + 0.658 K ₂ O (%), max., %	1.5	1.5	1.5	1.57	0.24
Loss on Ignition, max., %	10.0	6.0	6.0	0.87	1.00
คุณสมบัติทางกายภาพ	วัสดุปอชโซลาน ⁽¹⁾			SSW	GSW
	N	F	C		
Amount retained when wet sieved No. 325, max., %	34	34	34	3.16	7.74
Water Requirement, max., %	115	105	105	102	106
Strength Activity Index					
At 7 days, min., %	75	75	75	78	55
At 28 days, min., %	75	75	75	82	60
Moisture Content, max., %	3.0	3.0	3.0	0.19	2.56

หมายเหตุ ⁱⁱⁱ จากมาตรฐาน ASTM C 618-93 ได้จัดประเภทของสารปอซโซลานไว้ 3 ประเภท คือ
 ประเภท N คือ วัสดุคิบหรือสารปอซโซลานธรรมชาติที่มีส่วนประกอบของแคลเซียมและมี
 คุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 5.2 ได้แก่ เชิร์ต (Cherts) ทัฟฟ์ (Tuffs) เป็นต้น
 ประเภท F คือ เถ้าลอยปกติ (Fly Ash) ซึ่งได้จากการเผาถ่านหินจำพวกแอนทราไซต์
 (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) และมีคุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 5.2
 ประเภท C คือ เถ้าลอยปกติ (Fly Ash) ซึ่งได้จากการเผาถ่านหินจำพวกลิกไนต์ (Lignite)
 หรือซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) และมีคุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 5.2

5.1.2 ลักษณะของอนุภาค

5.1.2.1 ทรายจากประเทศออสเตรเลีย (AUSTRALIA SAND)

จากลักษณะอนุภาคของทรายที่ใช้ทำแบบหล่อภายในและภายนอกซึ่งเข้าจากประเทศออสเตรเลียด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope) และ BEI (Back Scattered Image) ในภาพที่ 5.1(ก) และ 5.2(ก) พบว่าพื้นผิวของอนุภาคทรายมีลักษณะค่อนข้างเรียบ และจากภาพถ่าย BEI ในภาพที่ 5.1(ข) และ 5.2(ข) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยแยกความแตกต่างของธาตุที่อยู่ภายในวัสดุ โดยอาศัยหลักการสะท้อนของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบธาตุที่เป็นองค์ประกอบในวัสดุ ซึ่งจะเห็นว่าสีของก้อนตัวอย่างเป็นสีเดียวกันแสดงว่าเป็นธาตุชนิดเดียวกัน



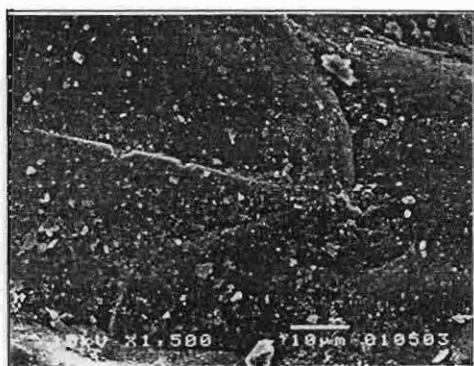
(ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า



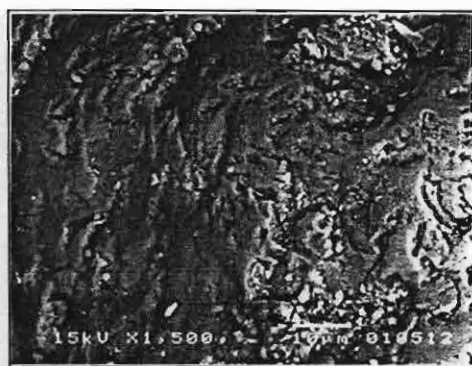
(ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า

ภาพที่ 5.1 ลักษณะของอนุภาคทรายจากประเทศออสเตรเลีย โดยใช้เทคนิค

(ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า



(ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



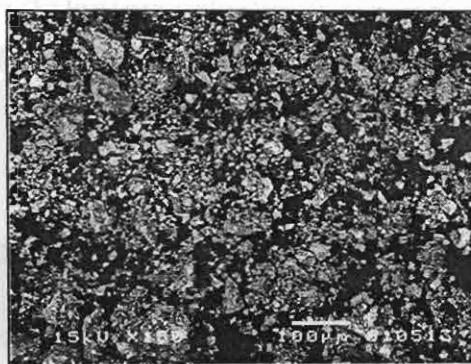
(ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

ภาพที่ 5.2 ลักษณะของอนุภาทรายจากประเทศออสเตรเลีย โดยใช้เทคนิค

(ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

5.1.2.2 ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW)

จากการทดสอบอนุภาค Shell Sand Waste (SSW) ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า ในภาพที่ 5.3(ก) พบว่าอนุภาคของทรายดังกล่าวจะเล็กกว่าทรายจากประเทศออสเตรเลีย อันเนื่องมาจากในกระบวนการทำแบบหล่อและเทส่วนผสมจากเตาหลอม ทรายดังกล่าวจะได้รับความร้อนถึง 600 องศาเซลเซียส อันจะส่งผลให้พันธะภายในถูกทำงานทำให้อนุภาคแตกออกเป็นชิ้นเล็กและพื้นผิวของอนุภาคจากกำลังขยาย 1,500 เท่า ในภาพที่ 5.3(ข) อนุภาทราย SSW จะมีความขรุขระเพิ่มขึ้นและมีเป็นเหลี่ยมมุมกว่าทรายวัตถุดิบอันจะมีผลต่อความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้น เนื่องพื้นผิวที่ขรุขระเป็นเหลี่ยมมุมจะทำให้การดูดซับน้ำดีกว่าอนุภาคเรียบ และเมื่อใช้เทคนิค BEI พบว่าอนุภาคมีสีเข้มมากกว่าที่เป็นสีขาว ดังภาพที่ 5.4 ซึ่งโดยหลักการของเทคนิคนี้จะพบว่าเมื่ออิเล็กตรอนพุ่งชนธาตุที่น้ำหนักระดับสูงในวัสดุจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนสะท้อนกลับได้เร็วและมีจำนวนที่เครื่องตรวจจับไว้มีจำนวนมากขึ้น จึงให้สีของอนุภาคออกมาเป็นสีขาว ในขณะที่ธาตุที่มีน้ำหนักระดับน้อยอิเล็กตรอนจะสะท้อนกลับไปยังเครื่องตรวจจับน้อยจึงให้สีออกมาเป็นสีเทา

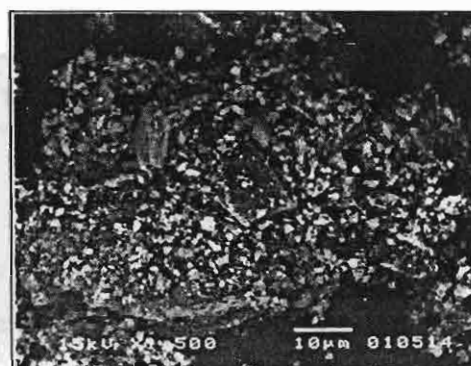
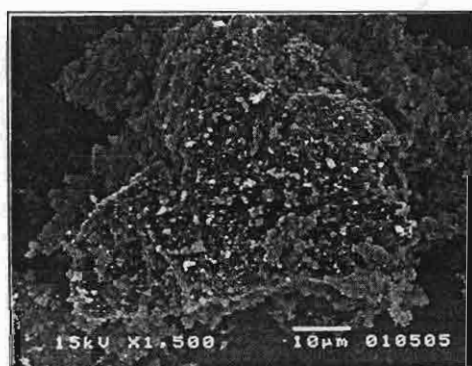


(ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า

(ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า

ภาพที่ 5.3 ลักษณะของอนุภาคทรายจากกลุ่ม SSW โดยใช้เทคนิค

(ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า



(ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

(ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

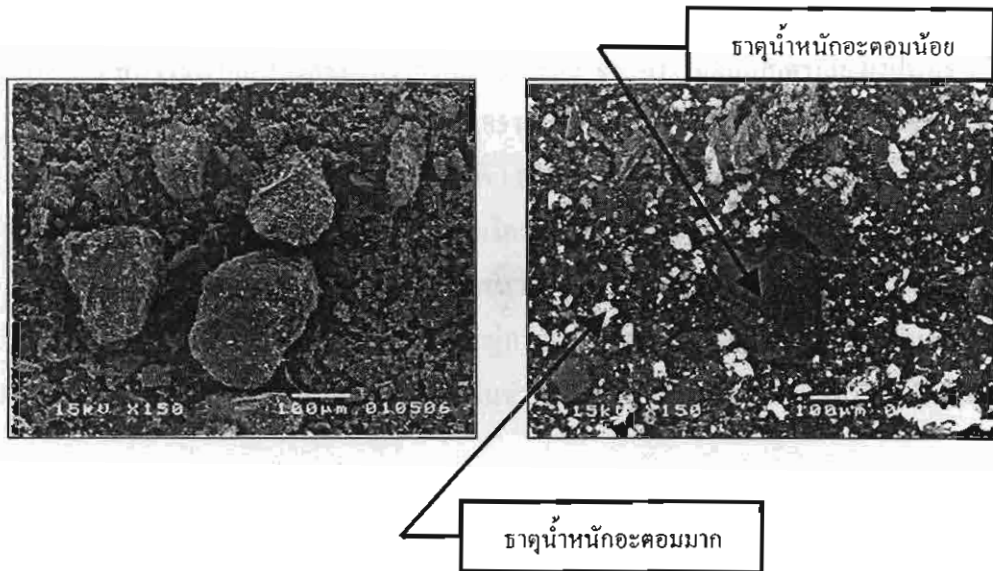
รูปที่ 5.4 ลักษณะของอนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW โดยใช้เทคนิค

(ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

5.1.2.3 ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW)

ด้วยเทคนิคเดียวกันกับที่ใช้ในผงฝุ่นทรายไส้แบบสองกลุ่มข้างต้น พบว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบในกลุ่มนี้จะมีขนาดเล็กกว่าทรายจากประเทศออสเตรเลียอันแสดงว่าอนุภาคทรายมีการแตกออกเป็นชิ้นเล็กกลมากกว่า SSW อันเนื่องจากในกระบวนการทำแบบหล่อทรายดังกล่าวต้องผ่านอุณหภูมิถึง 1,400 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่า SSW ทำให้ผงฝุ่นทรายไส้แบบมีสีคล้ำออกเทาจนถึงเป็นสีทรายไหม้และพื้นผิวมีความขรุขระ ดังแสดงในภาพที่ 5.5(ก) และ 5.6(ก) ตามลำดับ แต่จาก

การทดสอบโดย BEI จะพบว่าปริมาณของส่วนที่เป็นสีขาวมีปริมาณมากกว่าที่มีใน SSW อันบ่งชี้ว่าในผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW เมื่อผ่านกระบวนการทำแบบหล่อภายนอกจะมีปริมาณของโลหะหนักมากกว่าผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW

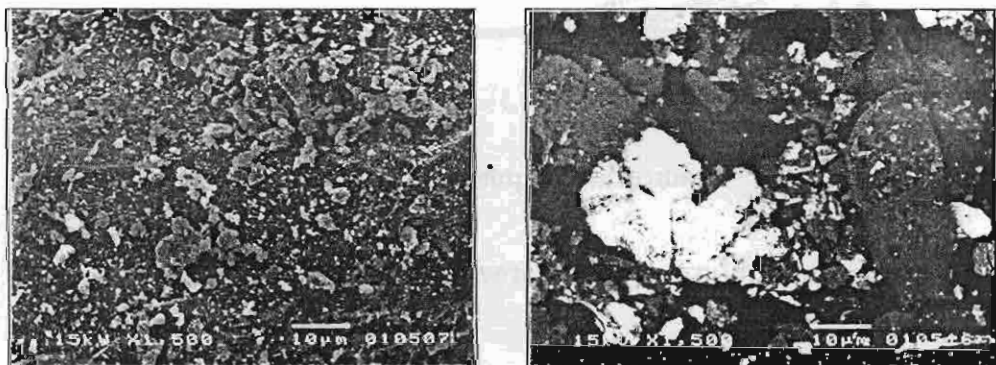


(ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า

(ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า

ภาพที่ 5.5 ลักษณะของอนุภาคผงฝุ่นทรายได้แบบจากกลุ่ม GSW โดยใช้เทคนิค

(ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า



(ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

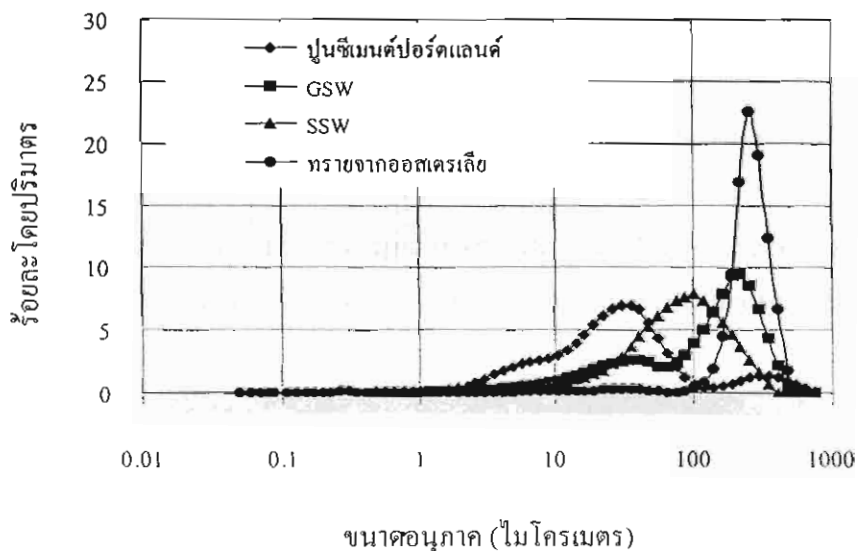
(ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

ภาพที่ 5.6 ลักษณะของอนุภาคผงฝุ่นทรายได้แบบจากกลุ่ม GSW โดยใช้เทคนิค

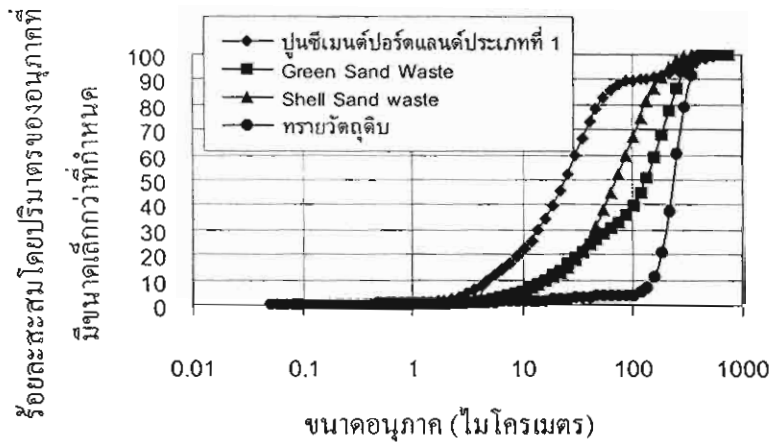
(ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า

5.1.3 การกระจายขนาดคละของอนุภาคผงฝุ่นทรายได้แบบ

ผลการทดสอบการกระจายขนาดคละของอนุภาคของปูนซีเมนต์และผงฝุ่นทรายได้แบบทั้งกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) และ Green Sand and Molding Waste (GSW) แสดงในภาพที่ 5.7 และ 5.8 พบว่าขนาดอนุภาคของทรายวัตถุดิบที่นำเข้าจากประเทศออสเตรเลีย ผงฝุ่นทรายได้แบบชนิด SSW และ GSW มีขนาด 283.69, 102.85 และ 165.41 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (63.44 ไมโครเมตร) และจะเห็นว่าทรายวัตถุดิบจะมีอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 100 ถึง 1000 ไมโครเมตร แต่เมื่อผ่านกระบวนการทำทรายได้แบบแล้วได้ผงฝุ่นทรายได้แบบเป็นของเหลือทิ้งจะพบว่าตั้งแต่ช่วงอนุภาคใหญ่กว่า 40 ไมโครเมตร ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW จะมีค่าขนาดใหญ่กว่าผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในขณะที่ขนาดอนุภาคของผงฝุ่นทรายได้แบบทั้งสองกลุ่มในช่วงที่เล็กกว่า 40 ไมโครเมตร มีค่าไม่แตกต่างกัน



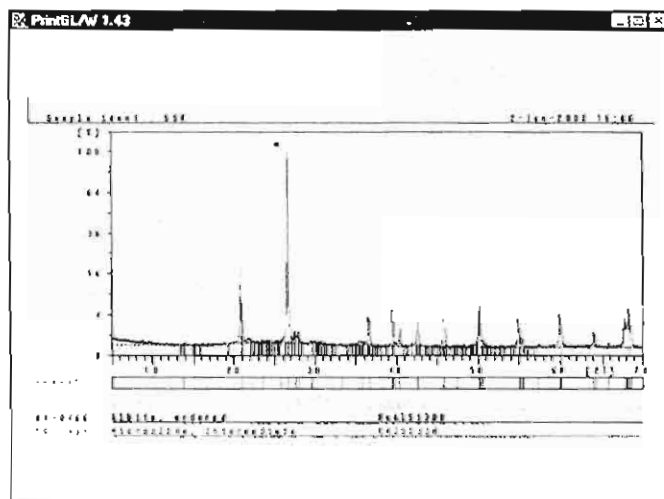
ภาพที่ 5.7 การกระจายขนาดคละของอนุภาคผงฝุ่นทรายได้แบบเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



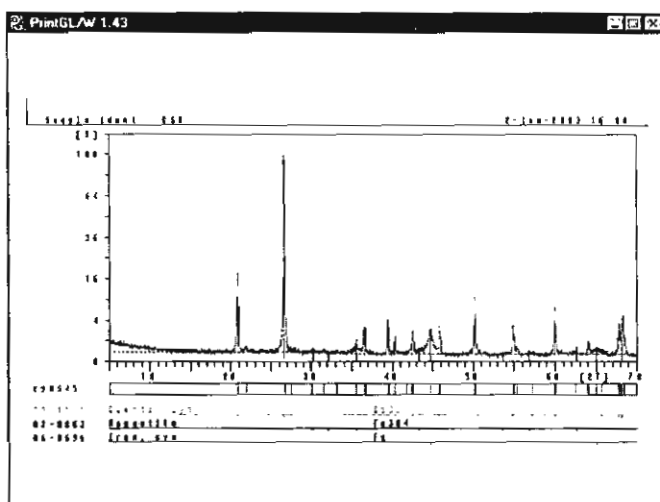
ภาพที่ 5.8 การกระจายขนาดผลสะสมของอนุภาคผงฝุ่นทรายได้แบบเปรียบเทียบกับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

5.1.4 ความเป็นผลึกของอนุภาค

ผลจากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของผงฝุ่นทรายได้แบบทั้ง Shell Sand Waste (SSW) และ Green Sand and Molding Waste (GSW) ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction แสดงในภาพที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ พบว่าผงฝุ่นทรายได้แบบทั้งสองชนิดจะมีส่วนประกอบที่ชัดเจนเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ในขณะที่ผงฝุ่นทรายได้แบบชนิด GSW จะมีไฮดรอกไซด์และเหล็กเป็นองค์ประกอบเพิ่มเติม



ภาพที่ 5.9 ผลการตรวจวัดความเป็นผลึกด้วยด้วยรังสี X-Ray ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW



ภาพที่ 5.10 ผลการตรวจวัดความเป็นผลึกด้วยตัวรังสี X-Ray ของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW

5.1.5 การนำผงฝุ่นทรายใต้แบบไปใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีต

จากผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของผงฝุ่นทรายใต้แบบทั้งกลุ่ม SSW และ GSW พบว่าผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้บางส่วน (Using as Partially Cement Replacement) โดยพิจารณาจากหลักเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete) ที่กำหนดองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพไว้กล่าวคือ ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่มดังกล่าวมีสัดส่วนขององค์ประกอบเคมีเหมือนซีเมนต์ ปริมาณซิลิกอนออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์และไออนอนออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) เกินกว่าร้อยละ 75 โดยมีค่าถึงร้อยละ 93.47 ในขณะที่องค์ประกอบอื่นไม่เกินกว่าข้อกำหนด และในส่วน of ดัชนีพัฒนากำลัง (Strength Activity Index) และความต้องการน้ำ (Water Requirement) มีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน รวมทั้งค่าของความคงตัว (Soundness) โดยวิธีการวัดค่าการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการเร่งด้วยเทคนิคออโตคลีฟตามมาตรฐาน ASTM C 150 (Standard Test Method for Autoclave Expansion of Portland Cement) ซึ่งเป็นดัชนีที่ใช้แสดงศักยภาพในการขยายตัวในระยะยาวอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) หรือแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แสดงในตารางที่ 5.3 ซึ่งพบว่ามีค่าไม่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด (ค่าการขยายตัวไม่เกินร้อยละ 0.8) โดยในการศึกษานี้ได้ทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนไม่เกินร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 5.3

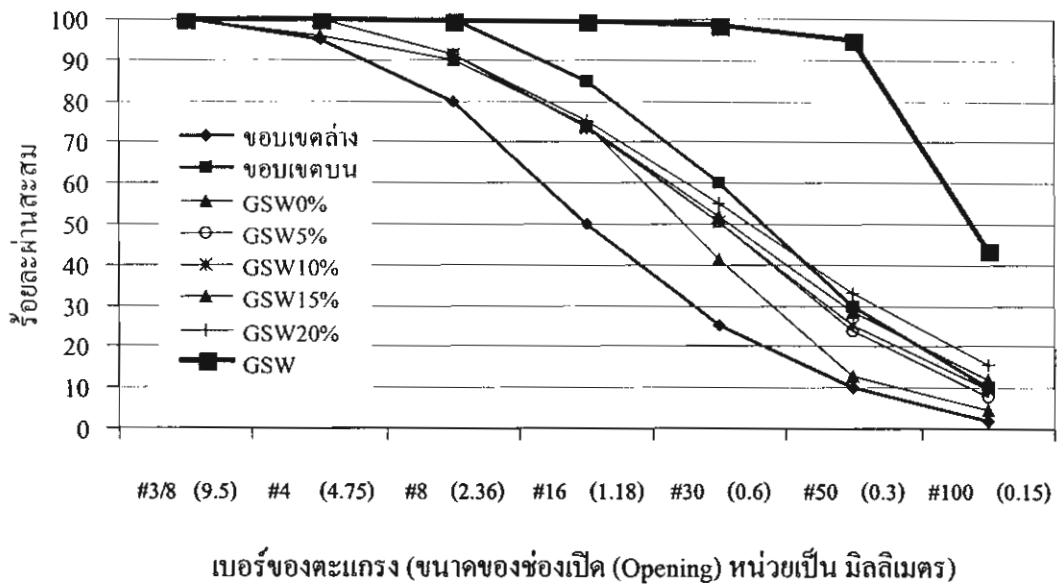
ค่าการขยายตัวของเพสต์ซีเมนต์ที่ผ่านการเร่งด้วยเทคนิคออโตแคล์ฟ

การแทนที่ของผงปูนทรายใต้แบบทั้งกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก (ร้อยละ)	การขยายตัว (ร้อยละ)
0 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์)	0.00
10	0.00
20	0.01
30	0.01
40	0.01

สำหรับผงปูนทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดได้ปรับมาใช้ในการแทนที่ในมวลรวมละเอียด (ทรายธรรมชาติ) ดังนั้นจึงนำมาตรฐานของมวลรวมละเอียด (ASTM C 33 (Standard Specification for Concrete Aggregates)) มาพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

1. ขนาดกละ (Gradation)

จากผลการทดสอบหาการกระจายขนาดกละด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8, 4, 8, 16, 30, 50 และ 100 ของทรายธรรมชาติ (GSW0%) พบว่าการกระจายอยู่ภายในขอบเขตตามมาตรฐาน (พิจารณาจากขอบเขตบนและล่าง) ในขณะที่เมื่อทำการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยผงปูนทรายใต้แบบกลุ่ม GSW โดยน้ำหนัก ที่ร้อยละ 5 (GSW5%), 10 (GSW10%), 15 (GSW15%) และ 20 (GSW20%) จะมีผลทำให้การกระจายขนาดกละของมวลรวมผสมเปลี่ยนแปลง โดยการแทนที่ผงปูนทรายใต้แบบกลุ่ม GSW โดยน้ำหนัก ที่ร้อยละ 20 ทำให้การกระจายขนาดกละเกินกว่าข้อกำหนดตามมาตรฐานกล่าวคือ มีปริมาณร้อยละผ่านที่ตะแกรงเบอร์ 50 และ 100 มากกว่าที่กำหนด (ไม่เกินร้อยละ 10 ถึง 30 สำหรับตะแกรงเบอร์ 50 และไม่เกินร้อยละ 2 ถึง 10 สำหรับตะแกรงเบอร์ 50) นอกจากนั้นจากกราฟความสัมพันธ์ของมวลรวมผสมของทรายธรรมชาติและผงปูนทรายแบบกลุ่ม GSW สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ในช่วงตะแกรงเบอร์ 3/8 ถึง 16 พบว่าเมื่อสัดส่วนการแทนที่ของผงปูนทรายไม่มีผลกระทบต่อการกระจายขนาดกละ ในขณะที่ช่วงตะแกรงเบอร์ 16 ถึง 100 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของขนาดกละของมวลรวมผสมอย่างชัดเจน อันเป็นผลเนื่องมาจากขนาดอนุภาคของผงปูนทรายใต้แบบส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก



ภาพที่ 5.11 การกระจายขนาดตะกอนของทรายธรรมชาติและที่ผสมผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW

- 2. ปริมาณของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดตะแกรงเบอร์ 200 (75 ไมโครเมตร) จะต้องไม่เกินร้อยละ 3.0 โดยจากการทดสอบด้วยการร่อนผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ผ่านตะแกรง พบว่าปริมาณของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.95
- 3. ค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) ซึ่งเป็นดัชนีที่เป็นปฏิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของก้อนวัสดุในมวลรวม โดยในมาตรฐานได้กำหนดค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดจะต้องมีอยู่ในช่วง 2.3 ถึง 3.1 ซึ่งผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 5.4 พบว่ามีค่าอยู่ในเกณฑ์

ตารางที่ 5.4

ค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) ของมวลรวมผสมผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW

ร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายใส่แบบทั้งกลุ่ม SSW ในทรายธรรมชาติประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก	โมดูลัสความละเอียด (F.M.)
0 (ทรายธรรมชาติ)	2.81
5	2.53
10	2.50
15	2.43
GSW	1.40

4. ปริมาณของอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมออกไซด์เทียบเท่า ($\text{Na}_2\text{O}_e, \text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$) ในมวลรวมละเอียดจะต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.60 โดยจากทดสอบและแสดงผลในตารางที่ 5.2 พบว่าผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW มีค่าร้อยละ 0.24

ดังนั้นในการศึกษาจึงทำการแทนที่ผงปูนทรายได้แบบในทรายธรรมชาติในสัดส่วนไม่เกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก กล่าวคือ ทำการแทนที่ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ตามลำดับ

5.1.6 รายละเอียดการผสมคอนกรีตผสมเสร็จ (Ready-mixed Concrete) ผสมผงปูนทรายได้แบบ

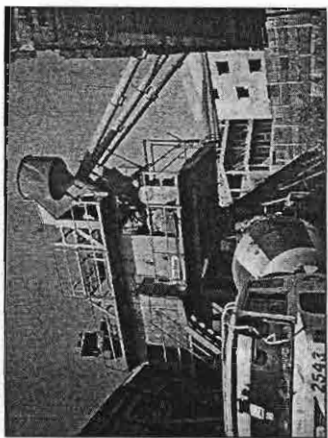
กระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงปูนทรายได้แบบแสดงในภาพที่ 5.12 โดยทำการผสมคอนกรีตที่โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จของบริษัท เอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด (ภาพ ก)) โดยมีกระบวนการเริ่มจากการชั่งผงปูนทรายได้แบบซึ่งมีทั้งกลุ่ม SSW (แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) หรือ GSW (แทนที่ในทรายธรรมชาติ) ตามสัดส่วนของคอนกรีตที่ได้ออกแบบไว้ (ภาพ ข)) จากนั้นจึงนำผงปูนทรายได้แบบขึ้นไปยังเครื่องผสมคอนกรีต (ภาพ ค)) และเริ่มทำการผสมด้วยระบบอัตโนมัติซึ่งควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ในการชั่งส่วนผสมและเวลาในการผสม โดยใช้เวลาในการผสมเท่ากับคอนกรีตปกติคือ ใช้เวลาประมาณ 5 นาที ต่อไปจึงเริ่มปล่อยคอนกรีตผสมเสร็จจากเครื่องผสมลงบนรถขนย้ายคอนกรีต จากนั้นรถขนย้ายคอนกรีตจะวิ่งไปยังส่วนปฏิบัติการทดสอบคุณภาพของคอนกรีตซึ่งอยู่ในบริเวณโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จแล้วจึงเทตัวอย่างคอนกรีตสดปริมาณที่เพียงพอต่อการทำการทดสอบหาค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ลงรถเข็น (ภาพ ง)) ซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ (ภาพ จ)) สำหรับกรณีที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตไม่ได้ตามที่กำหนดจึงส่งขึ้นไปเติมน้ำเพิ่มเติม (ภาพ ฉ)) เพื่อปรับค่าการยุบตัวของคอนกรีตและทำการเดินเครื่องไม่หมุนเป็นเวลา 5 นาทีเสร็จแล้วจึงทำการตรวจสอบหาค่าการยุบตัวอีกครั้ง (ภาพ ช)) หากค่าการยุบตัวไม่ได้ตามที่กำหนดจะดำเนินการเพิ่มปริมาณน้ำและทำตามกระบวนการเดิมจนกว่าจะได้ค่าการยุบตัวตามที่กำหนด เมื่อค่าการยุบตัวมีค่าตามกำหนดแล้วจึงนำคอนกรีตที่ได้มาทำการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักในสภาพสด (Unit Weight) (ภาพ ซ)) และบรรจุลงแบบหล่อที่จัดเตรียมไว้ (ภาพ ฌ)) เมื่อครบที่อายุ 1 วันนับจากการผสมจึงทำการถอดแบบ (ภาพ ฎ)) และนำไปทำการบ่มในน้ำจนกระทั่งถึงอายุที่ทำการทดสอบ (ภาพ ฏ))



(ก) โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ



(ข) การล้างแผงฝุ่นทรายได้แบบ



(ค) เครื่องผสมคอนกรีตผสมเสร็จ



(ง) การเติมน้ำเพื่อปรับค่าการยุบตัวตามที่กำหนดไว้

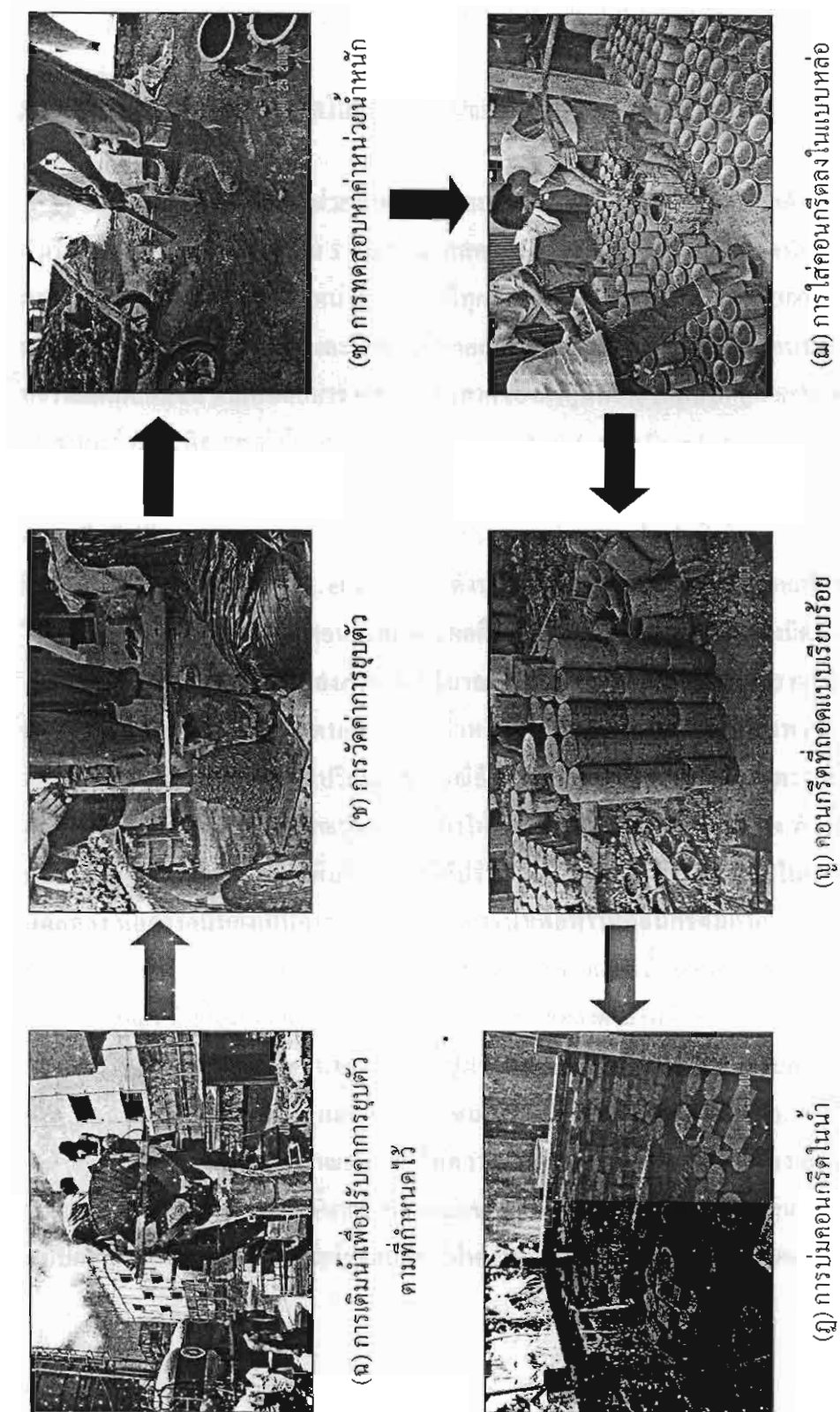


(จ) การทดสอบค่าการยุบตัว



(ฉ) การเทคอนกรีตออกจากรถผสม

ภาพที่ 5.12 กระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายได้แบบ



ภาพที่ 5.12 (ต่อ) กระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงปูนทรายใส่แบบ

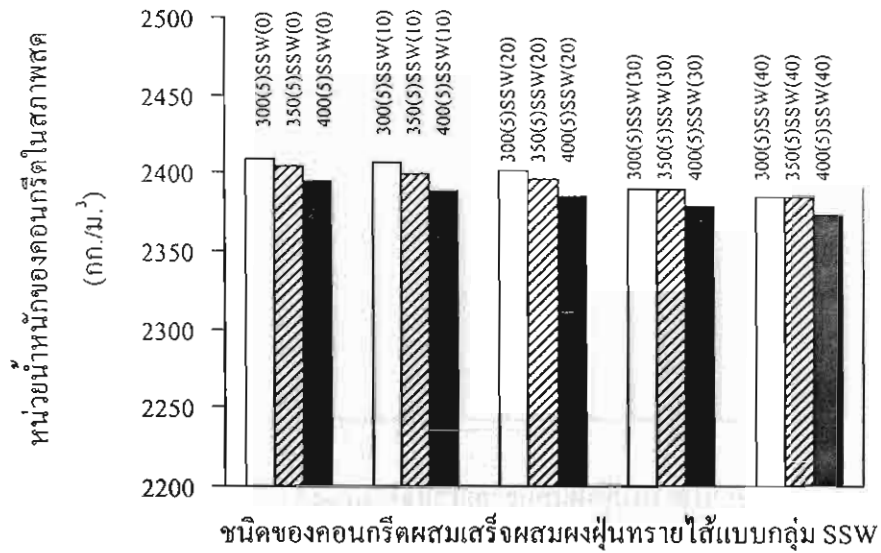
5.2 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบในสภาวะสด

5.2.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาวะสด (Unit Weight)

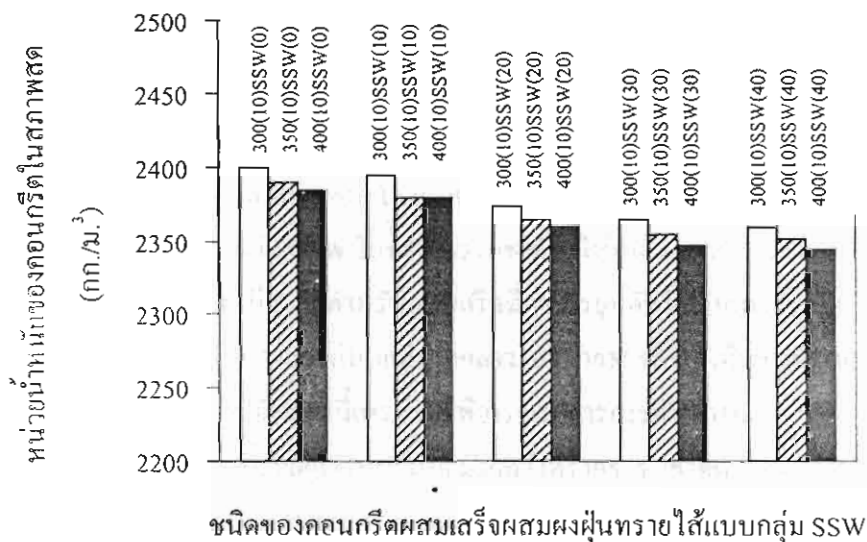
จากผลการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาวะสดซึ่งกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. แสดงในภาพที่ 5.13 พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของผงทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีค่าหน่วยน้ำหนักที่ทุกๆ สัดส่วนปริมาณปูนซีเมนต์ (300, 350 และ 400 กก./ม.³) น้อยกว่าคอนกรีตปกติและมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่ออัตราส่วนการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ที่มีใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ ดังจะพิจารณาได้จากกระจายขนาดคละ (Particle Size Distribution) ในภาพที่ 5.7 และ 5.8 จะเห็นว่าอนุภาคของผงฝุ่นทรายไส้แบบที่มีขนาดใหญ่มีปริมาณมากกว่าปูนซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมีปริมาณอากาศ (Air Content) ที่เกิดขึ้นมากกว่าคอนกรีตปกติเมื่อทำการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Sidney M. et al., p.172) ดังนั้นเมื่อคอนกรีตมีปริมาณอากาศเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ความหนาแน่นโดยรวมของคอนกรีตลดลง ผลคือหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตจึงมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาในประเด็นของการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์จากมีค่าเท่ากับ 300 กก./ม.³ เป็น 350 และ 400 กก./ม.³ จะมีผลกระทบต่อหน่วยน้ำหนักเนื่องจากการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบในลักษณะเดียวกัน ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกรณีอัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบเดียวกัน พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักลดลง ทั้งนี้เพราะการที่คอนกรีตมีปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณของมวลรวมซึ่งมีสัดส่วนในคอนกรีตมากที่สุดลดลง นอกจากนั้นยังเป็นการเพิ่มความต้องการน้ำเพื่อให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. จากการเพิ่มขึ้นดังกล่าวทำให้ปริมาณอากาศเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง นั่นคือหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตจึงมีค่าลดลงตามไปด้วย

ดังเช่นกรณีของการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ เมื่อคอนกรีตมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 5 ± 0.5 ซม. เป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 5.14 และ 5.15 ตามลำดับ ซึ่งหมายถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่ทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง อันเนื่องมาจากปริมาณอากาศที่เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตจึงลดลงและการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน

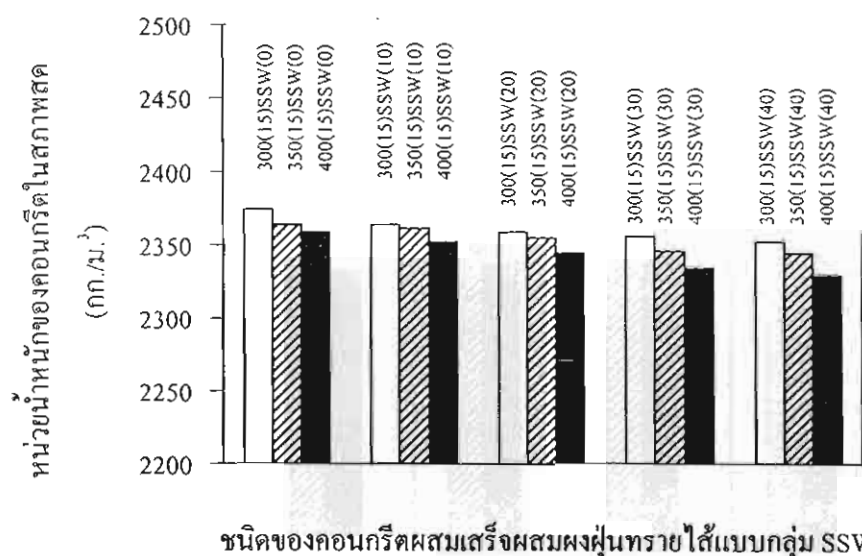


ภาพที่ 5.13 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 5 ± 0.5 ซม.



ภาพที่ 5.14 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 10 ± 0.5 ซม.

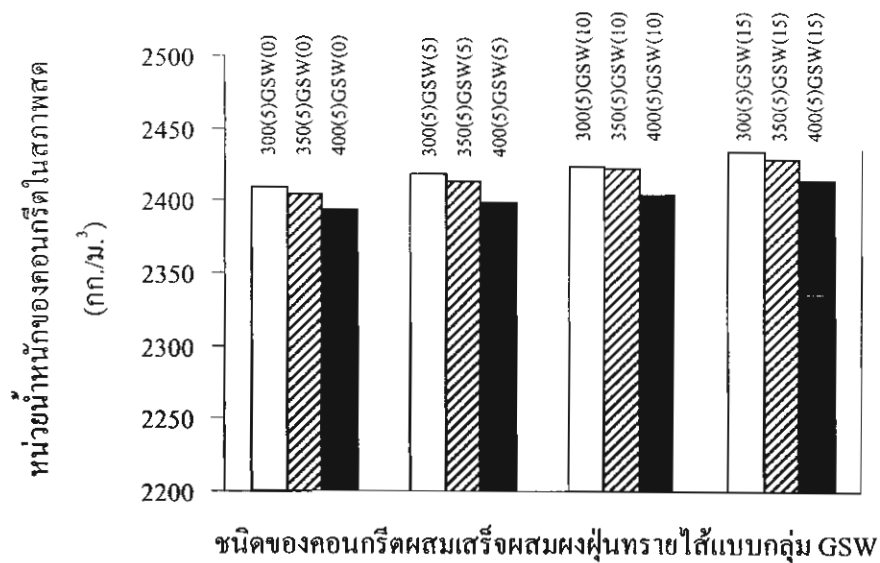
หมายเหตุ สัญลักษณ์ $X(Y)SSW(Z)$ คือ คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ X กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น $Y \pm 0.5$ ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ Z โดยน้ำหนัก



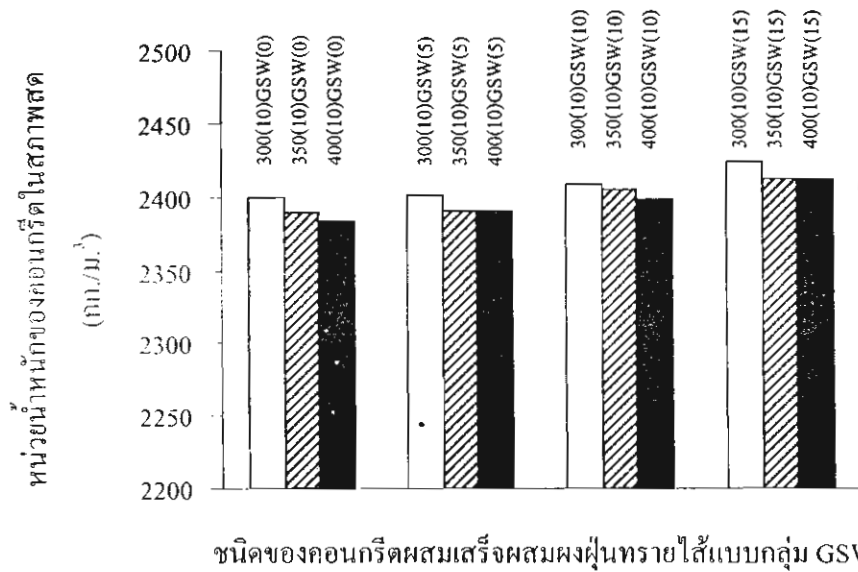
ภาพที่ 5.15 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม.

หมายเหตุ สัญลักษณ์ $X(Y)SSW(Z)$ คือ คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ X กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น $Y \pm 0.5$ ซม. และทำการแทนที่ผงฟูทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ Z โดยน้ำหนัก

ในทางตรงกันข้ามกับผลกระทบเนื่องจากผงฟูทรายได้แบบกลุ่ม SSW คอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฟูทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติทำให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5.16 สำหรับคอนกรีตที่ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. กล่าวคือ เนื่องจากการแทนที่ผงฟูทรายได้แบบกลุ่มดังกล่าวในทรายธรรมชาติเพิ่มขึ้นทำให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เพราะเมื่อพิจารณาถึงการกระจายขนาดกละของผงฟูทรายได้แบบกลุ่ม GSW ซึ่งมีส่วนที่ละเอียดในปริมาณมากกว่าทรายธรรมชาติดังแสดงการกระจายขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงในภาพที่ 5.11 เป็นผลให้อนุภาคของผงฟูทรายได้แบบสามารถเข้าไปเติมแทรก (Filling) ระหว่างอนุภาคของทรายและสามารถลดปริมาณอากาศในคอนกรีตได้ ดังนั้นจึงทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น หน่วยน้ำหนักจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ดังกล่าวข้างต้น และการเพิ่มค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตเป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ดังภาพที่ 5.17 และ 5.18 ตามลำดับ พบว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของผงฟูทรายได้แบบกลุ่ม GSW ที่มีค่าเพิ่มขึ้น

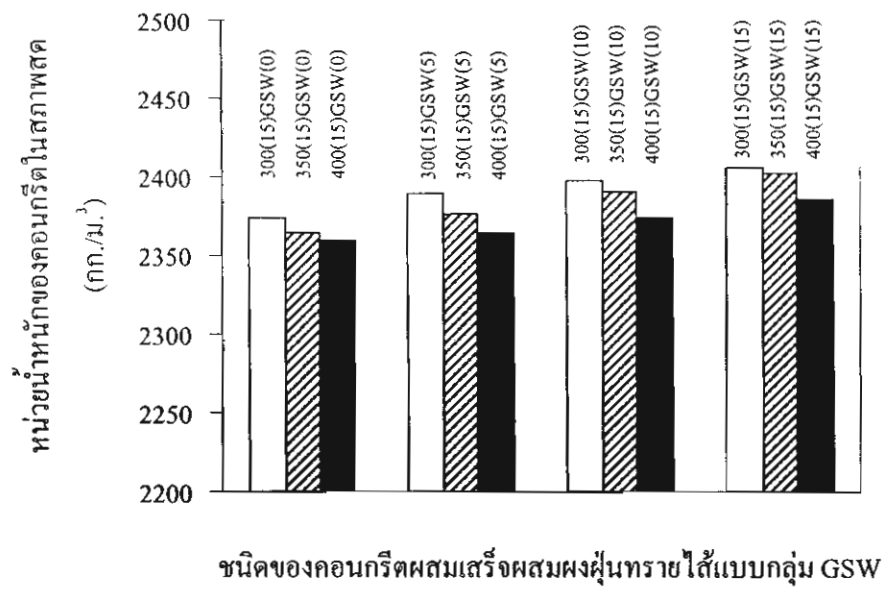


ภาพที่ 5.16 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 5 ± 0.5 ซม.



ภาพที่ 5.17 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 10 ± 0.5 ซม.

หมายเหตุ สัญลักษณ์ $X(Y)GSW(Z)$ คือ คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ X กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น $Y \pm 0.5$ ซม. และทำการแทนที่ผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในตารางธรรมชาติที่ร้อยละ Z โดยน้ำหนัก

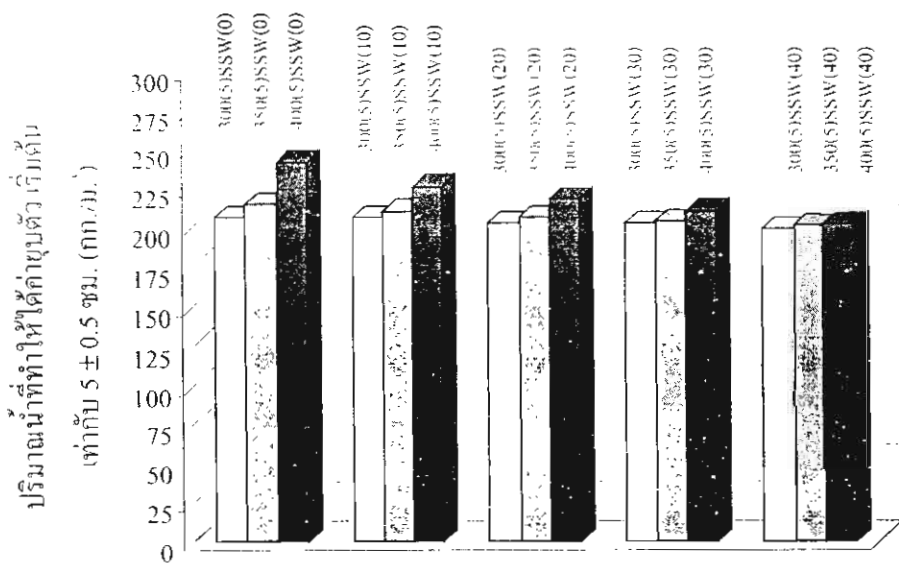


ภาพที่ 5.18 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม.

หมายเหตุ สัญลักษณ์ $X(Y)GSW(Z)$ คือ คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ X กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น $Y \pm 0.5$ ซม. และทำการแทนที่ผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ Z โดยน้ำหนัก

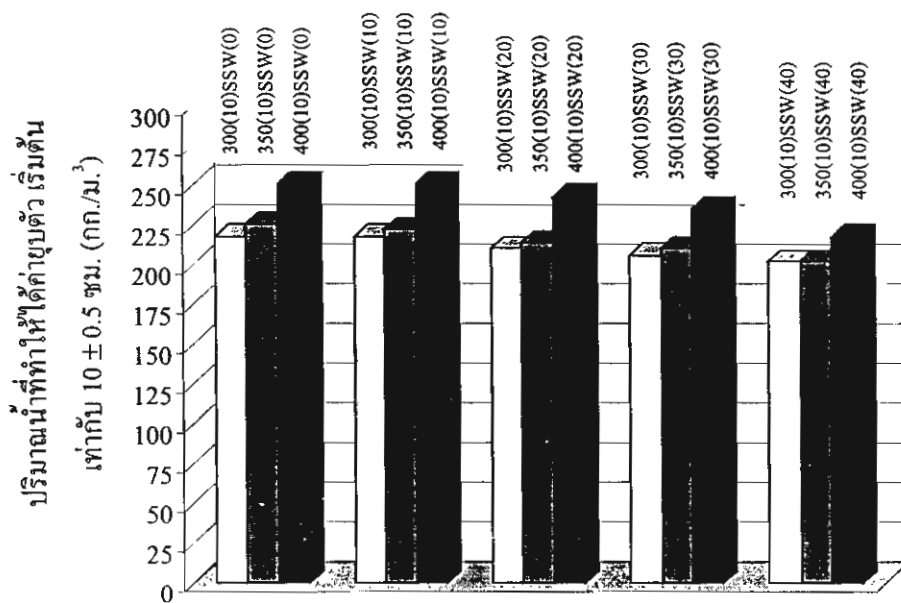
5.2.2 ปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดค่าการยุบตัว (Water Requirement) ของคอนกรีต

จากผลการสอบดังแสดงในภาพที่ 5.19 พบว่าคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงปูนทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีค่าความต้องการน้ำที่ทำให้เกิดค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่คอนกรีตซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ โดยคอนกรีตปกติมีค่าความต้องการน้ำเท่ากับ 242 กก./ม.³ ในขณะที่คอนกรีตผสมผงปูนทรายไส้แบบมีค่า 226, 218, 210 และ 202 กก./ม.³ สำหรับร้อยละการแทนที่ของผงปูนทรายไส้แบบในปูนซีเมนต์เท่ากับ 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ เป็นต้น ซึ่งเป็นผลจากการที่ผงปูนทรายไส้แบบมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ (ดังภาพที่ 5.8) ประกอบกับการที่ผงปูนทรายไส้แบบมีองค์ประกอบที่เป็นแคลเซียมออกไซด์อิสระ (Free CaO) และร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) น้อยกว่าปูนซีเมนต์ โดยมีค่าจากการเก็บตัวอย่างในครั้งที่ 1 เท่ากับร้อยละ 0.39 และ 0.87 ตามลำดับ ทำให้การดูดซับน้ำเข้าสู่อนุภาคได้น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Peter C., p. 74) ถึงแม้ว่าจากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของผงปูนทรายไส้แบบจะมีค่าความต้องการน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ล้วนจึงมีความเป็นไปได้ที่ขนาดของอนุภาคของผงปูนทรายไส้แบบทำให้การกระจายขนาดคละขององค์ประกอบในคอนกรีตมีความต่อเนื่องมากขึ้นจึงเป็นผลให้ค่าความต้องการน้ำที่ทำให้ได้ค่าการยุบตัวตามที่กำหนดลดลงได้



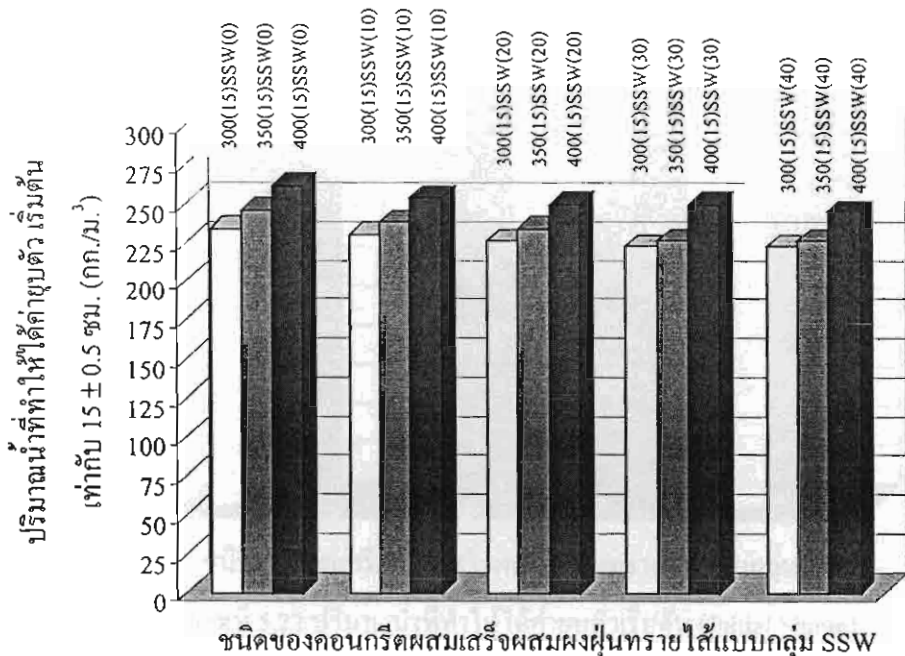
ชนิดของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงปูนทรายไส้แบบกลุ่ม SSW
ภาพที่ 5.19 ปริมาณน้ำที่ทำให้ได้ค่ายุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump)
ของคอนกรีตผสมเสร็จเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม.

สำหรับคอนกรีตที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 และ 400 กก./ม.³ มีความต้องการน้ำที่ทำให้ได้ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีความละเอียดมากที่สุดในคอนกรีตมีปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้จึงต้องเพิ่มน้ำที่เคลือบผิวอนุภาคปูนซีเมนต์เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นซึ่งหมายถึง การเพิ่มน้ำอิสระ (Free Water) (สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล, 2542) ในขณะที่การเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบในปูนซีเมนต์มีผลให้ความต้องการน้ำลดลง ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น



ชนิดของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW
ภาพที่ 5.20 ปริมาณน้ำที่ทำให้ได้ค่ายุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump)
ของคอนกรีตผสมเสร็จเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม.

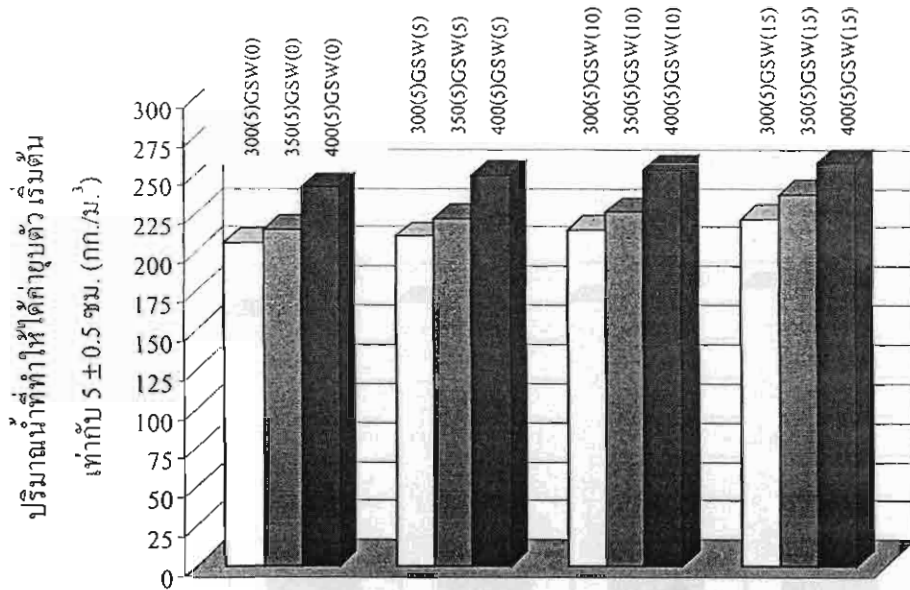
ในกรณีความต้องการน้ำของคอนกรีตที่กำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. แสดงในภาพที่ 5.20 และ 5.21 ตามลำดับ พบว่าการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ที่ให้ผลต่อความต้องการน้ำในลักษณะเดียวกันกล่าวคือ ทำให้ความต้องการน้ำลดลงเมื่อสัดส่วนของผงฝุ่นทรายไส้แบบเพิ่มขึ้น



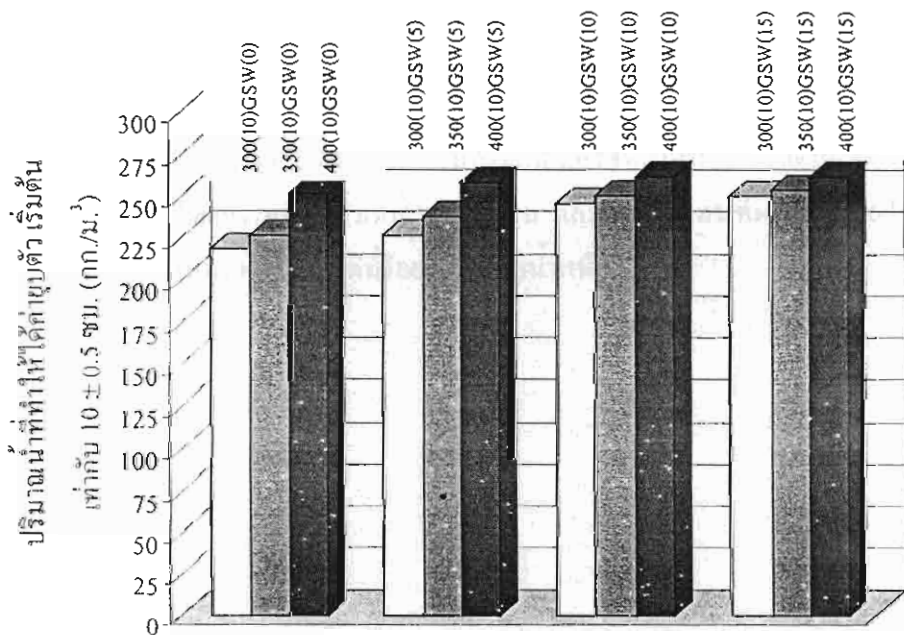
ชนิดของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฟูทรายไส้แบบกลุ่ม SSW
 ภาพที่ 5.21 ปริมาณน้ำที่ทำให้ค่ายุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump)
 ของคอนกรีตผสมเสร็จเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม.

หมายเหตุ สัญลักษณ์ $X(Y)SSW(Z)$ คือ คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ X กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น $Y \pm 0.5$ ซม. และทำการแทนที่ผงฟูทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ Z โดยน้ำหนัก

สำหรับผลของการแทนที่ผงฟูทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่มีต่อความต้องการน้ำแสดงในภาพที่ 5.22 ถึง 5.24 พบว่าคอนกรีตที่ทุกๆ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม.) จะได้รับผลกระทบจากการแทนที่ในลักษณะเดียวกันกล่าวคือ ทำให้ค่าความต้องการน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของการแทนที่ผงฟูทรายไส้แบบในทรายธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับหัวข้อหน่วยน้ำหนักคือ ผงฟูทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีจำนวนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดตะแกรงเบอร์ 50 (ขนาดช่องเปิด (Opening) เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร) อยู่ในปริมาณมากกว่าทรายธรรมชาติทำให้อนุภาคของผงฟูทรายไส้แบบสามารถอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคของทรายขนาดซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าได้ ดังนั้นการที่มีส่วนละเอียดเพิ่มขึ้นจึงทำให้ต้องการน้ำเพิ่มเติมหรือการเพิ่มน้ำอิสระเพื่อช่วยหล่อลื่นให้อนุภาคของมวลรวมละเอียดสามารถเคลื่อนที่ได้ (คอนกรีตมีค่าการยุบตัว) ในขณะที่ผลของการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์จะทำให้ความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

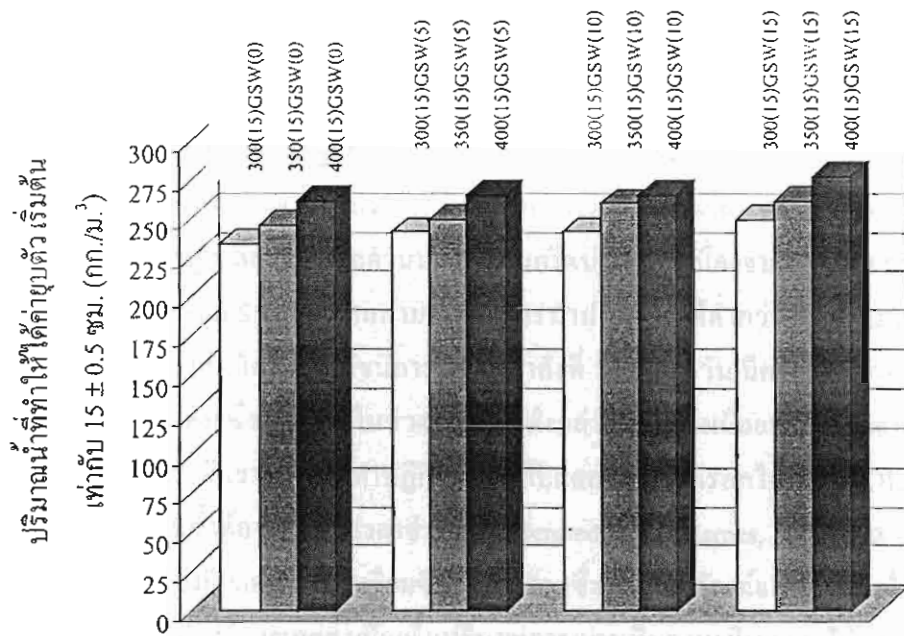


ชนิดของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW
 ภาพที่ 5.22 ปริมาณน้ำที่ทำให้ได้ค่ายุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump)
 ของคอนกรีตผสมเสร็จเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม.



ชนิดของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW
 ภาพที่ 5.23 ปริมาณน้ำที่ทำให้ได้ค่ายุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump)
 ของคอนกรีตผสมเสร็จเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม.

หมายเหตุ สัญลักษณ์ $X(Y)GSW(Z)$ คือ คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ X กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น $Y \pm 0.5$ ซม. และทำการแทนที่ผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในตารางธรรมชาติที่ร้อยละ Z โดยน้ำหนัก

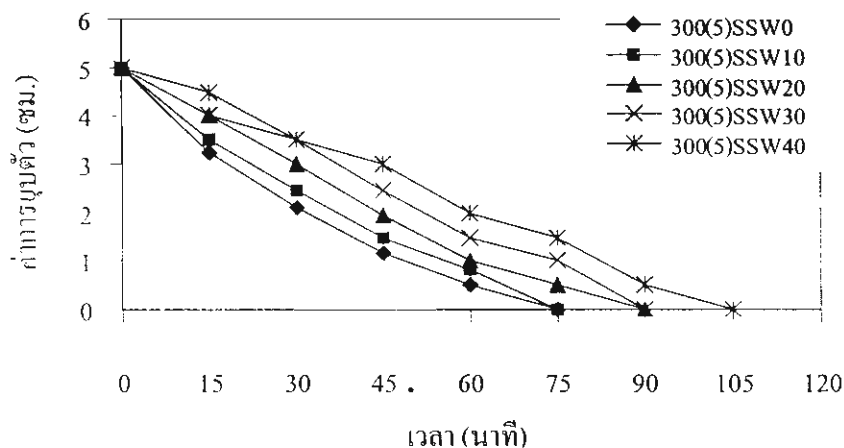


ชนิดของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW
 ภาพที่ 5.24 ปริมาณน้ำที่ทำให้ได้ค่ายุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump)
 ของคอนกรีตผสมเสร็จเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม.

หมายเหตุ สัญลักษณ์ $X(Y)GSW(Z)$ คือ คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ X กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น $Y \pm 0.5$ ซม. และทำการแทนที่ผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ Z โดยน้ำหนัก

5.2.3 ค่าการยุบตัวเริ่มต้นและการสูญเสียค่าการยุบตัว (Initial Slump and Slump Loss)

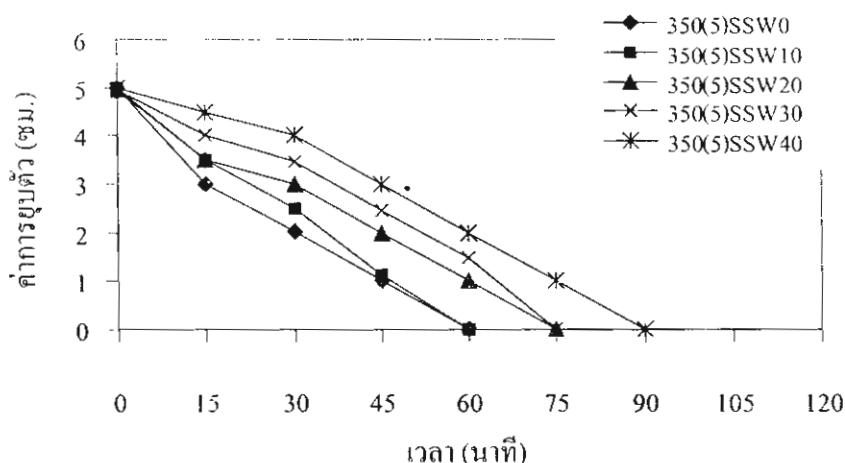
จากผลการทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตซึ่งกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. แสดงในภาพที่ 5.25 ถึง 5.27 พบว่าคอนกรีตซึ่งผสมผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม SSW มีระยะเวลาของการสูญเสียค่าการยุบตัวมากกว่าคอนกรีตปกติ ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุ 2 ประการคือ ผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม SSW มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังจะเห็นได้จากค่าดัชนีการพัฒนากำลังที่ 7 และ 28 วัน มีค่าร้อยละ 78 และ 82 ของปูนซีเมนต์ตามลำดับ ซึ่งหมายถึงในช่วงแรกวัสดุตั้งก่อก่อนข้างเหนียวมาก นอกจากนั้นการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิคจำเป็นต้องทำปฏิกิริยาร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งต้องใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่ง (Bensted, J. and Barnes, P., pp. 328 - 330) ดังนั้นในช่วงเวลาสั้นๆ จึงมีผลต่อทั้งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ทำให้กำลังแก่คอนกรีตมีปริมาณลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไล่แบบและการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีอยู่ในผงฝุ่นทรายไล่แบบ



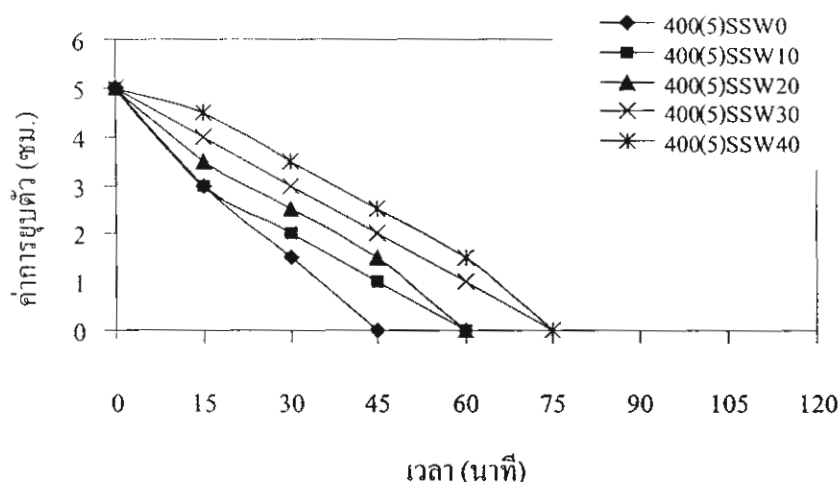
ภาพที่ 5.25 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

อีกประการหนึ่งมาจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงทำให้ปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนียม ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) ลดลงตามไปด้วยกล่าวคือ โดยปกติไตรแคลเซียมอะลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยาในช่วงแรกและเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว (สมการที่ 3.7) ทำให้ต้องผสมยิปซัมในปูนซีเมนต์เพื่อช่วยหน่วงการก่อตัวที่เร็วเกินไปและเมื่อเพิ่มปริมาณผงฟูนทรายไส้แบบจึงยังมีทำให้ปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนียมลดลงมากขึ้น และผลกระทบผงฟูนทรายไส้แบบมีค่ามากขึ้นเมื่อการแทนที่มากกว่าร้อยละ 10 กล่าวคือ เวลาของการสูญเสียค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นทั้งในช่วงของการเกิดการสูญเสียค่าการยุบตัวไปจนกระทั่งคอนกรีตมีค่าการยุบตัวเท่ากับศูนย์ที่ใช้เวลาเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาที่ค่าการยุบตัวเมื่อเวลาผ่านไป โดยกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเพิ่มขึ้นจาก 300 เป็น 350 และ 400 กก./ม.³ ดังแสดงในภาพที่ 5.26 และ 5.27 ตามลำดับ พบว่าอัตราของการสูญเสียค่าการยุบตัวมีค่าเพิ่มขึ้น (Neville, A.M., pp. 202 – 203) อันเป็นผลเนื่องจากเมื่อกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากันที่ 5 ± 0.5 ซม. ซึ่งหมายถึงคอนกรีตมีปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) เริ่มต้นเท่ากัน ประกอบกับการที่ปริมาณของปูนซีเมนต์ที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณน้ำอิสระถูกใช้ในปฏิกิริยาด้วยอัตราที่มากขึ้นส่งผลให้เวลาที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับศูนย์ใช้เวลาน้อยลงตามไปด้วย โดยคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.³ และร้อยละการแทนที่ของผงฟูนทรายไส้แบบเท่ากับ 0 และ 10 มีระยะเวลาที่ค่าการยุบตัวเท่ากับศูนย์เท่ากัน ในขณะที่ร้อยละการแทนที่เท่ากับ 20 และ 30 มีค่าเท่ากัน ซึ่งแสดงว่าเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นผลกระทบเนื่องจากการแทนที่ของผงฟูนทรายไส้แบบลดลง และจะมีลักษณะเดียวกันเมื่อคอนกรีตมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.³

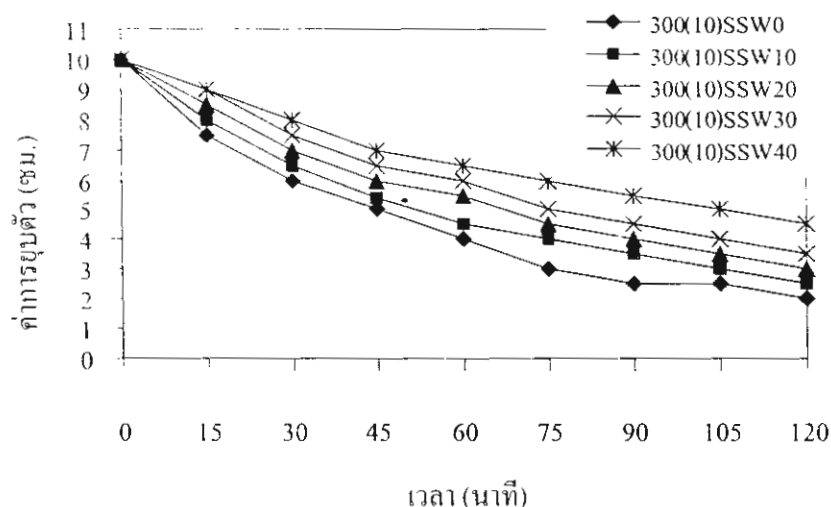


ภาพที่ 5.26 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

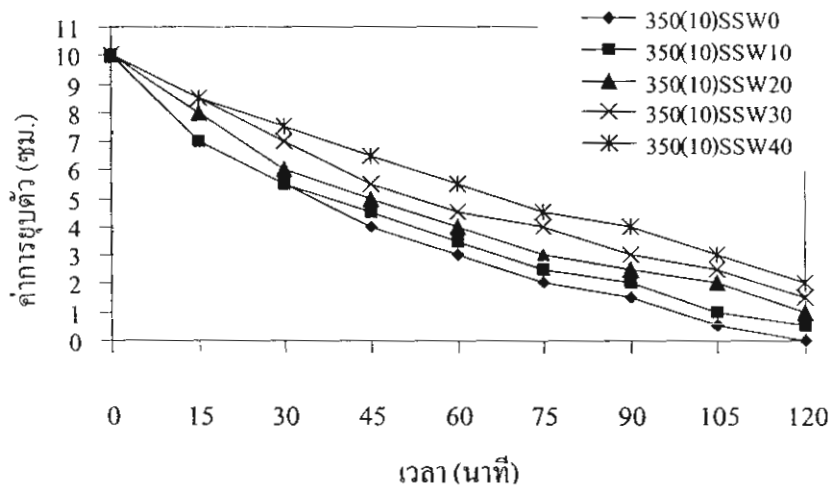


ภาพที่ 5.27 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

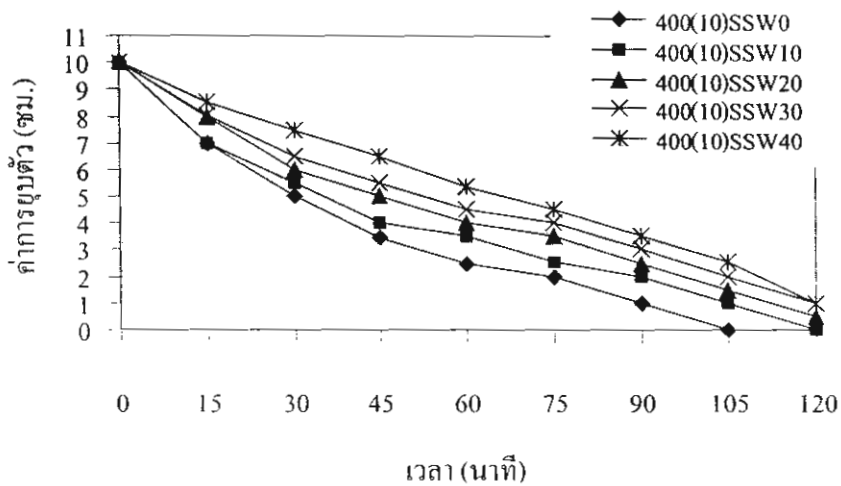
เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเป็น 10 ± 0.5 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 5.28 ถึง 5.30 พบว่าแนวโน้มของเวลาที่เกิดการสูญเสียค่าการยุบตัวมีค่ามากขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอัตราส่วนการแทนที่ของผงฟูทรายใส่แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น และเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตลดลงตามลำดับ



รูปที่ 5.28 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.29 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.30 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก