

บทที่ 2

เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้น

2.1.1 ความหมายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หมายถึง ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ชนิดหนึ่งซึ่งได้จากการบดปูนเม็ด (Clinker) กับแคลเซียมซัลเฟต ($\text{Ca}(\text{SO}_4)$) เมื่อผสมกับน้ำสารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวได้

2.1.2 สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารประกอบหลัก 2 กลุ่มใหญ่ คือ

2.1.2.1 สารประกอบหลัก

(1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยมมีสีเทาเข้ม คุณสมบัติของ C_3S จะเหมือนกับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และสามารถพัฒนากำลังอัดในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะให้ความร้อน 500 จูลต่อกรัม ปริมาณของไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีประมาณร้อยละ 35 – 55

(2) ไดแคลเซียมซิลิเกต เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดยไดแคลเซียมซิลิเกตสามารถมีได้หลายรูปแบบ แต่มีเพียง β - C_2S เท่านั้นที่สามารถคงตัวอยู่ได้ที่อุณหภูมิทั่วไป เนื่องจากเลขโคออดิเนชันของแคลเซียม (Ca^{2+}) มีลักษณะที่ผิดปกติ (Irregular) เป็นผลให้เกิดความไม่เสถียรจึงสามารถทำปฏิกิริยาได้ β - C_2S มีคุณสมบัติในการยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

โดยปล่อยความร้อนประมาณ 250 จูลต่อกรัม มีการพัฒนากำลังในระยะยาวในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีไคแคลเซียมซิลิเกตอยู่ประมาณร้อยละ 15 – 35

(3) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ทำให้เกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1 – 2 วัน แต่จะมีค่าค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มี C_3A อยู่ในปริมาณร้อยละ 7 – 15

(4) เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) จะทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัว ภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดขึ้นประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในปริมาณร้อยละ 5 – 10

2.1.2.2 สารประกอบรอง

(1) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfur Trioxide, SO_3) โดยในการผลิตปูนซีเมนต์ปูนเม็ด (Clinker) จะถูกบดรวมกับยิปซัม (Gypsum, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ หรือ CSH_2) เพื่อป้องกันการก่อตัวที่เร็วเกินไปในทางกลับกันปริมาณของยิปซัมจะต้องมีปริมาณที่ไม่มากเกินไปเพราะจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการแตกร้าวได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมอะลูมิเนตกับยิปซัมทำให้เกิดเอ็ทริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้น เมื่อยิปซัมผสมอยู่น้อยปฏิกิริยาระหว่าง C_3A กับยิปซัมจะเกิดเมื่อซีเมนต์เพสต์อยู่ในสภาพที่เป็นพลาสติก การขยายตัวของปริมาตรเกิดก่อนที่ซีเมนต์เพสต์จะแข็งตัว แต่เมื่อยิปซัมผสมอยู่ในปริมาณที่มากปฏิกิริยาจะเกิดต่อเนื่องไปหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้ว และอาจทำให้เกิดการแตกร้าวได้

(2) ปูนขาวอิสระ (Free Lime, CaO) จะเกิดขึ้นเนื่องจากวัตถุดิบที่มีปูนขาวมากเกินไปสำหรับการทำปฏิกิริยากับ ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al_2O_3) และไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) ในเตาเผาปูนขาวอิสระสามารถรวมตัวกับน้ำ ซึ่งการรวมตัวดังกล่าวหลังจากที่

ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้ว ผลที่ได้คือปริมาตรที่เพิ่มขึ้น ถ้าปูนขาวอิสระมีปริมาณมากพออาจทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ก่อตัวแล้วขยายตัวและแตกร้าวได้

(3) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โดยวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่ จะมีแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้ MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนหลอมตัวเป็นปูนเม็ดที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเหมือนกัน CaO คือ มีปริมาตรที่เพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดความไม่อยู่ตัว (Unsoundness)

(4) ออกไซด์ของอัลคาไลด์ (Alkali Oxide, K_2O และ Na_2O) ออกไซด์ของอัลคาไลด์มีบทบาทสำคัญเมื่อวัสดุผสม (Aggregate) สามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลด์ เรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาอัลคาไลด์ของมวลรวม ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวและอาจทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้

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

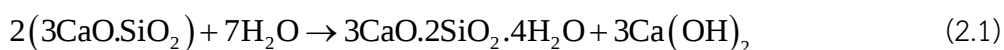
2.1.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

2.1.3.1 ปฏิกิริยาของสารประกอบ

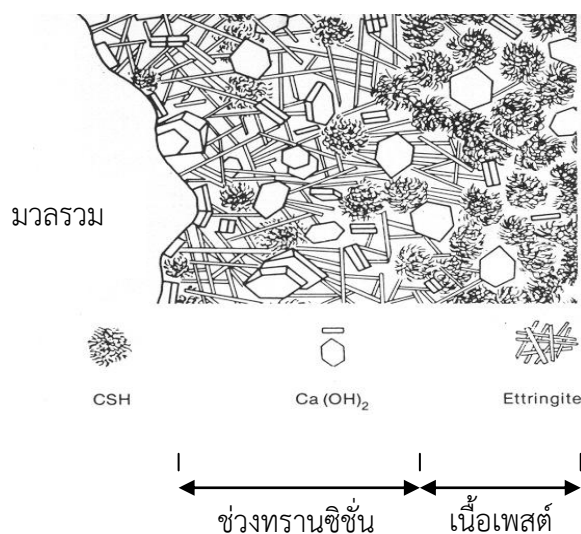
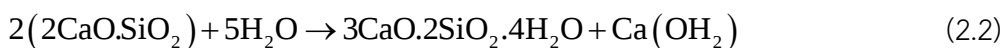
ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวโดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบนี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำสามารถเริ่มต้นด้วยปฏิกิริยาของแต่ละสารประกอบในปูนซีเมนต์

(1) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S, C_2S)

แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด Ca(OH)_2 และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, C-S-H) ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.1



และ



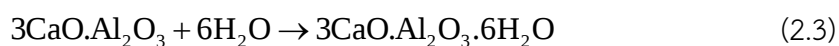
รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S)

จากภาพจะเห็นได้ว่า C-S-H จะอยู่ในภาพของอนุภาคเล็กๆ มีขนาดเท่ากับสารแขวนลอย (เล็กกว่า $1 \mu\text{m}$) มีลักษณะปรากฏเป็นอสัณฐาน (Amorphous) และมีผลึกที่หยาบมาก (Poorly Crystalline) โดยอัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลิเกตใน C-S-H ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิและ

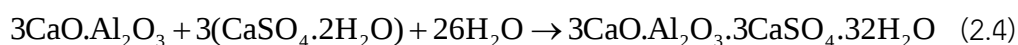
ปริมาณน้ำ สัญลักษณ์ทางเคมีของไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีอัตราส่วน $C_3S_2H_3$ เป็นเพียงค่าเฉลี่ยเท่านั้น

(2) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตและยิบซั่ม

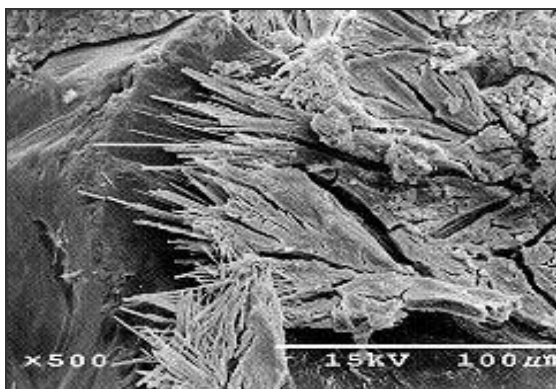
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เฟสส์ ดังสมการที่ (2.3)



เพื่อหน่วงไม่ให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิบซั่มเข้าไปในระหว่างขบวนการบดปูนเม็ด ยิบซั่มจะเข้าไปทำปฏิกิริยาก่อนให้เกิดชั้นของเอ็ททริงไกต์ (Ettringite) ในรูปที่ 2.2 บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการที่ (2.4)



ชั้นของเอ็ททริงไกต์ (Ettringite) ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S)



รูปที่ 2.2 ลักษณะของเอ็ททริงไกต์ (Ettringite) มีรูปทรงอสัณฐาน (Amorphous)

ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเข็มผลึก

(3) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียม อะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาของ C_4AF คล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน C_3A แต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่า และมีความร้อนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาที่น้อยกว่า ยิบซั่มจะหน่วงปฏิกิริยาของ C_4AF มากกว่าที่หน่วงใน C_3A ปฏิกิริยาระหว่าง C_4AF และยิบซั่มจะทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอะลูมินेट (Calcium Sulfoaluminate) และแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์ (Calcium Sulfoferrite) ดังสมการที่ (2.5)



2.1.4 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยปฏิกิริยาเคมีของแต่ละองค์ประกอบแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) และน้ำที่ต่อเนื่องกัน โดยปกติสารประกอบที่เข้าทำปฏิกิริยาได้แก่ เอไลต์ (ไตรแคลเซียมซิลิเกตซึ่งโครงสร้างถูกแทนที่ไฮดรอกซิล) เบลต์ (ไดแคลเซียม

ซิลิเกตซึ่งโครงสร้างถูกแทนที่ไอออนอื่น) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต แคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ แคลเซียมออกไซด์อิสระ ซัลเฟตของอัลคาไลด์ แคลเซียมซัลเฟต และน้ำ

ปฏิกิริยาของเพสต์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่สิ่งอุณหภูมิแวดล้อมประกอบด้วย 4 ขั้นตอน พบว่ามีลักษณะที่คล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในไตรแคลเซียมซิลิเกต ดังต่อไปนี้

(1) ระยะ Pre-induction (นาที่แรก)

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

ไตรแคลเซียมซิลิเกตจะมีการแตกตัวอย่างต่อเนื่องและมีชั้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดขึ้นบนผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิคอนไดออกไซด์ (CaO/SiO_2) ของผลิตภัณฑ์ไฮเดรตนี้มีค่าต่ำกว่าในไตรแคลเซียมซิลิเกตซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สภาวะนี้จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในขณะที่ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตจะแตกตัวและทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอ็ททริงไกท์ (Ettringite) ซึ่งปริมาณของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตที่ทำปฏิกิริยาต่างกันตามชนิดของปูนซีเมนต์ เช่นเดียวกับเฟอร์ไรต์ที่ให้ผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกัน ส่วนเบต้าไคแคลเซียมซิลิเกต ($\beta-C_2S$) จะให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

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

หลังจากช่วงสั้นๆของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ผ่านไปอย่างรวดเร็ว อัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยรวมจะลดลงในช่วงช่วงโมงแรก สาเหตุที่ปฏิกิริยาลดลงเป็นผลเนื่องมาจากความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดร

ออกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในของเหลวที่เริ่มเข้าสู่จุดสูงสุดและกำลังจะลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของ ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) อยู่ในระดับที่คงที่ตามสัดส่วนที่ใช้ในการเกิดของเอ็ททริงไกท์ (Ettringite)

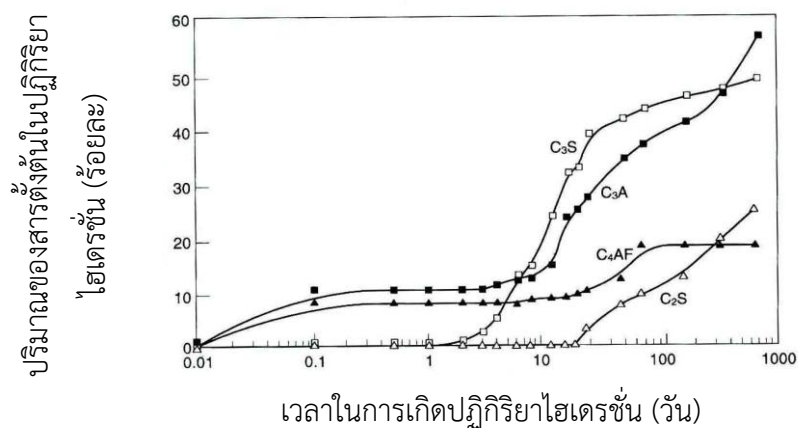
(3) ระยะเร่ง (Acceleration Stage) (3-12 ชั่วโมงหลังการผสม)

ในช่วงนี้จะมีการพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้นอีกครั้งและถูกควบคุมโดยการเกิดและพัฒนาโครงสร้างของผลึกภัณฑ์ไฮเดรชัน ผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเริ่มตกผลึกทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ลดลง ในขณะที่แคลเซียมซัลเฟตจะกลับมาแตกตัวอย่างสมบูรณ์ แต่ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) จะลดลงเนื่องจากการฟอร์มตัวของเอ็ททริงไกท์

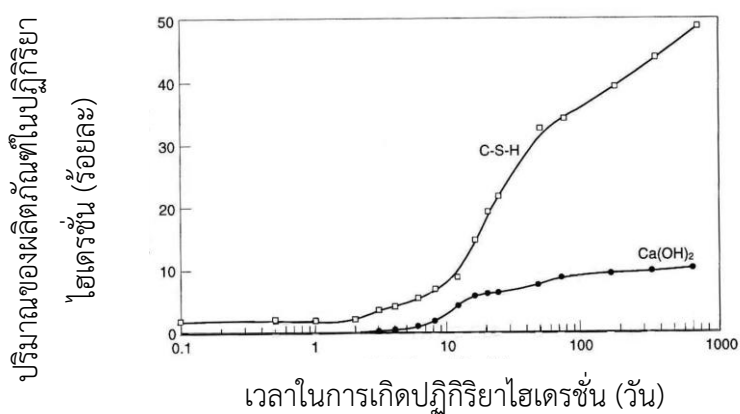
(4) ระยะหลังการเร่ง (Post – Acceleration Period)

ในระยะนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงตามปริมาณของสารตั้งต้นของปฏิกิริยาที่ลดลง ในขณะที่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) มีการก่อตัวอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็น ผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่อเนื่องของไตรแคลเซียมซิลิเกตและเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต และเมื่อแคลเซียมซัลเฟตถูกใช้หมดไปมีผลทำให้ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ลดลง ตามมาด้วยเอ็ททริงไกท์จะก่อตัวขึ้นเริ่มทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และไดแคลเซียมซึ่งมีโมเลกุลของอะลูมิเนียมและ/หรือเฟอร์ไรต์ไดโมนโซลเฟต

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงได้ในรูปที่ 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.3 การพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันในแต่ละสารประกอบหลัก



รูปที่ 2.4 ปริมาณของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ

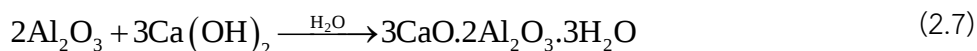
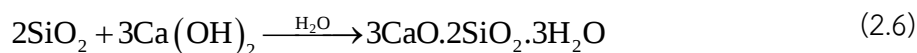
2.1.5 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

2.1.5.1 ความหมายของสารปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Material) ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า วัสดุที่มีส่วนประกอบเป็นซิลิคอน (Siliceous) หรือมีทั้งซิลิคอนและอะลูมินา (Siliceous and Alumineous) ซึ่งที่อุณหภูมิห้องจะไม่ทำปฏิกิริยาแต่เมื่อทำการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ได้

2.1.5.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานของสารปอซโซลาน

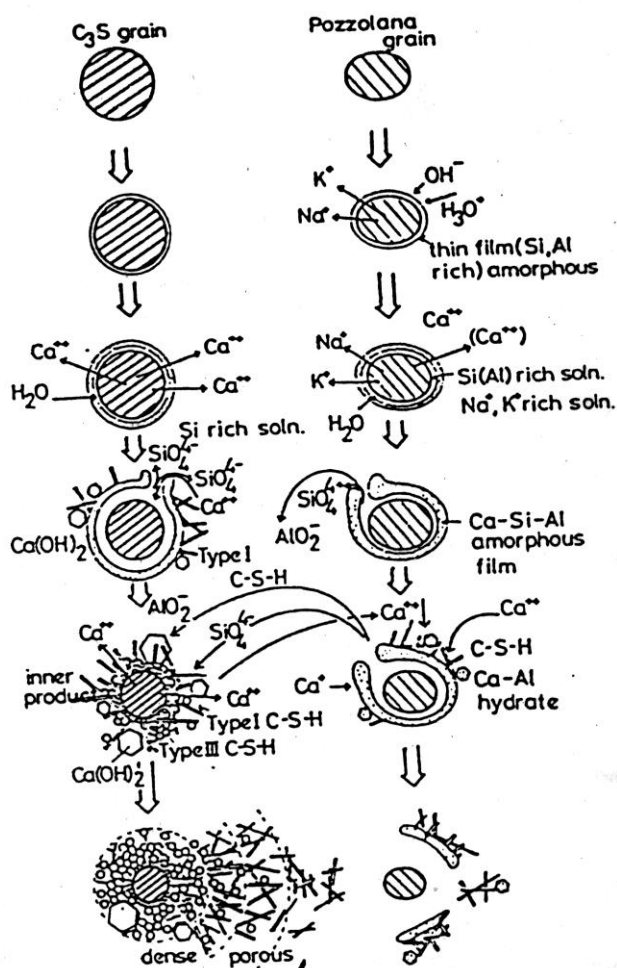
ปฏิกิริยาปอซโซลานคือ ปฏิกิริยาของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และ/หรือ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต โดยที่ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานของซิลิคอนไดออกไซด์ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ในขณะที่ปฏิกิริยาปอซโซลานของอะลูมิเนียมออกไซด์ ได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ($\text{C}_3\text{A}_2\text{H}_3$) ดังสมการที่ (2.6) และ (2.7) ตามลำดับ



2.1.5.3 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีสารปอซโซลาน

จากรูปที่ 2.5 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในระบบซึ่งมีทั้งไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และสารปอซโซลานเริ่มขึ้นจากไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) จะละลายออกจากสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) อย่างอิสระลงไปในของเหลว แต่ไอออนดังกล่าวจะถูกดักจับด้วยอนุภาคที่มีประจุลบจากสารปอซโซลานโดยอาศัยการชนกันและถูกดูดซับที่ไว้ที่ผิวของอนุภาคปอซโซลาน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะเกิดการตกตะกอนที่อัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิคอนไดออกไซด์ (CaO/SiO_2) ในขณะที่บนผิวของสารปอซโซลานจะเกิดขึ้นเช่นเดียวกันแต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิคอนไดออกไซด์ต่ำและมีความพรุนสูง โดยปกติเมื่ออนุภาคปอซโซลานสัมผัส

กับน้ำผิวของสารปอซโซลานมีคุณสมบัติเป็นประจุบวกอันเนื่องมาจากการดึงดูดไฮดรอกไซด์ไอออน (H_3O^+) ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำไว้และจะทำให้มีการแตกตัวของโซเดียมไอออน (Na^+) และโพแทสเซียมไอออน (K^+) และไอออนอื่นๆ ที่ละน้อยตามมา เป็นผลให้เกิดชั้นที่ผิวของอนุภาคปอซโซลานซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิคอนและ/หรืออะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ การละลายของโซเดียมไอออนและโพแทสเซียมไอออนจะช่วยเร่งการแตกตัวของน้ำให้มีปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเร่งการแตกตัวของซิลิเกตไอออน (SiO_4^{4-}) และอะลูมิเนียมไอออน (AlO_2^-) ด้วยและเมื่อรวมกับผลของแคลเซียมไอออนจึงทำให้ความหนาของชั้นบนอนุภาคปอซโซลานเพิ่มขึ้นและแตกออกในที่สุด

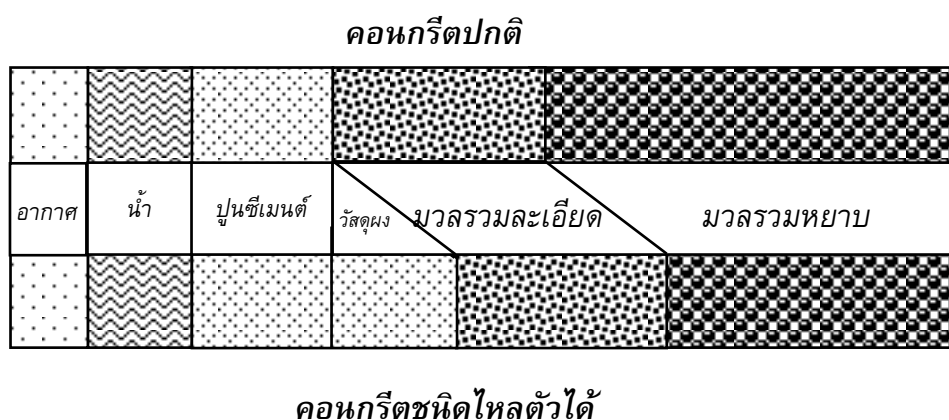


รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลาน

2.2 คอนกรีตชนิดไหลตัวได้

จากปัญหาด้านความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตซึ่งเป็นประเด็นหลักที่เกิดขึ้นในประเทศญี่ปุ่น ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1983 (พ.ศ. 2526) เนื่องจากปัญหาการขาดแคลนแรงงานก่อสร้างที่มีคุณภาพเพิ่มขึ้นส่งผลต่อคุณภาพของงานก่อสร้างลดลงทำให้เกิดแนวความคิดการผลิตคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ที่สามารถไหลเข้าแบบได้ด้วยน้ำหนักตัวเอง โดยไม่ต้องใช้เครื่องสั่นเพื่อให้คอนกรีตมีความอัดแน่นเพิ่มขึ้น โดยต้นแบบแรกของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ถูกพัฒนาจนสำเร็จในปี ค.ศ. 1988 (พ.ศ. 2531)

(5-8) ซึ่งเป็นการปรับปรุงสัดส่วนผสมจากคอนกรีตที่ใช้งานอยู่ปกติ เนื่องจากต้องคำนึงถึงการใช้วัสดุที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดทั่วไปเป็นสำคัญ ดังแสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนของคอนกรีตปกติและคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ในรูปที่ 2.6 โดยคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ที่พัฒนาขึ้นได้กำหนดตามคุณลักษณะของคอนกรีตในสภาพสดซึ่งมีความหมายเริ่มต้นคือ คอนกรีตที่มีความสามารถในการอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (Self-compactable) ไม่มีการแยกตัว (Segregation) ในช่วงอายุต้นและโครงสร้างต้องไม่การแตกร้าวและมีความทนทานเมื่ออยู่ในสภาวะแข็งตัวแล้ว ในความหมายที่สอง Khayat (Khayat, 1999) ได้นิยามไว้คือ คอนกรีตที่สามารถสูงในการไหลแผ่เข้าแบบภายใต้น้ำหนักของตัวเอง มีความอัดแน่นที่ดีแม้ไม่ได้รับการจี้เขย่า และไม่เกิดการแยกตัวและเยิ้ม และสามารถเติมเต็มในแบบหล่อได้อย่างสมบูรณ์ถึงแม้จะมีเหล็กเสริมที่หนาแน่นสูงอยู่ก็ตาม (European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concretes Systems (EFNARC), 2002) ทั้งนี้ คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ต้องมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformability) ของซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ได้โดยไม่เกิดการแยกตัวระหว่างมวลรวมหยาบและมอร์ตาร์ในระหว่างที่คอนกรีตไหลผ่านเหล็กด้วยการออกแบบที่คำนึงถึงการจำกัดปริมาณของมวลรวม มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่ำและใช้สารลดน้ำอย่างแรง (Superplasticizer) (Okamura and Ouchi, 2003; Ouchi, 2005)



รูปที่ 2.6 สัดส่วนผสมระหว่างคอนกรีตปกติกับคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ (Ouchi, 2005)

จากผลของการพัฒนาคอนกรีตชนิดไหลตัวได้อย่างต่อเนื่องทำให้นวัตกรรมคอนกรีตชนิดนี้ได้รับความนิยมมากขึ้น โดยมีการนำมาใช้กับการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงการสำคัญๆ หลายโครงการ เนื่องจากทำให้ระยะเวลาในการก่อสร้างลดลง เนื้อโครงสร้างภายในมีความอัดแน่นเพียงพอแม้เป็นบริเวณที่ยากต่อการจี้เขย่า และตัดปัญหาเรื่องเสียงที่เกิดจากการจี้เขย่า (Okamura and Ouchi, 2003) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Zhu (Zhu et al., 2001) พบว่า การใช้งานคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ในโครงสร้างเสริมเหล็กรับกำลังมีผลทำให้โครงสร้างมีความสม่ำเสมอ (Uniformity) มากกว่าคอนกรีตปกติที่มีการจี้เขย่า และในปี ค.ศ.1996 (พ.ศ. 2539) หลายๆ ประเทศในแถบทวีปยุโรปได้ให้ความสนใจและร่วมกันจัดตั้งกลุ่มเพื่อดำเนินงานร่วมกันในการกำหนดเป้าหมายเพื่อการพัฒนาข้อกำหนด (Specifications) และมาตรฐาน (Standards) ของการใช้งานคอนกรีตชนิดไหลตัวได้สำหรับประเทศในยุโรป พร้อมกับประเทศสหรัฐอเมริกาที่ได้รับเริ่มสนใจกับคอนกรีตชนิดไหลตัวได้มากขึ้นโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมคอนกรีตชิ้นส่วนสำเร็จรูป (Precast Concrete) (Ouchi et al., 2003)

2.2.1 คุณสมบัติเฉพาะของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้

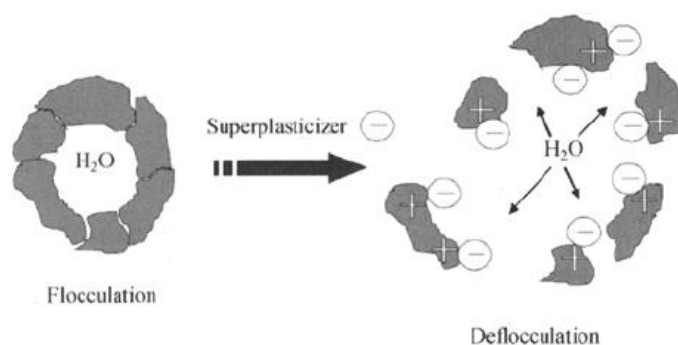
คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ต้องมีสามองค์ประกอบที่สำคัญคือ (ก) มีความสามารถในการไหลเต็มเต็มในแบบหล่อที่มีความสลับซับซ้อนได้อย่างสมบูรณ์ภายใต้น้ำหนักของตัวเอง (ข) มีความสามารถในการไหลผ่านและยึดเกาะกับเหล็กเสริมกำลังภายใต้น้ำหนักของตัวเอง และ (ค) มีความต้านทานต่อการแยกตัวของมวลรวมในระดับสูง โดยความแตกต่างระหว่างคอนกรีตปกติกับคอนกรีตชนิดไหลตัวได้คือ คุณสมบัติของการไหลตัวได้ที่ดีเยี่ยมซึ่งคอนกรีตปกติที่มีค่าการไหลแผ่ที่ดีจะมีค่าการยุบตัว (Slump) ตามมาตรฐาน ASTM C143 (American Society for Testing and Material, 2011) มากกว่า 200 มิลลิเมตร ในขณะที่คอนกรีตชนิดไหลตัวได้มีค่าการไหลแผ่ (Slump

Flow) ตามมาตรฐาน ASTM C1611 (American Society for Testing and Material, 2011) มากกว่า 600 มิลลิเมตร จึงจะถือว่ามีความแข็งแรงสูงสามารถเทเข้าแบบได้โดยไม่ต้องอาศัยการจี้เขย่า นอกจากนั้นจะต้องมีความหนืดที่เหมาะสมในการเอาชนะความเครียดระหว่างอนุภาคของมวลรวมหยาบเพื่อไม่ให้เกิดการติดขัดกันเองในกรณีไหลผ่านสิ่งกีดขวางและไม่มีการแยกตัวระหว่างมวลรวมหยาบกับมอร์ตาร์ด้วย

2.2.1.1 ความสามารถในการเติมเต็ม (Filling ability)

ความสามารถในการเติมเต็ม (Filling ability) ตามนิยามของ European Federation of National Associations Representing (ENFARC) (European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concretes Systems (EFNARC), 2002) และ American Concrete Institute (ACI) (American Concrete Institute, 2007) หมายถึง ความสามารถของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ในการไหลและเติมเต็มที่ว่างทั้งหมดภายในแบบหล่อได้อย่างสมบูรณ์ภายใต้น้ำหนักของตัวเองและยึดตรึงเหล็กเสริมให้เป็นเนื้อเดียวกับคอนกรีต (Skarendahl and Petersson, 2000) คุณสมบัติของคอนกรีตสดสัมพันธ์กับความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ง่ายของคอนกรีตสามารถเปลี่ยนรูปร่างภายใต้ น้ำหนักของตัวเองและไหลเข้าแบบหล่อได้เองอย่างทั่วถึง ความสามารถนี้จะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อแรงเสียดทานภายในของอนุภาคลดลงสามารถทำได้โดยการลดแรงตึงที่พื้นผิว (Surface Tension) โดยการใช้สารลดน้ำอย่างแรงร่วมด้วย หรือการใช้สารเติมเต็มหรือสารควบคุมการแยกตัวเพื่อให้เกิดจุดที่เหมาะสมของการอัดแน่นของอนุภาคขนาดเล็ก การควบคุมปริมาณของมวลรวมหยาบ และการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ (Gaimster and Dixon, 2003; Khayat, 1999; Sonebi and Bartos, 2002; Koehler and Fowler, 2007) เพื่อให้สามารถไหลไปยังจุดที่ต้องการ โดยไม่เกิดการแยกตัว

การเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ช่วยให้ความสามารถในการไหลดีขึ้นเนื่องจากช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาควรรวมลง แต่ในขณะเดียวกันจะทำให้ความหนืดของเนื้อเพสต์มีค่าลดลงด้วยซึ่งไปสู่การเกิดการแยกตัว (Sonebi and Bartos, 2002) และการเยิ้มที่ผิว (Beaupré et al., 1999) เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างการแยกตัวของมวลรวมหยาบที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าเนื้อเพสต์ทำให้มวลรวมจมตัวลงสู่ด้านล่าง ส่วนน้ำจะแยกตัวออกจากเนื้อคอนกรีตขึ้นสู่ผิวด้านบน ผลของการเยิ้มทำให้เกิดการยุบตัวที่ผิวคอนกรีต ตลอดจนการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มากเกินไปย่อมส่งผลต่อกำลังอัดและความคงทนของคอนกรีตด้วยเช่นกัน (Bartos, 1992) ดังนั้นเพื่อให้คอนกรีตมีความคงตัวที่เพียงพอโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างที่มีความลึกมาก เช่น ผนัง หรือกำแพง เป็นต้น เนื่องจากถือว่าเป็นจุดวิกฤติที่คอนกรีตต้องมีความสามารถในการไหลได้เป็นอย่างดีโดยไม่เกิดการแยกตัวหรือเยิ้ม โดยสรุปทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงสูงหรือต่ำเกินไปล้วนมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการเติมเต็มทั้งสิ้น ดังนั้นแนวทางในการลดปัญหา ดังกล่าวคือ การใช้สารลดน้ำอย่างแรงผสมร่วมซึ่งไม่เพียงแต่เป็นการช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคภายในโดยการกระจายอนุภาคของปูนซีเมนต์ออกจากกัน แต่ยังคงรักษาความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างและคง ความหนืดไว้ด้วย (Agulló et al., 1999; Chandra and Björnström, 2002; Björnström and Chandra, 2003) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วน้อยกว่ากรณีการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์แต่เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.7 กระจายอนุภาคปูนซีเมนต์ออกจากกันด้วยสารลดน้ำอย่างแรง (Agulló et al., 1999)

การกระจายขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution, PSD) ของวัสดุผงที่มีผลต่อความสามารถในการเติมเต็มแล้วด้วยเขนเดียวกัน เนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดจากอนุภาคภายในสามารถลดลงได้ด้วยการผสมรวมปูนซีเมนต์และวัสดุผงที่มีขนาดสม่ำเสมอใกล้เคียงกันหรือเล็กกว่า โดยหากมีการใส่วัสดุผงขนาดเล็กในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้วัสดุมีพื้นที่ผิวมากย่อมกระทบถึงความต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นตามไปด้วย (Yahia et al., 2005; Jau and Yang, 2010) ดังนั้นจึงการเลือกวัสดุผงที่เหมาะสมในการผสมรวมกันไม่ว่าการผสมรวมตั้งแต่สองหรือสามชนิดขึ้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ ทั้งนี้เพื่อที่จะนำข้อดีของวัสดุผงอีกชนิดมาช่วยลดข้อจำกัดของวัสดุผงอีกชนิดหนึ่ง อาทิเช่น วัสดุบางชนิดดูดซึมน้ำส่งผลให้ความสามารถในการทำงานลดลงและอุณหภูมิภายในสูงขึ้น แต่ในทางตรงข้ามกลับช่วยพัฒนากำลังอัดและความคงทนของคอนกรีตในสถานะที่แข็งตัวแล้วได้ (Belaidi, 2012) โดยสามารถสรุปแนวทางในการเพิ่มความสามารถในการเติมเต็ม ดังตารางที่ 2.1

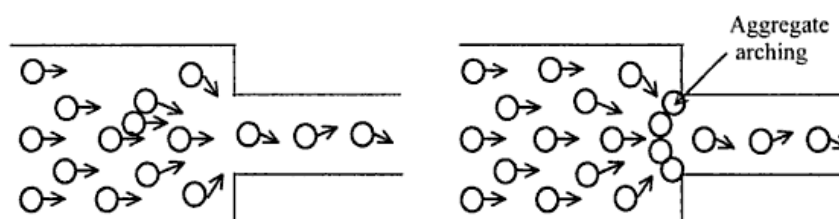
ตารางที่ 2.1 แนวทางในการเพิ่มความสามารถในการเติมเต็ม (Skarendahl and Petersson, 2000)

เพิ่ม	ลด
ความสามารถในการเปลี่ยนรูปได้ซีเมนต์เพสต์	แรงเสียดทานภายในอนุภาค
ใช้สารลดน้ำอย่างแรง	ลดปริมาณมวลรวมหยาบ (เพิ่มปริมาณซีเมนต์เพสต์)
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่ำ	วัสดุผงต้องมีขนาดสัมพันธ์กับมวลรวมและ ปูนซีเมนต์ที่ใช้

2.2.1.2 ความสามารถในการไหลผ่าน (Passing ability)

ความสามารถของคอนกรีตในการไหลผ่านเหล็กเสริมในแบบหล่อ ขึ้นอยู่กับระดับความสามารถของคอนกรีตในการไหลผ่านเหล็กเสริมที่มีรูปแบบของการจัดเรียงและความซับซ้อนของเหล็กเสริมที่ต่างกัน (4) ปัจจัยสำคัญคือ ช่องว่างระหว่างเหล็กเสริมที่จะต้องนำมาพิจารณาในการเลือกใช้ขนาดและรูปร่างของมวลรวมหยาบ รวมถึงปริมาณของมอร์ตาร์ในคอนกรีตด้วย (Okamura and Ouchi, 2003) โดยเฉพาะโครงสร้างที่มีการเรียงตัวของเหล็กเสริมอย่างหนาแน่นทำให้ต้องใช้ปริมาณของเพสต์ในส่วนผสมมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมหยาบ โดยความสามารถในการไหลผ่านตามนิยามของ Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systemes de Construction et Ouvrages (RILEM) Technical committee (18), ENFARC (European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concretes Systems (EFNARC), 2002) และ ACI (American Concrete Institute, 2007) หมายถึงความสามารถของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ในการไหลผ่านช่องเปิดที่มีความหนาแน่น ซึ่งได้แก่ ช่องว่างระหว่างเหล็กเสริมโดยไม่มีการแยกตัวหรือติดขัด ดังนั้นเมื่อทำการเทคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ลงใน

โครงสร้างที่มีเหล็กเสริมหนาแน่น คอนกรีตต้องสามารถผ่านระหว่างเหล็กเสริมไปได้อย่างราบเรียบ โดยไม่เกิดการติดขัดดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กลไกการติดขัดของมวลรวมในระหว่างการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง

(Skarendahl and Petersson, 2000)

รูปที่ 2.8 แสดงกลไกของการติดขัดซึ่งเป็นผลมาจากการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของมวลรวม และระหว่างของมวลรวมกับเหล็กเสริม เมื่อคอนกรีตต้องไหลผ่านช่องขนาดเล็กทำให้เกิดผลต่างของความเร็วในการไหลของมอร์ต้ากับมวลรวมหยাবนำไปสู่การสะสมตัวในบริเวณนั้นเพิ่มขึ้น มวลรวมหยাবบางก้อนอาจติดขัดจนนำไปสู่การติดขัดในส่วนที่เหลือของคอนกรีต การติดขัดเกิดได้ง่ายหาก มวลรวมหยาบมีขนาดใหญ่และปริมาณมาก ดังนั้นถึงแม้คอนกรีตชนิดไหลตัวได้จะมีความสามารถในการเติมแทรก และการต้านทานการแยกตัวที่ดีเยี่ยมแล้วนั้น ยังสามารถเกิดการติดขัดได้หากมีขนาดและปริมาณมวลรวมหยาบขนาดใหญ่ในปริมาณมาก โดยสรุปปัจจัยสำคัญของการติดขัดขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง รูปทรงและปริมาณของมวลรวมหยาบ (Roussel et al., 2009; Koehler and Fowler, 2010) ดังนั้นการลดปริมาณและขนาดของมวลรวมหยาบลงช่วยแก้ปัญหการติดขัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเฟสดีในส่วนผสมคอนกรีตยังมีผลต่อปริมาณมวลรวมหยาบที่ลดลงและยังลดแรงเสียดทาน

ระหว่างอนุภาคของมวลรวมหยาบ (Koehler, 2009; Girish et al., 2010) ส่วนความหนืดพลาสติก (Plastic Viscosity) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของมวลรวมหยาบที่ใช้ (Zerbino et al., 2009) ดังนั้น เพสต์ที่มีความหนืดเพียงพอจะช่วยป้องกันการสะสมตัวของมวลรวมหยาบเพื่อหลีกเลี่ยงการติดขัดได้อีกทั้งยังสามารถนำวัสดุผงอื่นมาผสมรวมเพื่อช่วยให้ความหนืดเพิ่มขึ้น อาทิเช่น เถ้าลอย ผงหินปูน เป็นต้น เนื่องจากการกระจายตัวและอัดแน่นระหว่างของอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ดีขึ้นส่งผลให้ความต้องการน้ำลดลงดังสรุปตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แนวทางในการเพิ่มความสามารถในการไหลผ่าน (Skarendahl and Petersson, 2000)

เพิ่ม	ความสอดคล้อง
ความหนืดในการลดการแยกตัวของมวลรวมหยาบ	ขนาดช่องว่างและลักษณะของมวลรวมหยาบ
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่ำ	ลดปริมาณมวลรวมหยาบ
ใช้สารเพิ่มความหนืด	ลดขนาดใหญ่สุดของมวลรวม

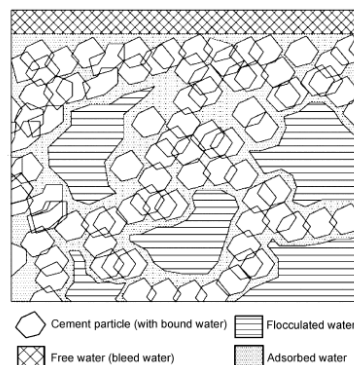
2.2.1.3 ความสามารถในการต้านการแยกตัว (Segregation Resistance)

คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ต้องรักษาสภาพความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ในส่วนผสมคอนกรีตทั้งในระหว่างการขนส่งและการเทเข้าแบบหล่อ (European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concretes Systems (EFNARC), 2002) นั้นหมายถึงการแยกตัวของคอนกรีตในสภาวะสดคือ การไม่เป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุในส่วนผสมคอนกรีตอาจเกิดขึ้นได้ทั้งในระหว่างการขนส่ง หรือในระหว่างการเทเข้าแบบหล่อ ลักษณะของการแยกตัวจะ

เกิดขึ้นระหว่างการขนส่งและการเทคอนกรีตซึ่งเรียกว่า การแยกตัวแบบเคลื่อนที่ (Dynamic Segregation) แต่หลังจากการเทคอนกรีตแล้วมวลรวมหยาบอยู่กับที่และน้ำอิสระแยกออกมาเป็นเหตุให้เกิดการแยกตัวแบบนิ่งเรียกว่าการแยกตัวแบบคงที่ (Static Segregation) (Libre et al., 2010; Tregger et al., 2012) โดยลักษณะของการแยกตัวที่สำคัญ คือ (ก) การแยก (ข) ซีเมนต์เพสต์และมวลรวมแยกตัว (ค) มวลรวมหยาบแยกตัวจนเกิดการติดขัด และ (ง) การกระจายตัวของอากาศในโพรงไม่สม่ำเสมอ (Skarendahl and Petersson, 2000,) ดังนั้นเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการแยกตัวระหว่างน้ำกับมวลรวมจึงต้องลดปริมาณส่วนที่เป็นเพสต์ผสมลงหรือการใช้วัสดุผงที่มีพื้นที่ผิวสูงผสมรวมได้ (Chongzhi et al., 2005; Han et al., 2011) โดยปริมาณของน้ำที่ผิวของมวลรวม (Free Water) ต้องมีปริมาณน้อยลงด้วยเพื่อป้องกันการแยก ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งการแยกโดยการที่น้ำขึ้นสู่ผิวบนหรือถูกขังอยู่บริเวณใต้มวลรวมหยาบที่ขัดกันอยู่กับเหล็กเสริมทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมไม่แข็งแรงส่งผลต่อกำลังอัดและความคงทนของคอนกรีตได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.9 การแยก (ก) ภายถ่ายลักษณะการแยก (ข) การกระจายอนุภาคของน้ำในซีเมนต์เพสต์

(Han et al., 2011)

ความต้านทานการแยกตัวที่ดีหมายถึง การกระจายขนาดของมวลรวมในคอนกรีตต้องสัมพันธ์กันในทุกตำแหน่ง แสดงว่าไม่มีการแยกตัวทั้งในแนวตั้งและแนวนอน การต้านทานการแยกตัวถือได้ว่าเป็นส่วนสำคัญของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้เนื่องจากการต้านทานการแยกตัวที่ไม่ดีทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างไม่ดีตามไปด้วย เกิดการติดขัดรอบเหล็กเสริม และมีการหดตัวแห้งสูง รวมถึงความไม่สม่ำเสมอของกำลังอัดของคอนกรีต (Bui et al., 2002) โดยความต้านทานการแยกตัวที่ดีต้องอาศัยส่วนประกอบที่สำคัญคือ ส่วนผสมของคอนกรีตต้องมีความความหนืดเพิ่มมากขึ้นซึ่งสามารถทำได้ 3 วิธีขึ้นอยู่กับความพร้อมการใช้งานของวัสดุได้แก่ คือ (ก) การใช้ปริมาณวัสดุผงในส่วนผสมระดับสูง (ข) การใช้สารเพิ่มความหนืด (Viscosity Modifying Agent) หรือ (ค) การใช้รวมกันทั้งสองอย่าง (Heirman et al., 2008) โดยการใช้สารลดน้ำอย่างแรงเพื่อเพิ่มความสามารถของการไหลอาจส่งผลต่อความคงตัวของคอนกรีตได้ เนื่องจากการไหลตัวที่ดีทำให้ความหนืดลดลง ในขณะที่ความหนืดถือว่าเป็นตัวแปรสำคัญในการช่วยต้านทาน การแยกตัวของมวลรวมหยาบ ทั้งนี้เพราะความหนืดสามารถช่วยยึดอนุภาคของมวลไว้ไม่ให้เกิดการแยกตัว รวมถึงช่วยลดแรงเสียดทานของอนุภาคมวลรวมหยาบในระหว่างการไหลได้ (Safawi et al., 2004) สำหรับแนวทางในการป้องกันการแยกของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้สรุปได้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แนวทางในการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการแยกตัว (Skarendahl and Petersson, 2000)

ลดการแยกตัวของมวลรวมหยาบ	ลดการเยิ้ม
จำกัดปริมาณของมวลรวม	ปริมาณน้ำต่ำ
ลดขนาดใหญ่สุดของมวลรวม	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่ำ
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่ำ	ผสมวัสดุผงที่มีพื้นที่ผิวสูง
ใช้สารเพิ่มความเหนียว	ใช้สารเพิ่มความเหนียว

2.2.2 การออกแบบส่วนผสม (Mix Design Methods)

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ต้องพิจารณาคุณสมบัติของคอนกรีตสดซึ่งตรงกันข้ามกับคอนกรีตปกติ โดยสัดส่วนวัสดุที่ใช้ถือเป็นเรื่องสำคัญซึ่งการออกแบบส่วนผสมของทั้งคอนกรีตชนิดไหลตัวได้และคอนกรีตปกติโดยปริมาตรจะพิจารณาจากวัสดุที่มีในแต่ท้องถิ่นเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่าย (43) การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตปกติเริ่มจากการกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เพื่อให้สอดคล้องกับกำลังอัดที่ต้องการ จากนั้นจึงคำนวณปริมาณของมวลรวม (American Concrete Institute, 1991) ในขณะที่คอนกรีตชนิดไหลตัวได้โดยทั่วไปการออกแบบส่วนเริ่มจากคุณสมบัติของคอนกรีตสด โดยมีหลักการที่สำคัญคือ การใช้สารลดน้ำอย่างแรง และ/หรือ สารเพิ่มความเหนียว การจำกัดปริมาณมวลรวม และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่เหมาะสมเพื่อให้ได้คุณสมบัติของคอนกรีตสดที่ต้องการ ทั้งนี้จะไม่พิจารณาที่กำลังอัดเนื่องจากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่ำทำให้ได้กำลังอัดที่สูงอยู่แล้ว ดังนั้นความต้องการคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคุณลักษณะของวัสดุที่หลากหลายแตกต่างกันทำให้ไม่มีมาตรฐานการออกแบบส่วนผสม วิธีการที่ใช้ในปัจจุบันเกิดจากการนำเสนอและพัฒนาต่อเนื่องกันมา

สมาคมวิศวกรรมโยธาแห่งประเทศไทย (Japanese Society of Civil Engineer) ได้กำหนดประเภทของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ไว้ 3 ชนิดคือ

(ก) คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ประเภทวัสดุผง (Powder-Type Self-Compacting Concrete) โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงอยู่ในช่วง 0.28-0.37 (155-175 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) จากสัดส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ต่ำส่งผลให้ได้กำลังอัดที่สูง แต่การหดตัวแบบออโตจีเนียส (Autogenous Shrinkage) จะมีค่าสูงด้วยเช่นกัน และความแปรผันของความชื้นที่พื้นผิวและโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด

(ข) คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ประเภทสารเพิ่มความหนืด (Viscosity Agent-Type Self-Compacting Concrete) เป็นการปรับความหนืดพลาสติกโดยการเติมปริมาณของสารเพิ่มความหนืด (มากกว่า 180 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ทำให้ความหนืดที่เพิ่มส่งผลให้ความสามารถในการไหลและระยะเวลาการก่อตัวช้าลงด้วย ส่วนใหญ่ใช้ร่วมกับการออกแบบส่วนผสมที่ใช้วัสดุผงเพียงชนิดเดียว และ

(ค) คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ประเภทผสมรวมทั้งสองแบบเข้าด้วยกัน (Combination-Type Self-Compacting Concrete) วิธีการนี้กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่ำ ส่งผลให้ได้กำลังอัดที่สูง แต่มีการหดตัวแบบออโตจีเนียสสูงเช่นกัน ส่วนการผสมสารเพิ่มความหนืดเข้าไปช่วยเพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างและลดการแยกตัวให้น้อยลง ส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการอัดแน่นได้สูง โดยได้สรุปปริมาณวัสดุส่วนผสมในแต่ละประเภทดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณวัสดุผงตามชนิดของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ตามข้อกำหนดของ Japan Society of Civil Engineers (JSCE) (Japanese Society of Civil Engineers (JSCE), 1999)

ประเภทของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้	ปริมาณวัสดุผงโดยปริมาตรของคอนกรีต	
	ร้อยละ	น้ำหนัก* (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
วัสดุผง	16-19	500-600
สารเพิ่มความหนืด	9.5-16	300-500
ผลรวม	>13	>410

*เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ในส่วนของสมาคม EFNARC ซึ่งก่อตั้งขึ้นในปี ค.ศ. 1989 (พ.ศ. 2542) หลังการพัฒนาคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ในประเทศญี่ปุ่นได้เกิดจากการรวมตัวของประเทศในยุโรปเพื่อพัฒนามาตรฐาน และข้อกำหนดของการใช้คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ ได้กำหนดสัดส่วนผสมสรุปได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ปริมาณสัดส่วนผสมตามข้อกำหนดของ ENFARC (European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concretes Systems (EFNARC), 2005)

วัสดุผสม	สัดส่วนปริมาณวัสดุโดยปริมาตรของคอนกรีต	
	ENFARC2002	ENFARC2005
ปริมาณวัสดุผง		
(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	400-600	380-600
ปริมาณน้ำ		
(ลิตรต่อลูกบาศก์เมตร)	< 200	150 - 210
ปริมาณมวลรวมหยาบ		
(ร้อยละ)	28 – 35	27 – 36
ปริมาณมวลรวมละเอียด	ปรับตามปริมาตร	ร้อยละ 48 – 55*
สัดส่วนน้ำต่อวัสดุผง		
โดยปริมาตร	0.80 – 1.00	0.85 – 1.10

* ร้อยละต่อน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมด

นอกจากนั้น จากการศึกษาของ Domone (Domone, 2006) ได้ทำการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ในช่วงระยะเวลาปี ค.ศ. 1993-2003 (พ.ศ. 2526 - 2546) จำนวน 68 กรณีศึกษาพบว่าความแตกต่างระหว่างสัดส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ ได้แก่ การใช้ปริมาณมวลรวมหยาบที่ต่ำกว่าทำให้ปริมาณซีเมนต์เพสต์สูงขึ้น ปริมาณวัสดุผงสูงกว่า สัดส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่ำ ปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงสูง และใช้สารเพิ่มความหนืดในบางกรณี สรุปสัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ปริมาณสัดส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ (Domone, 2006)

วัสดุผสม	สัดส่วนปริมาณวัสดุโดยปริมาตรของคอนกรีต
ปริมาณวัสดุผง	
(ลิตรต่อลูกบาศก์เมตร)	445-605
ปริมาณซีเมนต์เฟสท์	
(ร้อยละ)	32.3 – 39
สัดส่วนน้ำต่อวัสดุผง	0.28 – 0.42
ปริมาณมวลรวมหยาบ (ร้อยละ)	29.1 – 34.8
ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ	
(มิลลิเมตร)	16 – 20
ปริมาณมวลรวมละเอียดต่อมอร์ตาร์ (ร้อยละ)	41.0 – 51.5

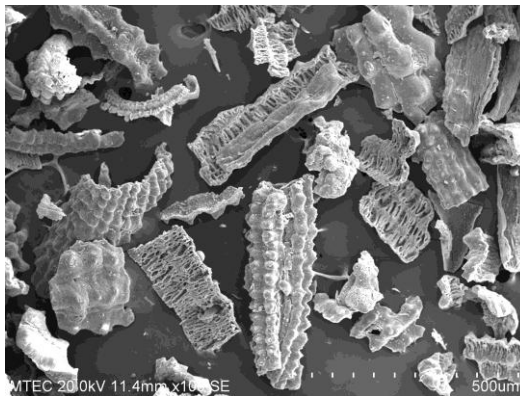
เมื่อพิจารณาจากผลของการใช้ปริมาณปูนวัสดุผงในระดับที่สูงส่งผลให้คอนกรีตชนิดไหลตัวได้มีราคาสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป (Okamura and Ouchi, 2003) และโครงสร้างเกิดการแตกร้าว (Thermal Cracking) (Mehta, 1999) ดังนั้นการนำของเหลือทิ้ง (By-product) ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานมาใช้ร่วมกับคอนกรีตชนิดไหลตัวได้นอกจากช่วยเพิ่มคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตแล้ว ราคาของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ยังลดลงอีกด้วยจากการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง และราคาของของเหลือทิ้งที่ต่ำกว่าราคาของปูนซีเมนต์มาก

2.3 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash)

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งมีอัตราการใช้ที่ดินเพื่อการเกษตรทั้งประเทศในระดับสูง โดยเฉพาะการทำนาเนื่องจากข้าวเป็นพืชที่คนไทยบริโภคมาอย่างยาวนาน ในปัจจุบันประเทศไทยถือได้ว่าเป็นประเทศที่ส่งออกข้าวเป็นอันดับต้นๆ ของโลก ในปี พ.ศ. 2554 ประมาณการผลผลิตข้าวเปลือกที่ผลิตได้ในประเทศไทยถึง 31.6 ล้านตัน (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2012) แกลบเป็นผลพลอยได้จากการแปรรูปข้าวเปลือกให้เป็นข้าวสาร โดยแกลบที่ได้จากการกระบวนการสีข้าวประมาณร้อยละ 20 ของปริมาณข้าวเปลือก โดยในแต่ละปีมีปริมาณแกลบเป็นจำนวนมากซึ่งส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าชีวมวล จากการเผาแกลบจะได้เถ้าแกลบออกมาในปริมาณร้อยละ 20-25 โดยน้ำหนัก หรือคิดเป็นปริมาณมากกว่า 1.26 ล้านตัน ซึ่งถือว่ามีความเพียงพอสำหรับใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์

สำหรับคุณสมบัติทางด้านซีเมนต์ของเถ้าแกลบของเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาชั้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการเผา ระยะเวลาในการเผา อุณหภูมิในการเผา และกระบวนการบดซึ่งมีผลต่อโครงสร้างภายในโดยความสามารถในการทำปฏิกิริยาของเถ้าแกลบร่วมกับปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกา สถานะความเป็นผลึกของซิลิกา ขนาดและพื้นที่ผิวของอนุภาคเถ้าแกลบ (Zain et al., 2011) จากการศึกษาของ Mehta (Mehta, 1978) พบว่าการเผาแกลบในช่วงอุณหภูมิ 500-680 องศาเซลเซียส เถ้าแกลบมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยารวมถึงมีปริมาณซิลิกาเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าร้อยละ 90 ทั้งนี้หากเผาแกลบที่อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ปริมาณซิลิกาที่ได้จะเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 95 (Della et al., 2002) หรือหากการเผาที่อุณหภูมิต่ำลงที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลานานขึ้นถึง 12 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เถ้าแกลบเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว พบว่าเถ้าแกลบที่ได้มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเช่นกัน (Nair et al., 2006) เมื่อพิจารณาโครงสร้างสถานะของเถ้าแกลบจากช่วงอุณหภูมิของการเผาพบว่าในช่วงอุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส

แกลบยังคงสถานะเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ของเฟสคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส หากเพิ่มอุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้นถึง 1150 องศาเซลเซียส จะพบทั้งสถานะของคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) และทริไดไมท์ (Tridymite) (Hamad and Khattab, 1981) โดยโครงสร้างภายในมีลักษณะเชื่อมโยงเป็นเส้นใย มีความพรุนสูง (Mehta and Monteiro, 2006) มีรูปร่างไม่แน่นอน และพื้นผิวถูกกัดกร่อนเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทั้งนี้หากเผาเถ้าแกลบที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคจะเล็กลง ส่วนสีของเถ้าแกลบเปลี่ยนไปตามช่วงอุณหภูมิในการเผา พบว่าช่วงอุณหภูมิ 350-500 องศาเซลเซียส เถ้าแกลบจะมีสีขาว ช่วงอุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส เถ้าจะมีสีเทา หากอุณหภูมิมากกว่า 800 องศาเซลเซียสเผานานกว่า 5 ชั่วโมง เถ้าที่ได้จะมีสีชมพู (Muthadhi and Kothandaraman, 2010)



รูปที่ 2.10 ภาพถ่ายขยายอนุภาคเถ้าแกลบที่กำลังขยาย 1000 เท่า

โดยปกติขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบส่วนใหญ่มีขนาดอยู่ในช่วง 4-75 ไมโครเมตร (Mehta, 2002) ทั้งนี้ผลของความละเอียดของอนุภาคเถ้าแกลบมีความสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและการพัฒนากำลังของคอนกรีตด้วยเช่นกัน เถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ลดลง (Tuan et al., 2011) ในทางกลับกันขนาดอนุภาคที่เล็กลงช่วยเติมแทรกช่องว่าง

ภายในเนื้อคอนกรีตทำให้มีกำลังอัดสูงที่สูงขึ้น (Rukzon et al., 2009; Jaya et al., 2011) ในปัจจุบันเทคนิคที่สำคัญของการเพิ่มความละเอียดของเถ้าเกลบคือ การบดเถ้าเกลบให้มีขนาดอนุภาคที่เหมาะสม นอกจากส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกแล้วยังช่วยลดผลความต้องการน้ำที่เกิดจากปริมาณคาร์บอนที่คงค้างในเถ้าเกลบซึ่งมีอยู่ในปริมาณสูง (Chao-Lung et al., 2011) รวมถึงช่วยเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวกันของเถ้าเกลบอีกด้วย (Cordeiro et al., 2009) นอกจากนั้นจากงานวิจัยของ Makul และคณะ (Makul and Agrawal, 2010) ได้นำเสนอวิธีการใช้พลังงานไมโครเวฟในช่วงอุณหภูมิ 800-1200 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาสั้นๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเถ้าเกลบให้มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 30

สำหรับองค์ประกอบเคมีของเถ้าเกลบจะมีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักโดยทั่วไปมากกว่าร้อยละ 80 องค์ประกอบที่เหลือ ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ไออนออกไซด์ (Fe_2O_3) แมงกานีสออกไซด์ (MnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) และร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้ (LOI) ปริมาณขององค์ประกอบเคมีของเถ้าเกลบจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาทั้งนี้ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยไม่มีนัยสำคัญ (Sensale et al., 2008) และพบว่าปริมาณซิลิกาสูงขึ้นตามอุณหภูมิในการเผา (Nehdi et al., 2003) ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของสภาพภูมิประเทศในแต่ละท้องถิ่นส่งผลต่อองค์ประกอบเคมีของดิน ชนิดของพันธุ์ข้าว รวมถึงปุ๋ยที่ใช้ (Bronzeoak Ltd., 2003) ซึ่งในระหว่างที่ข้าวเจริญเติบโตมีการดูดซึมซิลิกาจากดินและสะสมไว้ในโครงสร้างทำให้เถ้าเกลบซึ่งมาจากสถานที่แตกต่างกันย่อมมีองค์ประกอบเคมีที่ต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบเคมีของเถ้าแกลบจากสถานที่ต่างๆ

องค์ประกอบเคมี (ร้อยละ)	ประเทศไทย (98)	อินเดีย (99)	บราซิล (92)	อเมริกา (100)	เซเนกัล (101)
SiO ₂	92.50	87.32	82.60	88.00	79.20
Al ₂ O ₃	1.20	0.22	0.40	-	1.60
Fe ₂ O ₃	2.10	0.28	0.50	0.10	2.60
CaO	0.90	0.48	0.80	0.80	6.0
MgO	0.40	0.28	0.70	0.20	-
SO ₃	0.10	-	-	-	-
LOI	0.90	2.10	11.90	8.10	0.50
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	95.8	87.82	83.50	88.10	83.40

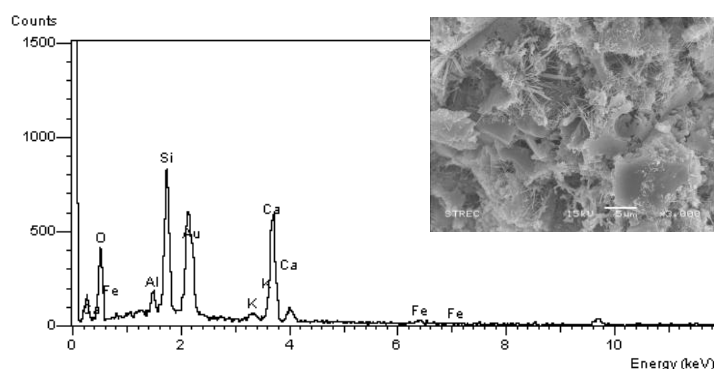
สำหรับการนำเถ้าแกลบมาใช้ในการงานคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ มีความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าแกลบมาทดแทนการใช้สารเพิ่มความหนืดด้วยการผสมเพิ่มในคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ โดยหากต้องปรับอัตราส่วนผสมให้เหมาะสมเนื่องจากการใช้ปริมาณเถ้าแกลบที่สูงขึ้น ความต้องการปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงต้องเพิ่มมากขึ้นด้วยเพื่อรักษาความสามารถในการไหลตัวได้ของคอนกรีต หากเปรียบเทียบราคาคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ที่นำเถ้าแกลบมาทดแทนการใช้สารเพิ่มความหนืดซึ่งมีราคาสูงมาก พบว่าคอนกรีตมีราคาลดลงถึงร้อยละ 42.47 (Memon et al., 2008) เมื่อพิจารณาความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบที่เหมาะสมไม่เกินร้อยละ 15 เนื่องจากผลของปริมาณพื้นที่ผิวที่สูงของเถ้าแกลบทำการดูดซับน้ำเข้าไปในอนุภาคของเถ้าแกลบทำให้ปริมาณน้ำอิสระของมอร์ตาร์ลดลง ในทางตรงกันข้ามหากสัดส่วนน้ำต่อ

วัสดุผงเพิ่มขึ้นความสามารถในการไหลตัวได้กลับลดลง จากผลของปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณซีเมนต์ลดลงตามสัดส่วนผสม ส่วนปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของการไหลของมอร์ตาร์ แต่หากใช้ปริมาณ สารลดน้ำสูงมากกว่าจุดอิ่มตัวจะส่งผลให้มอร์ต้าเกิดการเยิ้ม (Safiuddin et al., 2011)

เมื่อนำมาใช้ในงานคอนกรีตพบว่าความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสดเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนน้ำต่อวัสดุผงลดลง ปริมาณเถ้ากลบเพิ่มขึ้นเนื่องจากทำให้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นและมวลรวมลดลงในอัตราส่วนผสม ทั้งนี้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 เนื่องจากคอนกรีตมีความสามารถในการเติมแทรก การไหลผ่าน และการต้านทานการแยกตัวที่ดี (Safiuddin et al., 2012) หากพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่สัมพันธ์กับการไหลตัวของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบจากโรงไฟฟ้านำมาทำการบดจนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 24.32 ไมโครเมตร เมื่อกำหนดความสามารถในการไหลตัวได้ที่ระยะ 50 และ 60 เซนติเมตร เพื่อหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง หรือกรณีกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง เพื่อหาคุณสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ที่สัดส่วนการแทนที่ต่างกัน พบว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลดลง ในขณะที่ความต้องการน้ำเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้ากลบสูงขึ้น (Sua-iam and Makul, 2012) นอกจากนี้คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้ากลบยังสามารถนำมาใช้งานประเทศที่มีสภาวะอากาศหนาวเย็นและมีหิมะได้อีกด้วย เนื่องจากในสภาวะอากาศหนาวเย็นและมีหิมะโครงสร้างของคอนกรีตต้องมีโพรงอากาศ (Air-void) ที่เหมาะสมเพื่อช่วยต้านทานการแข็งตัวของน้ำในโพรงคอนกรีต และโครงข่ายของโพรงอากาศยังช่วยลดแรงดันที่เกิดจากน้ำที่แข็งตัวเพื่อให้โครงสร้างมีความคงทนมากขึ้นซึ่งการใช้เถ้ากลบในงานคอนกรีตชนิดไหลตัวได้พบว่า ไม่ส่งผลกระทบต่อการคงตัวของโพรงอากาศ (Air-void Stability) ในสภาวะคอนกรีตสดปริมาณโพรงอากาศลดลงสูงสุดเพียงร้อยละ 5 ทั้งนี้ผลของการใช้เถ้ากลบทำให้ความต้องการปริมาณสารลดน้ำอย่างแรง

และสารกักกระจายฟองอากาศสูงขึ้น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อแรงค้ำตัวของโพรงอากาศโดยรวม (Safiuddin et al., 2006)

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ในสภาวะที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว จากผล การทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าแกลบซึ่งพัฒนาได้เข้าในช่วงต้นทำให้คอนกรีตซึ่งยังคงทำปฏิกิริยา อย่างต่อเนื่องแม้คอนกรีตมีอายุถึง 180 วัน พบว่าอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบที่ เหมาะสมคือสัดส่วนร้อยละ 20 คอนกรีตมีกำลังอัดและกำลังดัดสูงเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่โมดูลัสความ ยืดหยุ่นต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม (Ahmadi et al., 2007) สอดคล้องกับ Gritsada และคณะ (Sua- iam and Makul, 2012) พบว่าอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบที่เหมาะสมร้อยละ 20 มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงหรือสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ในขณะที่การแทนที่ในปริมาณที่สูงมากถึงร้อยละ 40 พบว่า กำลังอัดที่อายุ 28 วันสูงถึง 40 เมกะปาสคาล เนื่องจากการเติมแทรกของอนุภาคและ ผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้โครงสร้างภายในแน่นตัวมากขึ้น ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 สเปกตรัมของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบเท่ากับร้อยละ 40

(Sua-iam and Makul, 2012)

ทั้งนี้จากผลของสัดส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ลดลง และปริมาณเถ้าแกลบที่สูงขึ้นมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาวะแข็งตัวที่สูงขึ้นด้วย เนื่องจากการเติมแทรกของขนาดอนุภาคที่เล็กแทรกระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์รวมถึงผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าแกลบทำให้คอนกรีตมีโพรง (Porosity) ลดลงส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัด ความเป็นเนื้อเดียว และความตึงน้ำเพิ่มสูงมากขึ้น การผสมร่วมกับวัสดุประสานอื่นช่วยเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ให้สูงขึ้น (Safiuddin et al., 2010) นอกจากนั้นการนำคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้าแกลบ ผสมร่วมกับวัสดุประสานอื่นได้แก่ เถ้าลอย หรือฝุ่นหินปูน เนื่องจากข้อดีของเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนในการช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพิ่มความสามารถในการเติมแทรกและการไหลผ่านที่ดี ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าแกลบช่วยเพิ่มความเหนียวไม่ให้เกิดการแยกตัว ดังนั้นเมื่อนำมาผสมรวมกันส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ดียิ่งขึ้น แต่หากหากเพิ่มสัดส่วนเถ้าแกลบมากขึ้นย่อมส่งผลต่อกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากความต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้น โดยสัดส่วนผสมคอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และเถ้าลอย ที่สัดส่วนร้อยละ 70 : 15 : 15 ให้กำลังอัดสูงสุด 43.4 เมกะปาสคาลที่อายุ 90 วัน และสัดส่วนผสมคอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบและฝุ่นหินปูนร้อยละ 70-15-15 ให้กำลังอัดสูงสุด 6.2 เมกะปาสคาล ที่อายุ 90 วัน (Sood et al., 2009)