

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีตที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงานที่นำไปใช้ และยังมีปูนซีเมนต์ชนิดอื่นที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เหมาะสมกับงานที่หลากหลาย คุณสมบัติของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่เป็นวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันในขั้นตอนการเผาเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์การปรับส่วนประกอบของวัตถุดิบจะทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ

- 1) วัสดุธาตุปูน (Calcareous Material) เป็นออกไซด์ของธาตุแคลเซียม (Calcium) ได้แก่ หินปูน (Limestone) และหินชอล์ก (Chalk)
- 2) วัสดุอะลูมิโนซิลิเกต (Argillaceous Materials) เป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกอน (Silicon) และอลูมิเนียม (Aluminium) ได้แก่ ดินเหนียว (Clay) หินเชลหรือหินดินดาน (Shale) และหินชนวน (Slate)
- 3) Iron Oxide Material ได้แก่ แร่เหล็ก (Iron Ore) ซึ่งได้จากดินลูกรัง (Laterite) หรือศิลาแลง (Laterite)

ในบางครั้งดินที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีทั้งออกไซด์ของแคลเซียมและซิลิกอน ได้แก่ ดินมาร์ล (Marl) นอกจากนี้การผลิตปูนซีเมนต์ยังต้องการวัตถุดิบอย่างอื่น ได้แก่ ออกไซด์ของอลูมิเนียมและเหล็กช่วยให้ปฏิกิริยาในเตาเผาเกิดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังต้องการยิปซัม (Gypsum) เพื่อหน่วงปฏิกิริยาไม่ให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวเร็วเกินไปโดยบดรวมกับปูนเม็ด (Clinker) ในขั้นตอนสุดท้าย

กรรมวิธีในการผลิตปูนซีเมนต์ แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ กระบวนการผลิตแบบเปียก (Wet Process) และกระบวนการผลิตแบบแห้ง (Dry Process) การเลือกกระบวนการผลิตแบบใดขึ้นอยู่กับความชื้นของวัตถุดิบในสภาพธรรมชาติ ความแข็งของวัตถุดิบ และชนิดของวัตถุดิบ

ในกระบวนการผลิตแบบเปียกวัตถุดิบที่ใช้ คือ ดินเหนียว และหินชอล์ก วัตถุดิบจะผสมกับน้ำตามสัดส่วนที่กำหนดและบดส่วนผสมให้ละเอียดในหม้อบดละเอียดเปียก (Wash Mill) ได้นำโคลนชั้น (Slurry) ส่งเข้าเตาเผา (Kiln) ส่วนกระบวนการผลิตแบบแห้งวัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นหินปูนและหินดินดาน วัตถุดิบจะถูกนำมาบดให้เล็กลงในเครื่องบดแล้วจึงนำไปบดละเอียดในหม้อบดวัตถุดิบ (Raw Mill) แล้วผสมกันตามสัดส่วนที่ต้องการในไซโลผสมวัตถุดิบ (Blending Silo) ก่อนที่จะป้อนเข้าสู่เตาเผา

เมื่อวัตถุดิบถูกป้อนเข้าสู่เตาเผาโดยส่วนใหญ่เป็นเตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) ทำด้วยเหล็กกล้ารูปทรงกระบอกข้างในบุด้วยอิฐทนไฟ วัตถุดิบจะได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยอุณหภูมิที่ใช้สูงถึงประมาณ $1,400 - 1,600^{\circ}\text{C}$ ซึ่งที่อุณหภูมิช่วงนี้ส่วนผสมจะทำปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ดก้อนกลมขนาด $3 - 40\text{ mm}$ และถูกทำให้เย็นตัวลง ต่อจากนั้นนำปูนเม็ดมาบดร่วมกับยิปซัมในหม้อบดปูนซีเมนต์ (Cement Mill) ปริมาณยิปซัมที่ใช้ประมาณร้อยละ $2.5 - 3$ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อหน่วงการก่อตัวอย่างรวดเร็วของปูนซีเมนต์เป็นผลดีสำหรับการนำไปใช้งานต่อไป

2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่คือ

- 1) ออกไซด์หลัก (Major Oxide) ได้แก่ CaO SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณ 90% ของน้ำหนักซีเมนต์
- 2) ออกไซด์รอง (Minor Oxide) ได้แก่ MgO Na_2O TiO_2 P_2O_5 และยิปซัมปริมาณออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงในตารางที่ 2.1 ออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

2.1.2 คุณสมบัติของสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์คือ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF เนื่องจากมีปริมาณมากถึงร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์

- 1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)

C_3S มีอยู่มากที่สุดในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ $45 - 55$ เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึกหกเหลี่ยม มีสีเทาเข้ม คุณสมบัติของ C_3S เหมือนกับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ต

แลนด์ เมื่อผสมเข้ากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและการแข็งตัวภายใน 2 - 3 ชั่วโมงและจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง 7 วันแรก การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำทำให้เกิดความร้อนปานกลางประมาณ 500 J/g ความร้อนที่คายออกมาเรียกว่า ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration)

2) ไคแคลเซียมซัลเฟต (C_2S)

C_2S มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 15 - 35 เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลมโดย C_2S มีอยู่หลายรูปแบบ มีเพียง βC_2S เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิปกติ βC_2S มีคุณสมบัติยืดยาวเมื่อผสมกับน้ำจะสามารถทำปฏิกิริยาเกิดความร้อนขึ้น โดยความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_2S ค่อนข้างต่ำ คือมีค่าประมาณ 250 J/g และการพัฒนากำลังอัดจะค่อนข้างช้าและช้ากว่า C_3S มาก คือจะเริ่มให้กำลังหลังจาก 4 สัปดาห์ขึ้นไป แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S

3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

C_3A มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 7 - 15 ลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยม มีสีเทาอ่อนทำปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมาก และทำให้เพสต์ก่อตัวทันทีก่อให้เกิด flash Set และเกิดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าสูงมากประมาณ 880 J/g การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซัมลงระหว่างการบดซีเมนต์ การพัฒนากำลังอัดของ C_3A จะเร็วมากสามารถพัฒนาได้ภายในวันเดียวแต่กำลังอัดที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำมากเมื่อเทียบกับ C_3S หรือ C_2S ดังแสดงในรูปที่ 2.1

4) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

C_4AF มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 5 - 10 และอยู่ในสภาพของสารละลายแข็ง (Solid Solution) เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาและทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็วมากภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าปานกลางประมาณ 420 J/g โดย C_4AF พัฒนากำลังได้เร็วมากเช่นเดียวกับ C_3A แต่กำลังอัดที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำและต่ำกว่า C_3A เล็กน้อย

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมี	สัญลักษณ์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	C	60 - 67
SiO ₂	S	17 - 25
Al ₂ O ₃	A	3 - 8
Fe ₂ O ₃	F	0.5 - 6.0
MgO	M	0.1 - 4.0
Na ₂ O	N	0.1 - 1.8
K ₂ O	k	0.1 - 1.8
SO ₃	S	0.5 - 3.0
สารประกอบอื่น ๆ	-	0.5 - 3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition)	LOI	0.1 - 3.0
การที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue)	-	0.20 - 0.75

ที่มา : ปริญา จินดาประเสริฐ (2553)

2.1.3 คุณสมบัติของสารประกอบรอง

สารประกอบรอง หมายถึง สารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ที่นอกเหนือจากสารประกอบหลักทั้ง 4 อย่าง สารประกอบรองเหล่านี้มีอยู่ในปริมาณที่น้อยมากแต่สารประกอบบางตัวมีผลกระทบต่อซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตทั้งขณะที่ยังไม่แข็งตัวและที่แข็งตัวแล้ว

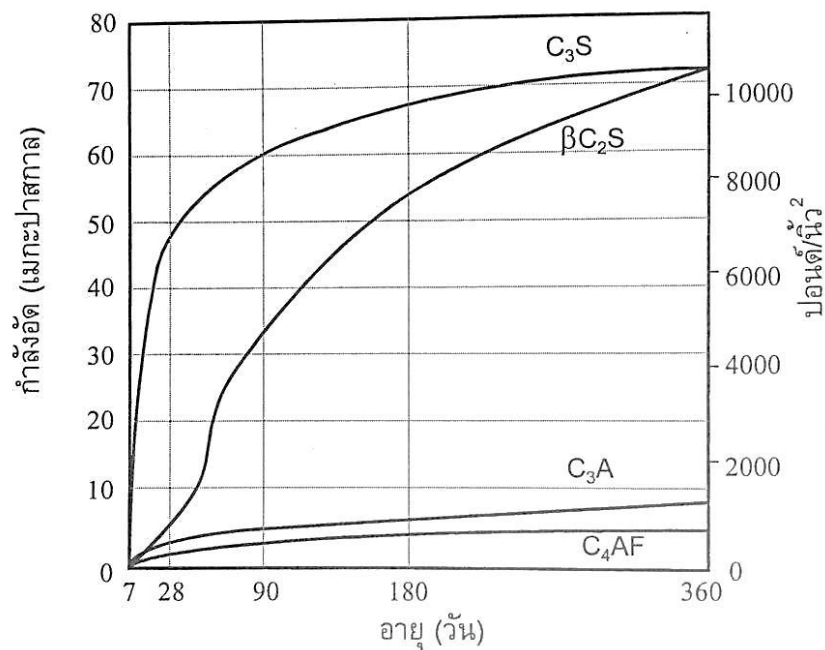
1) ยิปซัม (CaSO₄ - 2H₂O)

ยิปซัมถูกใส่เข้าไปในขั้นตอนสุดท้ายระหว่างการบดปูนเม็ดของการผลิตปูนซีเมนต์ เพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ไม่ให้เร็วเกินไป ปริมาณยิปซัมที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์เกิดกำลังอัดสูงที่สุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิปซัมที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับอัลคาไลที่ออกไซด์อื่นได้แก่ Na₂O K₂O และปริมาณ C₃A และความละเอียดของปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต Tricalcium Silicate	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต Dicalcium Silicate	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต Tricalcium Aluminate	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ TetracalciumAluminoferrite	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

ที่มา : ปิติ สุคนธสุขกุล (2549)



รูปที่ 2.1 การพัฒนากำลังอัดของ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF

ที่มา : R.H. Bogue (1955)

2) ปูนขาวอิสระ (Free lime : CaO)

ปูนขาวอิสระอาจขึ้นได้จาก 2 กรณีคือ

- 2.1) เมื่อวัตถุดิบมีปริมาณปูนขาวมากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ได้หมด

2.2) ปริมาณปูนขาวมีไม่มากแต่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ต่าง ๆ ในระหว่างการเผาไม่สมบูรณ์ ทำให้เหลือปูนขาวอิสระ โดยทั่วไปปูนซีเมนต์จะมีปูนขาวอิสระอยู่ประมาณร้อยละ 0.5 – 1.0 ปูนขาวอิสระนี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้า ๆ ซึ่งการรวมตัวของปูนขาวอิสระกับน้ำจะเกิดขึ้นหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวแล้วทำให้เกิดสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีปริมาณมากขึ้น ถ้าปูนขาวอิสระมีมากพออาจทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ก่อตัวแล้วเกิดการขยายตัวและแตกร้าวเสียหายได้ เรียกพฤติกรรมนี้ว่า “ซีเมนต์ไม่อยู่ตัวเนื่องจากปูนขาว”

3) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่จะมีแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้ MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ดที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮดรชันจะเหมือนกับ CaO คือ ปริมาตรจะเพิ่มขึ้นซึ่งก่อให้เกิดการไม่อยู่ตัว การขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของ MgO ในปูนซีเมนต์ และขนาดของ MgO ถ้าขนาดเล็กมาก ๆ จะทำปฏิกิริยาไฮดรชันได้เร็วโดยจะไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์ที่แข็งตัว

4) อลคาไลต์ออกไซด์ (Na_2O , K_2O)

มีอยู่ประมาณร้อยละ 0.5 – 1.3 ในปูนซีเมนต์ อลคาไลต์ออกไซด์ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอลคาไลต์มาผสมเป็นคอนกรีต เช่น หินและทราย เนื่องจากเป็นพวกที่มีซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับอลคาไลต์ออกไซด์ ผลจากปฏิกิริยาก่อให้เกิดการขยายตัวออกดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหายจากการแก้ไขในกรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอลคาไลต์ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอลคาไลต์ต่ำ (ต่ำกว่าร้อยละ 0.06 โดยคิดเป็นค่าเทียบเท่าปริมาณของ Na_2O)

5) ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5)

ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์มีอยู่ในวัตถุดิบที่ใช้ทำปูนซีเมนต์บางแหล่ง ส่วนมากมาจากหินปูนและมักมีอยู่ไม่เกินร้อยละ 0.1 – 0.2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สารนี้ทำให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวช้า เนื่องจาก P_2O_5 ทำให้ C_3S สลายตัวเป็น C_2S กับ CaO นอกจากนี้ถ้ามี P_2O_5 ผสมอยู่มากควรที่จะลดปริมาณของปูนขาวโดยการลดปริมาณหินปูนจากวัตถุดิบลง

2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

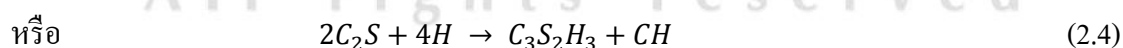
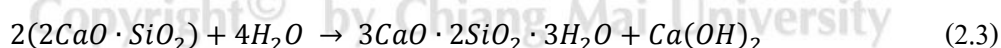
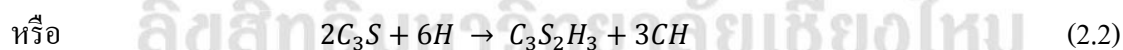
การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะคือ

- 1) อาศัยสารละลาย เมื่อซีเมนต์ละลายกับน้ำก่อให้เกิดไอออนในสารละลายและไอออนนี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่
- 2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “Solid State Reaction”

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลายและในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิดเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท

2.2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)

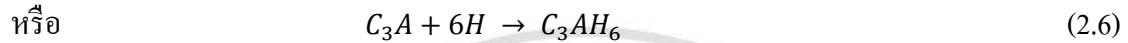
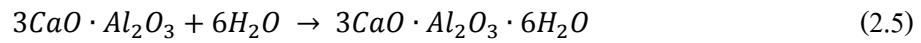
แคลเซียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($C-S-H$) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน การเกิดปฏิกิริยามีดังสมการที่ 2.1 - 2.4



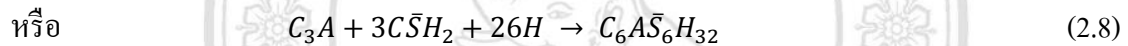
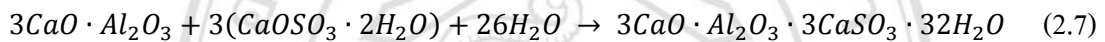
จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเกิดเจล (Gel) ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการคือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตนี้ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ส่วน $Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือ มีค่าพีเอช ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้เป็นอย่างดี

2.2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C₃A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃A จะเกิดทันทีและเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์
เพสต์ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6



เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็วจึงใส่ยิปซัม (CaSO₄·2H₂O) เข้าไปใน
ระหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ C₃A ก่อให้เกิดชั้นของเอททริงไต์ (Ettringite ;
C₆AS₃H₃₂) บนผิวของอนุภาค C₃A ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C₃A และทำให้การก่อตัวใน
ช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃S และ C₂S เป็นส่วนใหญ่แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้
หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃A กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มขึ้น
ของปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน
ของ C₃A แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน
อีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด
Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate ดังแสดงใน
รูปที่ 2.2

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

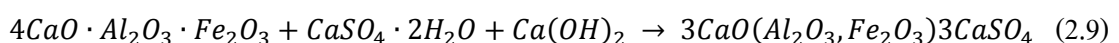


รูปที่ 2.2 ขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A

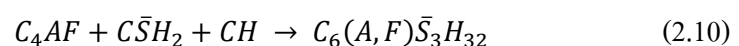
ที่มา : รัชวาลย์ เศรษฐบุตร (2552)

2.2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF จะเกิดในปฏิกิริยาช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัมและ $Ca(OH)_2$ ก่อนให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการที่ 2.9 และ 2.1



หรือ



2.2.4 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันส่วนใหญ่ของสารประกอบหลักนั้นจะเกิด C-S-H gel และ Ettringite เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์จะเป็นการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวช่วงเวลาหนึ่ง โดยคุณสมบัติของเพสต์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง เราเรียกช่วงนี้ว่า “Dormant Period” หลังจากนั้นเพสต์จะเริ่มแข็งตัวถึงแม้ว่าจะยังคงนุ่มอยู่ เราเรียกว่า “จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Set)” ซึ่งเป็นช่วงที่ C-S-H ที่เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์แตกตัวออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป การเกิดและการขยายตัวของ C-S-H gel นี้ก่อให้เกิดการก่อตัว ในขณะที่ปริมาณ C-S-H เพิ่มขึ้น ความพรุนของเพสต์จะลดลง และกำลังเริ่มพัฒนาขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เนื่องจากผลผลิตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเข้าสู่ช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ กำจัดการเคลื่อนที่ของเม็ดซีเมนต์ ทำให้ความพรุนของเพสต์ลดลงในระยะยาว ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์กลายเป็นของแข็ง คือเข้าสู่จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Set) เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไปและสามารถรับน้ำหนักได้ ขบวนการทั้งหมดนี้ เราเรียกว่า “การแข็งตัว (Hardening)” ปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์มีดังนี้

1) แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H)

C-S-H มีปริมาณมากที่สุดในส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นจึงมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์มากที่สุด C-S-H เริ่มเกิดขึ้นมากเมื่อพ้นระยะคอร์แมนต์และเข้าสู่การทำปฏิกิริยาอีกครั้ง โดยจะเกิดขึ้นของ C-S-H ขยายตัวออกจากเม็ดปูนเข้าสู่ช่องว่างและเกิดภายใต้ผิวเดิมของเม็ดปูนและขยายเข้าสู่ภายในเม็ดปูน เมื่อเกิดปริมาณมากและเชื่อมโยงถึงกันก็จะสามารถรับกำลังได้ C-S-H มีอยู่ประมาณร้อยละ 50 – 70 โดยปริมาตร และอยู่ในรูปของอนุภาคเล็ก ๆ มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร

2) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH)

ซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณร้อยละ 20 – 5 โดยปริมาตร เป็นผลึกที่มีรูปร่างหลายแบบมีทั้งผลึกเล็กที่มีขนาดด้านเท่า ผลึกใหญ่ที่มีลักษณะเป็นแผ่น ผลึกบางยาว และผลึกที่มีรูปร่างระหว่างผลึกที่กล่าวมาทั้งหมด เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นพอ CH จะตกผลึก ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่ง และหลังจากนี้จะเพิ่มจำนวนและขยายตัวเข้าสู่โพรงคาปิลารี CH ขยายเข้าสู่ที่ว่างเท่านั้นและจะหยุดเมื่อไม่มีช่องว่างเหลืออยู่ CH เป็นสารประกอบที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความคงทนลดลงเนื่องจากเป็นสารที่ละลายได้และถูกชะล้าง

(Leach) ออกได้ง่าย นอกจากนี้การทำให้กำลังของ CH ยังค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังที่ได้จาก C-S-H

3) แคลเซียมซัลโฟลูมินเนต

แคลเซียมซัลโฟลูมินเนตและแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมินเนตมีอยู่ประมาณร้อยละ 10 ถึง 15 โดยที่แคลเซียมซัลโฟลูมินเนตหรือเอททริงไกต์เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มผสมปูนซีเมนต์เข้ากับน้ำ มีลักษณะเป็นเข็มยาวเกิดขึ้นรอบเม็ดปูนและขยายตัวเข้าในช่องว่าง เมื่อไม่มีช่องว่างเอททริงไกต์จะพยายามดันส่วนที่ล้อมรอบอยู่ออก ถ้าเกิดเอททริงไกต์ตอนที่ซีเมนต์เพสต์ยังเหลวอยู่จะไม่เป็นปัญหา แต่ถ้าเกิดเมื่อซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้วจะทำให้เกิดแรงดันและทำให้ซีเมนต์เพสต์ขยายตัวและแตกร้าวได้ เมื่ออ็อกไซด์ของซัลเฟตหมดเอททริงไกต์จะทำปฏิกิริยาและเปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมินเนตที่มีลักษณะเป็นแผ่น

4) น้ำในซีเมนต์เพสต์

น้ำในซีเมนต์เพสต์แบ่งอย่างหยาบ ๆ ออกได้เป็น 2 จำพวก คือ

4.1) น้ำที่ระเหยได้ (Evaporable Water) เป็นน้ำส่วนที่ถูกขจัดออกไปเมื่อนำซีเมนต์เพสต์ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C (หรือใช้น้ำแข็งแห้งที่อุณหภูมิ -79 °C) น้ำส่วนนี้จะรวมถึงน้ำในโพรงคาปิลารี น้ำในโพรงของเจล และน้ำบางส่วนของแคลเซียมซัลโฟลูมินเนตไฮเดรต

4.2) น้ำที่ระเหยไม่ได้ (Non-evaporable Water) น้ำที่ระเหยไม่ได้เป็นน้ำที่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์และกลายเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของเจล และจะขจัดออกไปเมื่อนำซีเมนต์เพสต์ไปเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C น้ำที่ระเหยไม่ได้จะเป็นสัดส่วนกับจำนวนปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาและขึ้นอยู่กับปริมาณของสารประกอบในปูนซีเมนต์ โดยปริมาณน้ำที่ระเหยไม่ได้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 23 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

5) ปัจจัยอย่างอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการพัฒนากำลังของซีเมนต์เพส

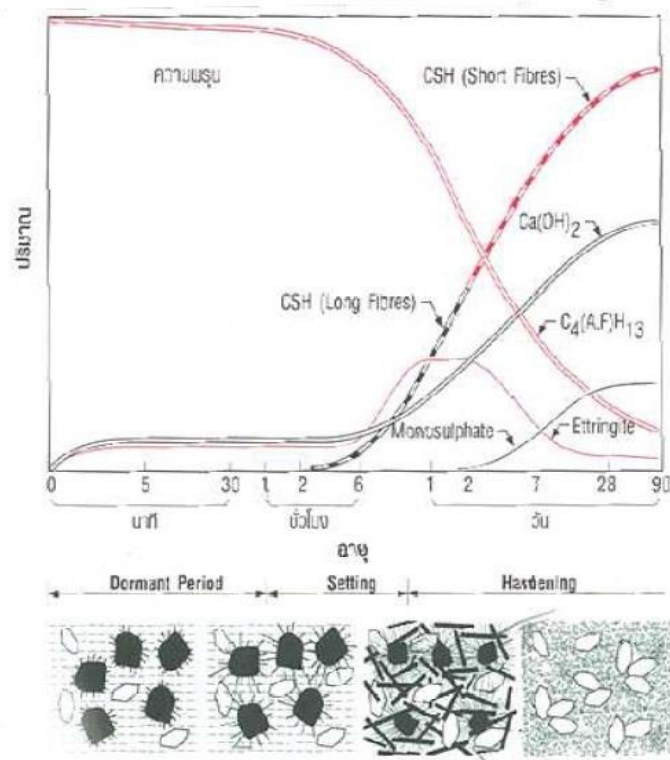
ปัจจัยที่ส่งผลต่อการพัฒนากำลังของซีเมนต์เพสอย่างอื่น ได้แก่ เม็ดปูนซีเมนต์ที่เหลือจากปฏิกิริยา ความพรุนและความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์เจล และการยึดเหนี่ยวทางเคมีของซีเมนต์เพส

2.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่

- 1) อายุของเพสต์ ยกเว้นช่วง Dormant Period อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรกและอัตราการเกิดจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชันดังแสดงในรูปที่ 2.4
- 2) องค์ประกอบของซีเมนต์เพสต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละตัวในซีเมนต์จะแตกต่างกัน
- 3) ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับน้ำได้มาก ผลคือปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดในอัตราที่เร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของปฏิกิริยา
- 4) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ในช่วงต้นอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในช่วงหลังอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ลดลง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

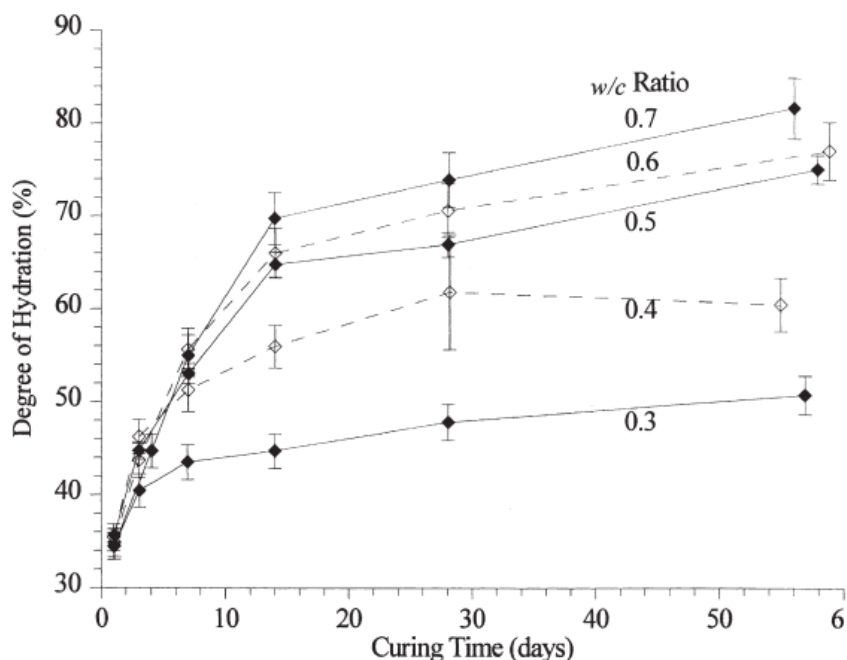


รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์
ที่มา : ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร (2552)

- 5) อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่า การเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของเพสต์
- 6) สารผสมเพิ่ม น้ำยาหน่วงหรือน้ำยาเร่งการก่อตัวจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยจะลดและเพิ่มอัตราตามลำดับ

2.3 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials)

ปอซโซลานเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือช่วยปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพื่อความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น



รูปที่ 2.4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ที่มา : Raymond A. Cook (1999)

ในการปรับคุณสมบัติบางอย่างของคอนกรีต สามารถใช้วัสดุผสมเพิ่มเติมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ วัสดุเฉื่อย (Inert Materials) วัสดุซีเมนต์ (Cementing Materials) และวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials)

มาตรฐาน ASTM C618 ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกาหรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่อุณหภูมิปกติทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน”

วัสดุปอซโซลาน เมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหยาบ วัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในประเทศไทยในปริมาณค่อนข้างมากและสามารถนำมาใช้งานได้ เช่น ถ้ำถ่านหิน ถ้ำชีวมวล นอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุปอซโซลานบางชนิดที่สังเคราะห์มาจากต่างประเทศ เช่น ซิลิกาฟุ้งที่มีความละเอียดสูงมากในการทำคอนกรีตกำลังสูง เป็นต้น

2.3.1 หลักการทำงานของปอซโซลาน (Roles of Pozzolands)

คุณสมบัติของซีเมนต์ผสมด้วยปอซโซลานโดยทั่วไปได้รับการพิสูจน์แล้วว่าดีขึ้น การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตโดยปอซโซลานกระทำได้ 2 ลักษณะคือ

- 1) ทางเคมี ปอซโซลานนั้นเมื่อนำมาผสมปูนซีเมนต์ซิลิกาที่มีอยู่จำนวนมากในปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เราเรียกว่า “ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction)” เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งมีกำลังที่สูงและมีมวลมากส่งผลให้ซีเมนต์ที่ผสมด้วยปอซโซลานมีกำลังเพิ่มขึ้นดังสมการที่ 2.11



- 2) ทางกายภาพ อนุภาคที่เล็กของปอซโซลานทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างและรูพรุนขนาดต่าง ๆ กันภายในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นและกำลังสูงขึ้น

2.3.2 อิทธิพลของปอซโซลานต่อคุณสมบัติของซีเมนต์

- 1) ความร้อนจากการไฮเดรต (Heat of Hydration)

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของวัสดุปอซโซลานเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ไม่รุนแรง และให้ความร้อนต่ำ ดังนั้นในคอนกรีตผสมปอซโซลานที่บางส่วนของซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยปอซโซลาน ปริมาณซีเมนต์ที่หายไปทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ซึ่งเมื่อรวมกับปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ไม่รุนแรงส่งผลให้ซีเมนต์ผสมปอซโซลานมีการเกิดไฮเดรชันที่ต่ำในช่วงแรก และผลิตความร้อนจากปฏิกิริยาออกมาในปริมาณที่ต่ำกว่าซีเมนต์ปกติ

- 2) ความสามารถในการทำงานได้ (Workability)

ความสามารถในการเทของคอนกรีตผสมปอซโซลานนั้น พบว่าขึ้นอยู่กับประเภทและปริมาณของปอซโซลานที่ใช้ เช่น ในกรณีของเถ้านหิน เนื่องจากมีอนุภาคที่กลมและมีขนาดเล็กกว่าซีเมนต์ไม่มากนักจึงทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวหล่อลื่นให้ระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่ทั้งหยาบและมีเหลี่ยมมุมมาก ทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้านหินในปริมาณสูงจะมีความสามารถในการเทที่สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ด้วยความสามารถในการเทที่เพิ่มขึ้น ทำให้เราสามารถที่จะลดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลงได้และได้คอนกรีตที่มีกำลังสูงขึ้น แต่สำหรับเถ้าฉวมวล เนื่องจากรูปร่างของเถ้า ฉวมวล

ไม่แน่นอนและมีรูพรุนสูง ส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้นและความสามารถในการเทคอนกรีตลดลง

3) โครงสร้างระดับอนุภาค (Microstructure)

การที่ปอชโซลานสามารถทำปฏิกิริยาปอชโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีมวลมาก ปริมาตร และความหนาแน่นสูง แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าไปแทรกตามช่องว่างหรือรูพรุน ทำให้คอนกรีตที่ผสมปอชโซลานมีความหนาแน่นมากกว่าปกติ

4) พัฒนาการของกำลังอัด

การผสมปอชโซลานลงในคอนกรีตส่งผลบวกต่อโครงสร้างของซีเมนต์ การลดลงของจำนวนและขนาดของรูพรุน การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่น ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เพิ่มขึ้น และการลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สิ่งเหล่านี้ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตผสมปอชโซลานในระยะยาวมักจะสูงกว่าคอนกรีตปกติ แต่สำหรับกำลังในช่วงต้น ๆ ของคอนกรีตผสมปอชโซลาน มักจะขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้ (สัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์) และชนิดของวัสดุปอชโซลานที่ใช้ ยกตัวอย่าง กรณีเถ้าลอยที่มักจะใช้แทนที่ซีเมนต์ในปริมาณมาก (ร้อยละ 20 - 50) ผลของการลดปริมาณซีเมนต์ลงเป็นจำนวนมากรวมกับปฏิกิริยาปอชโซลานิกนั้นช้า เพราะต้องรอการเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยมักจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าในช่วงแรกและมีกำลังต่ำในช่วงเริ่มต้น

5) ความคงทน (Durability)

ความสามารถที่โดดเด่นมาก คือ ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นการต้านทานซัลเฟต (เนื่องจากการลดการเกิด Ettringite) ลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา (เนื่องจากการดูดซับอัลคาไลไอออนโดยปฏิกิริยาปอชโซลานิก) เพิ่มการต้านทานการซึมผ่านอันเนื่องจากการเปลี่ยนขนาดและโครงสร้างของรูพรุน และลดโอกาสการเกิดสนิมในเหล็กเนื่องจากความต่างของปอชโซลานส่งผลให้ค่าพีเอชในคอนกรีตลดลงทำให้แผ่นฟิล์มปกป้องเหล็กเสริมไม่เกิดการเสื่อมสภาพลง เป็นต้น

2.4 ถ้ำลอยชีวมวล

ถ้ำลอยชีวมวล คือ ถ้ำลอยที่ได้เป็นวัสดุเหลือใช้จากการเผาชีวมวลในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ชีวมวล คือ วัสดุที่เหลือใช้จากการเกษตร เช่น เศษไม้ แกลบ ชังข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

2.4.1 ชีวมวล ที่มา : บริษัท เอ็นเนอร์จี เซฟวิ่ง โปรดักส์ จำกัด (ม.ป.ป.)

ชีวมวล หมายถึง สิ่งที่ได้จากสิ่งมีชีวิตหรือสารอินทรีย์ที่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานได้ โดยรวมถึงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต่าง ๆ เช่น ฟางข้าว แกลบ กากอ้อย ทะลายปาล์ม เศษไม้ มูลสัตว์ ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร และของเสียจากชุมชน ชีวมวล ในที่นี้คือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเท่านั้นจากการวิเคราะห์ข้อมูลผลผลิต และการใช้ชีวมวล พบว่าชีวมวลบางประเภทที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง และมีปริมาณคงเหลือไม่มาก หรือบางชนิดขาดแคลน อาทิเช่น แกลบ กากอ้อย ซึ่งชีวมวลเหล่านี้เป็นประเภทที่เกิดขึ้นที่โรงงานอุตสาหกรรม ผู้ประกอบการได้หาแนวทางในการใช้กำจัดและลดต้นทุนในการผลิตของตน ด้วยการใช้แทนเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ จนปัจจุบันเชื้อเพลิงเหล่านี้มีการซื้อ-ขาย และมีกลไกด้านการตลาดจนครบวงจรแล้วหรือชีวมวลประเภทที่เป็น เชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ ส่วนชีวมวลอีกหลายประเภทพบว่ามีปริมาณคงเหลืออยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีการใช้อยู่ในวงจำกัด หรือบางประเภทยังไม่ได้มีการนำไปใช้อย่างเป็นรูปธรรม ตัวอย่างข้อมูลการใช้ชีวมวลได้แก่

แกลบ จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ในปีเพาะปลูก 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตข้าวทั่วประเทศเท่ากับ 28.61 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณแกลบเท่ากับ 3.95 ล้านตัน โดยมีการนำแกลบเหล่านี้มาใช้งาน คิดเป็นปริมาณรวม 0.86 ล้านตัน หากนำปริมาณแกลบคงเหลือดังกล่าวมาหักด้วยปริมาณการสูญเสียของแกลบ ที่เกิดจากการขัดสี และการฟุ้งกระจายทั้งในระหว่างกระบวนการต่าง ๆ และการขนส่ง ดังนั้นปริมาณแกลบคงเหลือที่สามารถนำมาใช้งานได้จะมีค่าสุทธิเท่ากับ 3.09 ล้านตัน และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 843 Ktoe (Ktoe คือ พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ โดย 1 ตันน้ำมันดิบเท่ากับ 41.868 GJ หรือ 11.630 MWh) มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 320 MW

ชีเลื่อยและเศษไม้ยางพารา จากรายงานของสถาบันวิจัยยางพารา ทำให้ทราบว่าในแต่ละปีจะต้นยางพาราที่มีอายุเกิน 25 ปี ซึ่งครบรอบที่จะต้องทำการตัดฟัน คิดเป็นพื้นที่ยางพาราที่ถูกตัดฟัน 500,000 ไร่ต่อปี จะได้ปริมาณของไม้ยางพารา 200 ล้านตัน ซึ่งไม้ยางพาราที่ถูกตัดจะนำไปเข้ากระบวนการแปรรูปไม้เพื่อผลิตเฟอร์นิเจอร์ ดังนั้นจะมีชีวมวลที่ได้ภายหลังกระบวนการผลิต คิดเป็น

เศษไม้ 3.6 ล้านตัน และขี้เลื่อย 8 ล้านตัน เมื่อหักปริมาณที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ จะมีเศษไม้คงเหลือ 3.55 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 1,862 ktoe และพลังงานไฟฟ้า 707 MW ในส่วนของขี้เลื่อยจะมีปริมาณคงเหลือ 1,037 ktoe และพลังงานไฟฟ้า 394 MW

ซังข้าวโพด จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตร ในปีเพาะปลูก 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตข้าวโพดทั้งประเทศเท่ากับ 4.40 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณซังข้าวโพดเท่ากับ 0.84 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้ในภาคต่าง ๆ คิดเป็นปริมาณรวม 74,000 ตัน ทำให้ปริมาณชีวมวลคงเหลือมีค่าเท่ากับ 0.43 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 124.6 Ktoe คิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 47.31 MW

ขอดและใบอ้อย จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตรปี 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตอ้อยทั้งประเทศเท่ากับ 70 ล้านตัน คิดเป็นชีวมวลประเภท ขอดและใบอ้อยเท่ากับ 16.8 ล้านตัน เมื่อนำมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (ร้อยละ 40) จะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 6.72 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 1,935.7 Ktoe คิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 735 MW

2.4.2 เถ้าลอยชีวมวล

เถ้าลอยชีวมวลเป็นเถ้าที่เหลือจากวัสดุทางการเกษตรที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและต้องนำไปกำจัดทิ้งเพราะมีปริมาณมาก ซึ่งอาจเป็นการทิ้งเพื่อถมที่หรือทิ้งในบ่อทิ้งที่เตรียมไว้ นอกจากการนำไปทิ้งแล้วเถ้าชีวมวลบางชนิดสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีต

เถ้าชีวมวลที่มีศักยภาพที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้ต้องมีลักษณะดังนี้ คือ เป็นเถ้าที่มีออกไซด์ของซิลิกาหรือซิลิกาและอลูมินาออกไซด์สูงซึ่งโดยทั่วไปควรมากกว่าร้อยละ 50 ของทั้งหมด มีความละเอียดสูงหรือสามารถทำให้มีความละเอียดสูงได้และไม่เป็นผลึก คือสามารถทำปฏิกิริยากับด่าง (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) ได้ ซึ่งเถ้าลอยชีวมวลที่เข้าข่ายในลักษณะข้างต้น ได้แก่ เถ้าจากการเผากากปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) เถ้าจากการเผาแกลบ (Rice Husk Ash) หรือเถ้าจากการเผาแกลบร่วมกับเปลือกไม้ (Rice Husk - bark Ash) และเถ้าจากการเผาขานอ้อย (Bagasse Ash)

1) คุณภาพของเถ้าลอยชีวมวล

คุณภาพของเถ้าลอยชีวมวลแต่ละชนิด ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและความไม่เป็นผลึกของเถ้าเหล่านั้น ๆ เถ้าที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีตต้องเป็นเถ้าที่มีออกไซด์

ของซิลิกาอลูมินาและเหล็กรวมกันอย่างน้อยร้อยละ 50 และไม่เป็นผลึก ซึ่งถ้าดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานร่วมกับด่างที่มาจากปูนซีเมนต์ได้ดีและทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าเหล่านี้ในปริมาณที่เหมาะสม (คือไม่มากเกินไป) มีคุณภาพที่ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้า นอกจากนี้เถ้าที่นำมาใช้ต้องมีออกไซด์ของซิลเฟอร็อกไซด์ของอัลคาไล (พวกโซเดียมโปตัสเซียมและแมกนีเซียม) ปูนขาวอิสระ และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition : LOI) ต่ำ ๆ เพราะสารเหล่านี้มักทำให้คุณภาพของคอนกรีตต่ำลงและทำให้ความทนทานของคอนกรีตที่ผสมเถ้าเหล่านี้ลดลงด้วย

คุณภาพของเถ้ายังขึ้นกับปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ ความละเอียดของเถ้า หากเถ้ามีความละเอียดมากเท่าใดจะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีเท่านั้น เพราะเมื่อมีความละเอียดมากย่อมมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก และส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังและคุณภาพสูงขึ้นกว่าการใช้เถ้าที่มีความละเอียดที่ต่ำกว่า นอกจากนี้รูปร่างของเถ้าส่งผลต่อความสามารถในการลื่นไหลและคุณภาพของคอนกรีตเช่นกัน เถ้าจากชีวมวลทั้งหมดเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 1000 °C ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวยังไม่สูงพอที่จะทำให้เถ้าหลอมละลาย ดังนั้นรูปร่างของเถ้าชีวมวลจึงไม่แน่นอน มีรูพรุนสูง และ LOI ที่สูง ส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณน้ำที่ผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้นและความสามารถในการเทคอนกรีตลดลง

2) ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition : LOI)

ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์บอนและน้ำที่อยู่ในรูพรุนของเถ้าลอย โดยค่า LOI ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่นำมาเผา วัสดุที่มีแคลเซียมสูงจะมีปริมาณคาร์บอนสูง อุณหภูมิในการเผาที่ไม่สูงพอที่จะเผาไหม้ส่วนคาร์บอนจนหมดเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เถ้ามีปริมาณ LOI สูง และระยะเวลาในการเผา ถ้าใช้ระยะเวลาในการเผาสั้น ๆ ทำให้การเผาไหม้คาร์บอนไม่หมด ค่า LOI ของเถ้าก็จะมีค่าสูง มาตรฐาน ASTM C618 ระบุปริมาณ LOI ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 และถ้าเถ้าลอยแคลเซียมสูงจะมีปริมาณคาร์บอนสูงซึ่งอาจสูงเกินร้อยละ 10 ดังนั้นมาตรฐานจึงกำหนดให้สามารถใช้เถ้าลอยชนิด F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้ ปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เนื่องจากทำให้เถ้าลอยมีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูงทำให้สามารถดูดน้ำได้มาก และทำให้ความต้องการน้ำของเถ้าลอยสูงขึ้น

3) การนำเถ้าชีวมวลไปใช้งาน

เหตุผลหลักที่นิยมใช้เถ้าชีวมวลในงานคอนกรีตมากกว่าจะนำไปใช้ในงานประเภทอื่นเนื่องจาก

- 3.1) การใช้เถ้าชีวมวลเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมคอนกรีตทำให้สามารถใช้เถ้าชีวมวลได้เป็นจำนวนมาก เพราะในแต่ละปีมีการใช้ปูนซีเมนต์ในประเทศจำนวนมากคือประมาณ 30 ล้านตัน ซึ่งหากใช้เถ้าชีวมวลจากโรงงานอุตสาหกรรมแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 5 จะสามารถใช้เถ้าได้ถึง 1.5 ล้านตันหรือทั้งหมดของปริมาณที่ผลิตได้และสามารถลดปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากเถ้าออกไปได้เกือบทั้งหมด
- 3.2) เทคโนโลยีเกี่ยวกับการผลิตคอนกรีตเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนมากและสามารถเรียนรู้ได้ง่ายโดยใช้บุคลากรที่ดำเนินงานในด้านที่เกี่ยวข้องคอนกรีตอยู่แล้วมาอบรมเพิ่มเติมก็สามารถเข้าใจ และนำเถ้าชีวมวลไปใช้ได้โดยถูกต้องและเหมาะสม
- 3.3) จากข้อมูลการศึกษาและงานวิจัยทั้งจากภายในและต่างประเทศล้วนให้ผลตรงกันว่า การใช้เถ้าชีวมวลที่มีองค์ประกอบเคมีที่เหมาะสมมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ไม่มากจนเกินไป และเป็นเถ้าที่มีความละเอียดสูง พบว่าสามารถทำให้คอนกรีตมีคุณภาพและคุณสมบัติที่ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้า ทั้งด้านกำลังและด้านความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง

2.5 คอนกรีต (Concrete)

คอนกรีตในความหมายทางด้านวิศวกรรมโยธา คือ วัสดุประกอบ (Composite Materials) ที่เกิดจากส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ ปูนซีเมนต์ มวลรวม และน้ำ เมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่งพอที่จะนำไปเทลงแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากนั้นจะแปรสภาพเป็นของแข็งที่มีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับการยอมรับและใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากความได้เปรียบหลายประการเหนือวัสดุอื่น เช่น การมีความสามารถในการขึ้นรูปในลักษณะใดก็ได้ การมีคุณสมบัติทั้งเชิงกลและกายภาพ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตหาได้ง่าย ราคาต้นทุนการผลิตต่ำ และใช้งานง่าย

2.5.1 องค์ประกอบของคอนกรีต

คอนกรีต ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ โดยเมื่อนำส่วนผสมต่าง ๆ เหล่านี้มาผสมกันจะมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้

- 1) ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste)
- 2) ซีเมนต์เพสต์ผสมกับทราย เรียกว่า มอร์ตาร์ (Mortar)
- 3) มอร์ตาร์ผสมกับหิน เรียกว่า คอนกรีต (Concrete)

โดยส่วนผสมมีหน้าที่แตกต่างกันไป ซึ่งหน้าที่ของซีเมนต์เพสต์ คือ เสริมช่องว่างระหว่างมวลรวมห่อหุ้มคอนกรีตสดขณะเทหล่อ และให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัว รวมทั้งป้องกันการซึมผ่านของน้ำ สำหรับมวลรวมมีหน้าที่ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง และน้ำมีหน้าที่หลักคือ ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์ ทำหน้าที่หล่อลื่นเพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทได้ และเคลือบผิวหินทรายให้เปียกเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์สามารถเข้าเกาะได้โดยรอบ

2.5.2 มอร์ตาร์

มอร์ตาร์ (Mortar) ได้จากการนำปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำและทราย ซึ่งหล่อในแบบกลายเป็นก้อนแข็งที่มีขนาด $50 \times 50 \times 50$ มิลลิเมตร ใช้ตามมาตรฐานของ ASTM C109 เพื่อทดสอบการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ซึ่งจะใช้ผลที่ได้จากมอร์ตาร์เป็นผลสะท้อนต่อการผลิตคอนกรีต ดังนั้นในการผสมส่วนผสมสำหรับทำชิ้นงานมอร์ตาร์จึงใช้วิธีการทดสอบต่าง ๆ เหมือนกับคอนกรีต คือ การทดสอบความสามารถเทได้ (คอนกรีตสด) และการทดสอบกำลังอัด (คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว) คอนกรีตสด หมายถึงคอนกรีตที่ยังมีสภาพเหลวเหมาะที่จะนำไปใช้งานหรือมีความสามารถในการเทได้ โดยเป็นช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ประมาณ 2 - 3 ชั่วโมง นับจากการเริ่มผสม แม้จะเป็นช่วงระยะเวลาสั้น ๆ แต่เป็นช่วงที่มีความสำคัญมากต่อการทำงานคอนกรีตโดยรวม โดยจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญที่ถือว่าเป็นคอนกรีตสดที่ดี คือ ผสมได้เพียงพอจนมีเนื้อสม่ำเสมอเหมือนกันมีความสามารถในการไหลหรือเทได้ดี มีความสามารถในการอัดแน่นโดยไม่ต้องใช้พลังงานมาก และไม่มีการแยกตัว (มีความชื้นเหลวพอเหมาะ) ระหว่างการเทคอนกรีต สรุปได้ว่าความสามารถในการเทหรือการทำงาน (Workability) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการทำคอนกรีต

2.5.3 คอนกรีตสด

คอนกรีตสดประกอบด้วยของแข็ง ได้แก่ มวลรวมและปูนซีเมนต์ที่แขวนลอยอยู่ในของเหลวซึ่งก็คือ น้ำ คุณสมบัติสำคัญของคอนกรีตสด คือ ความสามารถทำงานได้ (Workability) ซึ่งหมายถึงคุณสมบัติหรือพฤติกรรมการเสียรูปของคอนกรีตสดภายใต้แรงกระทำ โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดมีดังนี้

1) สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C Ratio)

สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์นั้นแปรผันตรงกับความสามารถในการเท (แต่แปรผกผันกับค่ากำลัง) การมีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง หมายถึง การที่คอนกรีตมีน้ำในปริมาณมากทำให้เทได้ดีและง่าย แต่การมีน้ำมากนั้นทำให้คอนกรีตมีรูพรุนสูง (น้ำมากเกินไปถูกใช้ไม่หมดในกระบวนการไฮเดรต เหลือเป็นช่องว่างในเนื้อคอนกรีต) ส่งผลให้กำลังอัดต่ำลง

2) มวลรวม (Aggregates)

รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต อนุภาคของมวลรวมที่กลมจะทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ดีกว่ามวลรวมที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมเป็นมุม เพราะมวลรวมกลมมีการขัดกันระหว่างวัสดุน้อย นอกจากนี้มวลรวมกลมยังมีพื้นผิวต่ำ ทำให้ต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์มาเคลือบและหล่อลื่นน้อย ขนาดและการกระจายตัวของมวลรวมมีอิทธิพลต่อความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต มวลรวมที่มีอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากทำให้ต้องการน้ำและซีเมนต์เพสต์มากขึ้น มวลรวมที่มีรูพรุนสูง มีการดูดซึมน้ำมากทำให้การสูญเสียการยุบตัวเกิดเร็วขึ้น และต้องเผื่อปริมาณของน้ำดังกล่าวในส่วนผสมไว้ด้วย

3) ชนิดของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยาได้รวดเร็วและความสามารถเทได้ของคอนกรีตจะลดลง ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมาก เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 จะต้องการน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดอื่นที่มีอัตราส่วนผสมเหมือนกันเพราะมีพื้นที่ผิวมากและไวต่อการทำปฏิกิริยา

4) ระยะเวลาและอุณหภูมิ

ความสามารถเทได้ของคอนกรีตจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพราะความร้อนทำให้การระเหยของน้ำเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในกรณีที่อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะยิ่งทำให้การสูญเสียน้ำเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำเกิดได้รวดเร็วขึ้นที่อุณหภูมิสูง ทำให้ความสามารถเทได้จะลดลงตามเวลาหลังจากการผสมคอนกรีต การผสมช้าเพื่อปรับค่ายุบตัวของคอนกรีตโดยใส่น้ำในคอนกรีตและผสมช้าในขณะที่คอนกรีตยังไม่ก่อตัวและแข็งตัวจะทำให้ความสามารถเทได้ดีขึ้นได้อีก แต่คอนกรีตดังกล่าวอาจมีกำลังต่ำลงเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นการแก้ไขด้วยวิธีนี้จึงควรทำด้วยความระมัดระวัง และถ้าเป็นไปได้ควรใช้

วิธีการเติมสารเคมีผสมเพิ่มเพื่อให้ค่ายุบตัวสูงขึ้น หรือเติมน้ำปูนชั้นที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ไม่สูงกว่าของคอนกรีตที่ผสม ซึ่งทำให้คอนกรีตมีค่ายุบตัวและกำลังตามที่ต้องการได้

5) สารผสมเพิ่ม

การเพิ่มความสามารถเทได้ของคอนกรีตสดสามารถทำได้โดยใช้สารหน่วงการก่อตัวนอกจากนี้สารกักกระจายฟองอากาศและสารลดน้ำก็ช่วยทำให้ความสามารถเทได้ของคอนกรีตดีขึ้น การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตจะช่วยให้ความสามารถเทได้ดีขึ้นและลดการแยกตัวในคอนกรีต แต่จะทำให้กำลังอัดในช่วงอายุต้นมีค่าต่ำลงเนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงและปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยเกิดได้ช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.5.4 คอนกรีตแข็งตัว

คุณสมบัติในขณะที่ยังอยู่ในสภาพเหลวจะมีความสำคัญเพียงขณะก่อสร้างเท่านั้น ในขณะที่คุณสมบัติขณะที่แข็งตัวแล้วจะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างนั้น อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติคุณสมบัติทั้ง 2 ลักษณะจะมีผลต่อกันและกัน การที่จะทำให้ได้คุณสมบัติที่แข็งตัวแล้วจะต้องมาจากการเลือกสัดส่วนผสมเพื่อให้อยู่ในสภาพเหลวมีความเหมาะสมอย่างมากในการใช้งาน ดังนั้นการทดสอบมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้วจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้มั่นใจว่าคุณสมบัติของมอร์ตาร์นั้นเป็นไปตามที่ออกแบบและสามารถใช้งานได้ การทดสอบมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้วที่สำคัญคือ การทดสอบการรับกำลังซึ่งเป็นที่รู้กันว่าเป็นวัสดุประมามีกำลังรับแรงอัดสูง และกำลังรับแรงดึงต่ำ ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงคุณสมบัติด้านกำลังมักจะหมายถึงกำลังอัดเป็นหลัก

1) การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดนั้นมีมาตรฐานกำหนดไว้หลายมาตรฐาน แต่ที่นิยมใช้กันมาก คือ มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing Materials) และ BS (British Standard) ทั้งสองวิธีเป็นวิธีที่ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายน้อย ความแตกต่างของทั้งสองวิธีนั้นอยู่ที่รูปทรงของชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ โดยวิธีของ ASTM (C39, C31, C192, C471) จะใช้รูปทรงของชิ้นตัวอย่างแบบทรงกระบอกที่มีขนาดมาตรฐานอยู่ที่ความสูง 300 mm และเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm การทดสอบแท่งตัวอย่างจะกระทำโดยจำกัดความเร็วของการกดที่ประมาณ 0.05 in/min หรือ 0.15 – 0.35 MPa/sec

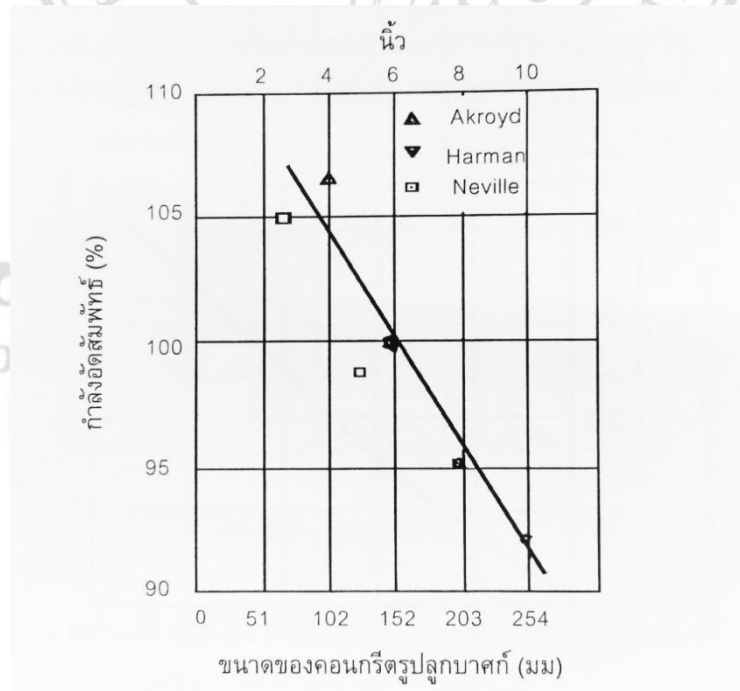
สำหรับการทดสอบตามมาตรฐานอังกฤษ (BS) รูปทรงของแท่งตัวอย่างจะเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 150 mm ในการทดสอบจะใช้ด้านเรียบทางด้านข้าง ข้อเสียเปรียบของการ

ทดสอบโดยรูปทรงลูกบาศก์ คือ ความถี่ระหว่างผิวสัมผัสที่มีมาก ทำให้เกิดความเค้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าการทดสอบตัวอย่างทรงกระบอก ส่งผลให้ค่ากำลังอัดที่ได้สูงกว่าประมาณร้อยละ 4 – 30 ซึ่งจำเป็นต้องมีการปรับลดให้ใกล้เคียงกัน

ผลกระทบเนื่องจากขนาดของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ ส่งผลต่อกำลังอัดของตัวอย่างทดสอบ โดยที่ขนาดของแท่งทดสอบที่ใหญ่กว่าจะให้กำลังในรูปของหน่วยแรง (น้ำหนักต่อพื้นที่หน้าตัดหรือความเค้น) ที่ต่ำกว่าดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ รูปที่ 2.6 เนื่องจากตัวอย่างคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีจุดอ่อนมากกว่า จุดอ่อนดังกล่าวได้แก่โพรงอากาศ รอยร้าวภายในเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่เกิดจากการหดตัว หรือจุดอ่อนที่ผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมหยาบและซีเมนต์เพสต์

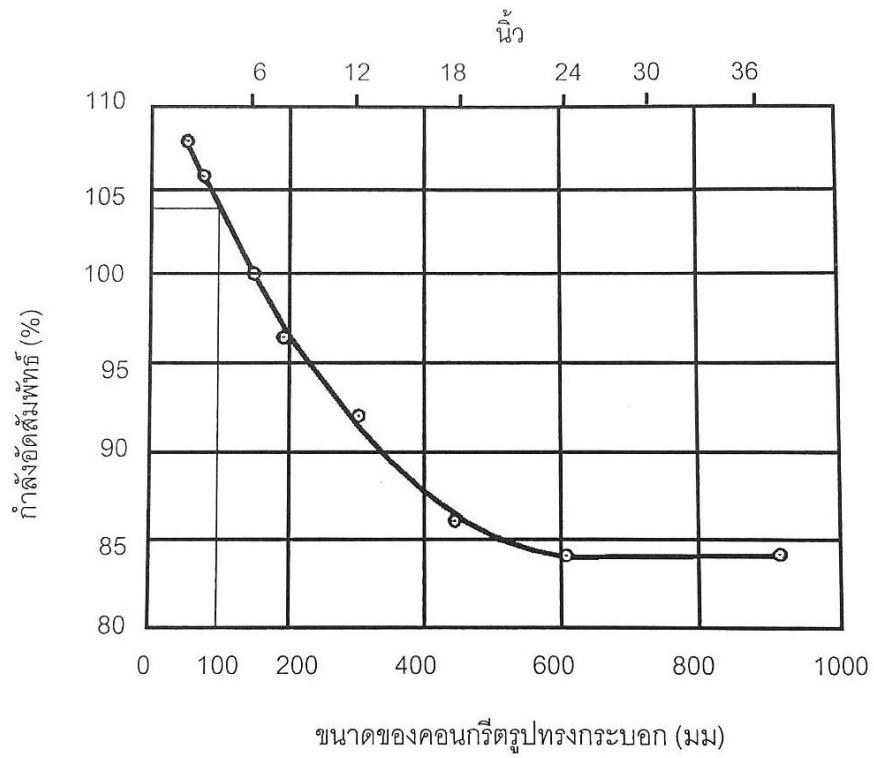
2) ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่าง

ลักษณะการชำรุดแตกหักของก้อนตัวอย่างที่รับแรงอัด มักแตกออกเป็นแบบผ่าซีก หรือแนวตรง (Splitting Failure) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ก) หรืออาจแตกเป็นรอยแตกแบบเฉือนหรือรูปกรวยคู่ (Shear Failure) โดยมีปลายกรวยอยู่ที่กึ่งกลางของแท่งทดสอบทรงกระบอกดังรูปที่ 2.7 (ข) หรือเป็นการรวมลักษณะการแตกของทั้ง 2 แบบ (Combination Shear and Splitting Failure) ดังรูปที่ 2.7 (ค)

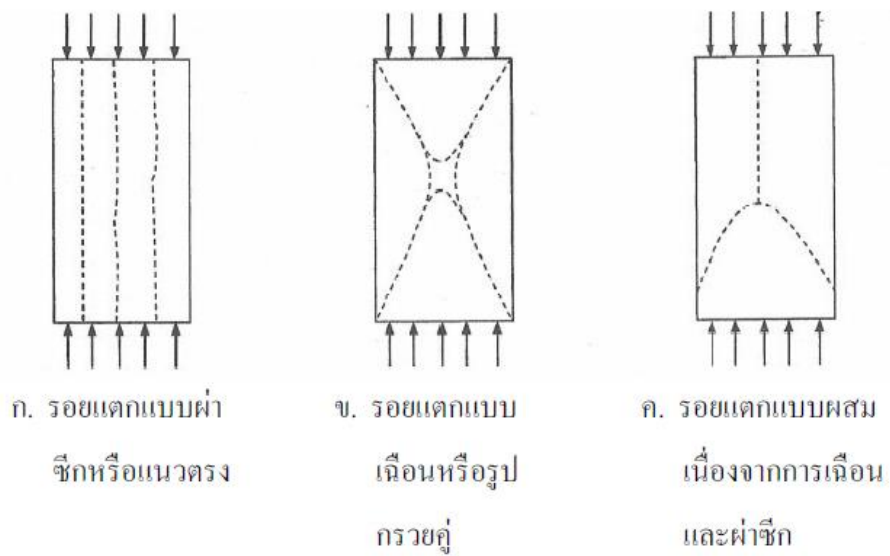


รูปที่ 2.5 กำลังอัดของคอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่ใช้ขนาดต่าง ๆ กัน

ที่มา : A.M. Neville (1959)



รูปที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์ของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ใช้ขนาดต่างๆ กัน
ที่มา : R.F. Blanks (1935)

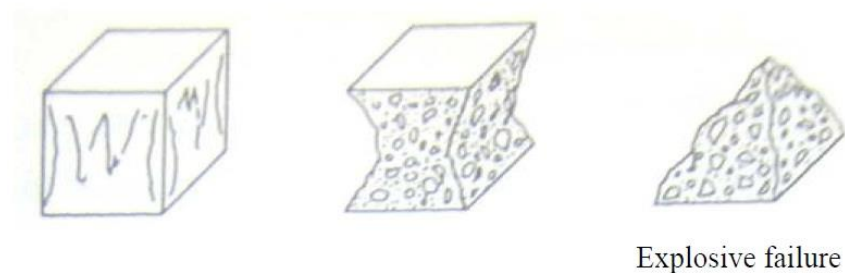


รูปที่ 2.7 การแตกของก้อนตัวอย่างทรงกระบอก
ที่มา : รัชวาลย์ เศรษฐบุตร (2552)

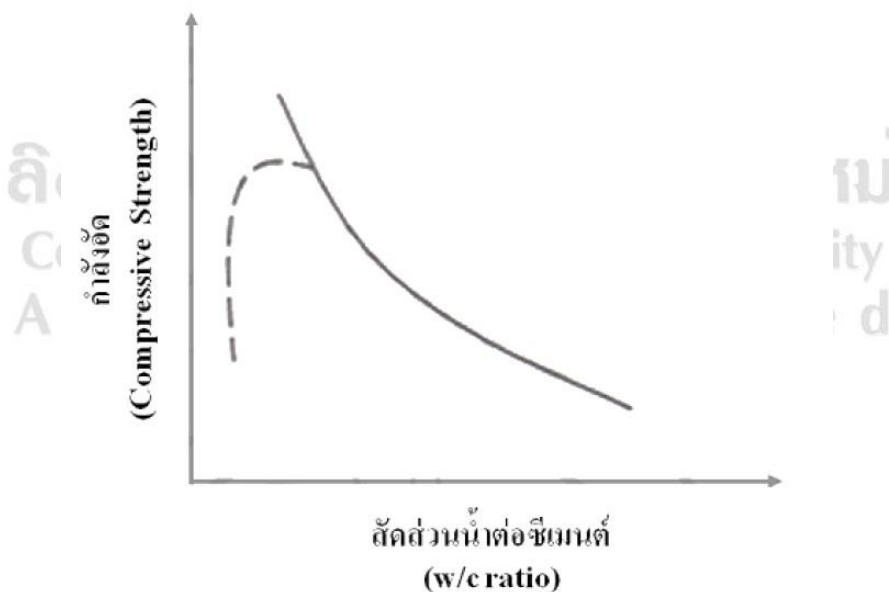
3) ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต

3.1) สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์

พบว่ากำลังของคอนกรีตแปรผกผันต่อระดับ W/C Ratio หมายความว่าเมื่อ W/C Ratio ลดลงกำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.8 เหตุผลง่าย ๆ ที่นำมาอธิบายคือในคอนกรีตที่มี W/C Ratio สูงหรืออีกนัยหนึ่งคือมีปริมาณน้ำมาก น้ำที่เหลือจากกระบวนการไฮเดรตจะตกค้างในเนื้อคอนกรีต และเมื่อน้ำระเหยออกไปหมดช่องว่างที่น้ำเหล่านี้เคยอยู่ก็จะกลายสภาพเป็นรูพรุนในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำและตามมาด้วยกำลังอัดที่ต่ำ ส่วนลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ถูกต้องจะแตกเป็นรูปปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 การแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ถูกต้อง
ที่มา : รัชวาลย์ เศรษฐบุตร (2552)



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง W/C ratio และกำลังอัด
ที่มา : ปิติ สุคนธสุขกุล (2549)

3.2) ปริมาณน้ำประสิทธิผล (Effective Water)

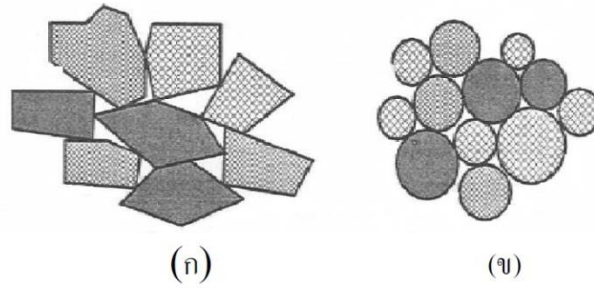
ปกติมักคิดว่า ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตที่ใส่เข้าไปทั้งหมดถูกใช้ กระบวนการไฮเดรต แต่ในสภาพความเป็นจริง น้ำบางส่วนได้หายไปโดยอาจเกิดจากการระเหย หรือ การดูดซับของมวลรวม โดยเฉพาะกรณีของมวลรวม เนื่องจากสถานะของมวลรวมที่เหมาะสมที่สุดในการผสมคอนกรีตนั้นควรจะมีความชื้นในระดับอิ่มตัวแห้ง (Saturated Surface Dry : SSD) หมายความว่ามวลรวมที่มีระดับความชื้นต่ำกว่านี้จะดูดซับน้ำเพื่อให้ระดับความชื้นเพิ่มสู่ระดับ SSD ทำให้ปริมาณน้ำประสิทธิผลหายไป แต่ถ้าหากมวลรวมที่มีระดับความชื้นมากกว่าระดับ SSD จะคายน้ำออกมา ทำให้ปริมาณน้ำประสิทธิผลเพิ่มขึ้น

3.3) รูพรุน (Porosity)

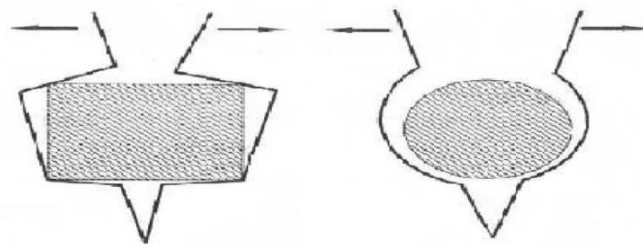
ขนาดของรูพรุนนั้นมีผลต่อกำลังของคอนกรีต โดยการที่มีรูพรุนจำนวนมาก ทำให้คอนกรีตมีกำลังลดต่ำลง แต่อย่างไรก็ตามรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 20 นาโนเมตร มีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตน้อยมาก โดยจะมีเฉพาะรูพรุนขนาดใหญ่เท่านั้นที่มีผลโดยตรงต่อกำลังของคอนกรีต นอกจากนี้คอนกรีตที่มีการไฮเดรตที่ดี มักมีจำนวนของรูพรุนขนาดเล็กน้อยกว่าคอนกรีตที่มีการไฮเดรตที่ไม่ดี การไฮเดรตที่ดี หมายถึง การไฮเดรตที่ต่อเนื่องไม่ขาดตอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงต้น วิธีการที่จะทำให้เกิดการไฮเดรตต่อเนื่อง คือ การบ่ม นั่นเป็นเหตุผลที่การบ่มเป็นหัวใจสำคัญของการทำคอนกรีตที่ดี

3.4) อิทธิพลของมวลรวม (Aggregates)

พิจารณาในเรื่องรูปทรงและพื้นผิวของมวลรวม โดยการใช่มวลรวมที่มีรูปทรงเป็นเหลี่ยมมุม อนุภาคของมวลรวมจะมีการล็อกจับกันดีกว่ามวลรวมที่มีรูปร่างกลม ดังรูปที่ 2.10 ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ามวลรวมที่เป็นเหลี่ยมมุมยังมีความสามารถในการหยุดหรือชะลอการเคลื่อนที่ของรอยร้าวได้ดีกว่ามวลรวมที่มีผิวทรงกลมซึ่งปล่อยให้การเคลื่อนที่ของรอยร้าวผ่านไปได้ง่าย ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 การลือกั้บระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่มีรูปทรง (ก) เหลี่ยมมุมและ (ข) กลม
ที่มา : ปิติ สุคนธ์สุขกุล (2549)



รูปที่ 2.11 ความสามารถในการชะลอการเคลื่อนที่ของรอยร้าวของมวลรวมที่มีรูปร่างต่างกัน
ที่มา : ปิติ สุคนธ์สุขกุล (2549)

3.5) การบ่ม (Curing)

คอนกรีตต้องการน้ำสำหรับทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ถ้ามีน้ำในส่วนผสมคอนกรีตมากเกินไปจะทำให้เกิดช่องว่างในโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์มาก และการรับกำลังจะลดลง ดังนั้นจึงพยายามใส่น้ำให้เพียงพอกับการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์เท่านั้น ในทางทฤษฎีปริมาณน้ำในอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.42 ก็เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัติส่วนผสมต้องการน้ำมากกว่าเพราะมีการสูญเสียน้ำในระหว่างการทำปฏิกิริยา หากมีการสูญเสียน้ำจนทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในคอนกรีตลดลงต่ำกว่าร้อยละ 80 คอนกรีตจะเกิดการแห้งตัว (Self-desiccation) ต่อจากนั้นคอนกรีตจะไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อีก ยกเว้นว่าจะได้น้ำมาจากภายนอก ดังนั้นจึงต้องมีการบ่มคอนกรีตเพื่อให้อำนาจปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนากำลังของคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างเต็มที่โดยการป้องกันการสูญเสียน้ำของคอนกรีต

2.6 การทดสอบการวิเคราะห์รูปร่างและผลึกของเถ้าลอยชีวมวล

นอกจากการวิเคราะห์เชิงกายภาพ เพื่อที่จะหาข้อมูลที่จะสามารถนำมาใช้อธิบายการเกิดสมมุติฐานได้ จำเป็นที่จะต้องศึกษาลงลึกไปถึงผลึกภายในของเถ้าลอยชีวมวล เพื่อสังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงของผลึกบางชนิด ที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์แต่ละสัดส่วน โดยการศึกษาในส่วนของการวิเคราะห์ผลึก จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

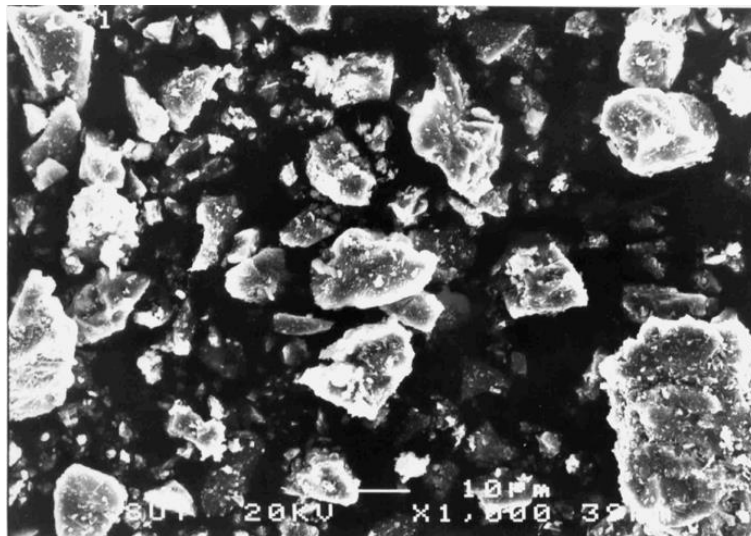
2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน Scanning Electron Microscope (SEM)

เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ช่วยขยายภาพประเภท กล้องจุลทรรศน์ ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบให้ได้ข้อมูลของลักษณะพื้นผิวปรากฏ เป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรืออาจบันทึกภาพที่บนแผ่นฟิล์มได้

กล้อง SEM นั้น มีวิวัฒนาการมาจากกล้องจุลทรรศน์ที่เรียกว่า กล้อง TEM ย่อมาจาก Transmission Electron Microscope ซึ่งเป็นกล้องอิเล็กตรอนที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องผ่านตัวอย่างที่บางมาก และภาพที่ปรากฏขึ้นจะเป็นเงาปรากฏบนแผ่นรับภาพซึ่งสามารถบันทึกบนแผ่นฟิล์มได้

กล้อง SEM และ TEM นั้นมีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานคล้ายคลึงกันในระบบ โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับระบบสุญญากาศทำให้มีลำแสงอิเล็กตรอนและระบบเส้นสั่นสามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีบทบาทในการรวมหรือกระจายลำแสงอิเล็กตรอนตัวอย่างที่ต้องการศึกษาหรือตรวจสอบ ระบบอื่น ๆ ของกล้องทั้งสองประเภทมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน นั่นคือ ระบบการสร้างภาพและลักษณะของภาพที่ปรากฏนั้นคือ TEM มีระบบของการเกิดภาพได้ง่าย ภาพที่ปรากฏให้ผู้เห็นได้ตรงบนแผ่นรับภาพและภาพนั้นเกิดความแตกต่างระหว่างความโปร่งใสและความทึบแสงที่ลำแสงอิเล็กตรอนผ่านหรือไม่สามารถจะผ่านได้ภาพที่ปรากฏก็คือเงาของตัวอย่าง ส่วนระบบการเกิดภาพใน SEM เป็นระบบที่ค่อนข้างจะยุ่งยากไม่ใช่เป็นเงาที่ภาพที่เกิดขึ้นโดยตรงอันเกิดจากลำแสงอิเล็กตรอนผ่านหรือไม่สามารถจะผ่านตัวอย่างในภาพ SEM จึงเป็นภาพที่เกิดขึ้นทางอ้อม ซึ่งเป็นการรวบรวมสัญญาณที่เกิดภายหลังจากการกระทบของลำแสงอิเล็กตรอนไปแล้วเปลี่ยนไปเป็นภาพให้ปรากฏบนจอภาพที่มีลักษณะคล้ายจอโทรทัศน์หรืออีกนัยหนึ่งภาพที่เกิดขึ้นใน SEM ก็คือผลจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นภาพถึงแม้ว่าภาพซึ่งเป็นผลหรือข้อมูลที่ได้รับมาโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้งสองประเภทดังกล่าว คือทั้ง TEM และ SEM จะเป็นภาพของตัวอย่างที่เป็นภาพขยายและมีรายละเอียดสูงก็ตาม ภาพที่เกิดจากการใช้อุปกรณ์ทั้งสองประเภทมีลักษณะที่แตกต่างกันมาก ภาพที่ได้รับจากการใช้ TEM เป็นภาพขยายที่มีการแจกแจงรายละเอียดสูง และมีลักษณะ 2 มิติ ส่วนภาพที่ได้รับจากการ SEM นั้นนอกเหนือจากเป็นภาพที่มีคุณสมบัติในด้าน

กำลังขยายและรายละเอียดแล้ว ภาพที่ปรากฏจากการใช้ SEM ยังมีลักษณะพิเศษอีกหนึ่งอย่าง คือเป็นภาพที่มีความลึกหรือเป็นภาพประเภท 3 มิติ ภาพตัวอย่างของผลึกในการทดสอบด้วย SEM จะมีความละเอียดค่อนข้างสูงสามารถสังเกตเห็นขนาดของผลึกได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 รูปร่างถ้ำเกลบ-เปลือกไม้จากโรงไฟฟ้า
ที่มา : ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2545)

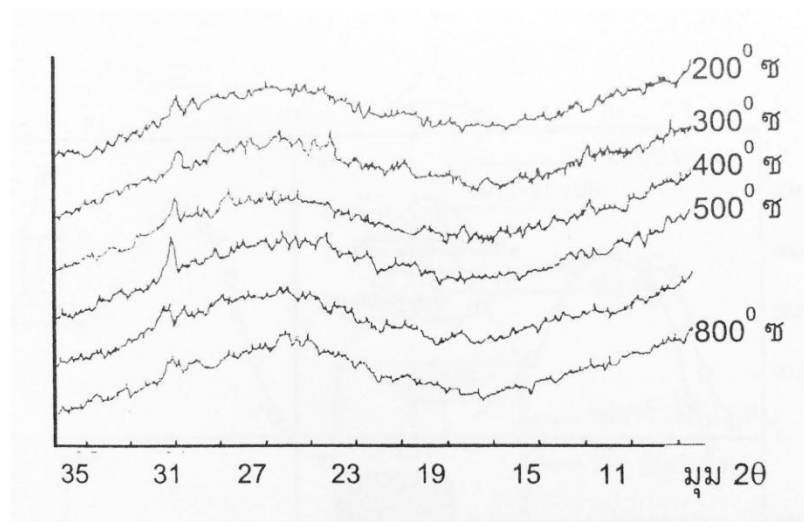
2.6.2 การทดสอบ Energy Dispersive X - ray Fluorescence Spectrometer (EDX)

การทดสอบ EDX เป็นเทคนิควิเคราะห์ธาตุ สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ธาตุโซเดียมจนถึงธาตุยูเรเนียมทั้งในเชิงภาพและเชิงปริมาณหลักการของเทคนิคนี้ คือ ให้รังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดเข้าไปชนสารตัวอย่าง รังสีเอ็กซ์จะทำให้อิเล็กตรอนในวงในสุดของอะตอมของธาตุหลุดออกไป อิเล็กตรอนในวงถัดมาจะเข้ามาแทนที่ และคายพลังงานส่วนเกินออกมาในลักษณะของเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ ซึ่งจะมีค่าพลังงานเป็นค่าเฉพาะของตัวของธาตุนั้นเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และความเข้มข้นของเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ที่เกิดขึ้นจะเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงปริมาณธาตุประกอบตรงจุดที่ทดสอบ โดยปกติเครื่องทดสอบ EDX จะติดตั้งเข้ากับกล้อง SEM ทำให้การทดสอบทั้ง 2 อย่างสามารถทดสอบควบคู่กันได้

2.6.3 เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction, XRD)

การทดสอบ XRD ใช้สำหรับวิเคราะห์เพื่อศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการศึกษา โดยอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุ หรืออนุภาคใด ๆ จะเกิดการหักเหของลำรังสี สะท้อนกลับออกมาทำมุม กับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุม

รังสีตกกระทบ และนำค่ามุมที่อ่านได้มาเปรียบเทียบกับแพทเทิร์นเพื่อตรวจสอบว่าเป็นผลึกชนิดใด ตัวอย่างผลทดสอบ XRD ของเถ้าแกลบแสดงในรูปที่ 2.13 โดยที่การศึกษาผลึกโดยใช้ XRD จะเป็นการวิเคราะห์โดยไม่ทำลายชิ้นตัวอย่าง จึงมีความนิยมนำไปแพร่หลายในการทดสอบด้านเคมี และ เคมีชีวภาพ ในปัจจุบัน การตรวจสอบคุณสมบัติและโครงสร้างผลึกด้วย XRD มีความก้าวหน้า สะดวก และรวดเร็วขึ้นมาก ส่งผลช่วยให้เกิดการพัฒนา และ ยกระดับการวิเคราะห์วิจัย สูงขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 2.13 ผลทดสอบ XRD ของเถ้าแกลบที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน
ที่มา : P.C. Kapur (1981)

หลักการการทำงานของ XRD นั้นจะใช้ลำรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวฉายลงบนตัวอย่างที่ถูกวางอยู่บนแท่นหมุนเป็นมุม θ เท่ากับ $0-90^\circ$ รังสีที่เลี้ยวเบนจะถูกตรวจวัดได้แล้วบันทึกบน Inked Strip Chart เครื่องตรวจวัดจะหมุนไปพร้อม ๆ กับแท่นหมุน แต่จะหมุนเป็นมุม 2θ และ Strip Chart จะหมุนไปพร้อมกับแท่นหมุนและเครื่องตรวจวัดด้วยความเร็วคงที่ เพื่อบันทึกค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ แล้วนำมาพล็อตกราฟ Diffractogram ซึ่งประกอบด้วยพีคต่าง ๆ โดยที่พีคแต่ละจุดยอดกราฟจะเป็นลักษณะเฉพาะของเฟสอะตอมต่าง ๆ จากความสัมพันธ์ของสมการของ Bragg จะสามารถหาค่า d ของแต่ละจุดยอดกราฟแล้วนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่มีอยู่ เช่น JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) เป็นต้น ก็จะสามารหหาปริมาณสัมพัทธ์ของเฟสที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ โดยเทคนิคที่ใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แบ่งเป็น 2 เทคนิคได้ดังนี้

1) Single - Crystal Methods

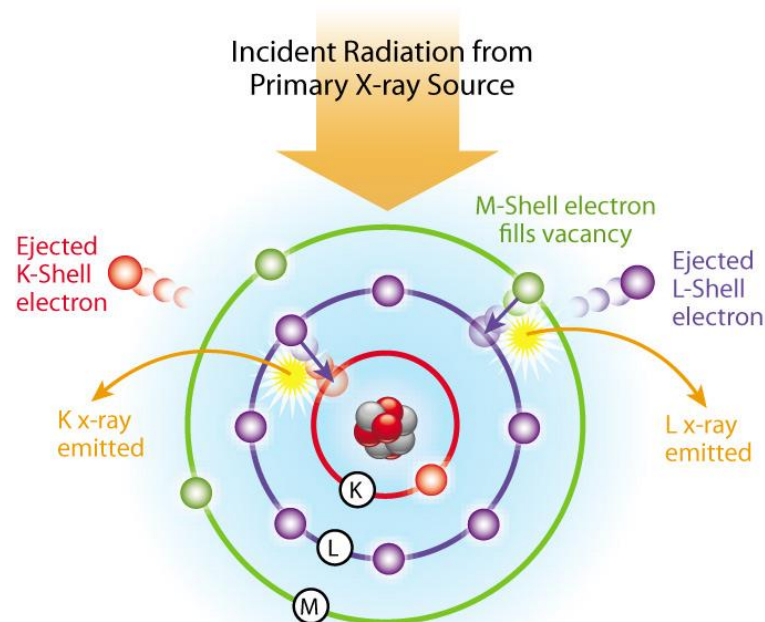
เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจโครงสร้างอะตอม เช่น ความสมมาตร ตำแหน่ง หรือ ช่องว่าง เป็นต้น โดยที่จะทำการยิงรังสีเอ็กซ์ที่มีคลื่นความยาวค่าเดียว และใช้การเปลี่ยนมุมโดยหมุน ผลึกที่อยู่บนแท่นหมุน และใช้ Diffractometer ที่มีความแม่นยำสูงในการเก็บข้อมูล และประมวลผล ด้วยคอมพิวเตอร์ต่อไป

2) Powder Method

โดยทั่วไปวิธีการนี้จะใช้ระบุแร่ธาตุ โดยจะใช้บอกร่องประกอบและตรวจวัด ความสัมพันธ์ของธาตุที่มีอยู่ในสารผสม เช่นเดียวกับ Single - Crystal Methods แต่เดิมนั้นจะใช้ เทคนิคของการถ่ายภาพในการบันทึกข้อมูลการเลี้ยวเบน แต่ในปัจจุบันจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า X-ray Powder Diffractometer และยังสามารถช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเตรียมตัวอย่างผลึกแล้วไม่สามารถใช้วิธีการแรกในการตรวจวัดได้

2.7 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี โดยวิธี X - ray Fluorescence (XRF)

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่างที่ใช้คือ การวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่างโดยมีหลักการ และวิธีการวิเคราะห์คือ เมื่อรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (Primary X - ray Photon) จากหลอดรังสีเอ็กซ์พุ่งเข้าชน สารตัวอย่างจะเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K - Shell) ของอะตอมภายในสารตัวอย่างหลุดออกจาก อะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้นแสดงดัง รูปที่ 2.14 ซึ่งที่สภาวะนี้อะตอมจะไม่เสถียร อะตอมจะกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับ พลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทน ที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของ อิเล็กตรอนจะมีการ ปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิ (Secondary X - ray Photon) ซึ่งปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า “ฟลูออเรสเซนซ์” (Fluorescence) พลังงานของรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมาจะมีค่าที่ แตกต่างกันขึ้นกับความแตกต่างของระดับพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนวงนอกที่ เกิดการเปลี่ยน ระดับพลังงานกับระดับพลังงานของช่องว่างที่เกิดจากรังสี เอ็กซ์ปฐมภูมิ รังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่เกิดจาก ปรากฏการณ์ ฟลูออเรสเซนซ์จะเป็นรังสีเอ็กซ์ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ดังนั้นเทคนิค XRF เป็นวิธีที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบ ของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.14 กระบวนการทดสอบองค์ประกอบของธาตุด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF)

ที่มา : Thermo Scientific (ม.ป.ป)

2.8 การวิเคราะห์การถดถอยด้วยโปรแกรม SPSS ที่มา : ฉัตรศิริ ปิยะพมลสิทธิ์ (2548)

การวิเคราะห์การถดถอยคือกระบวนการทางสถิติเพื่อให้ได้สมการถดถอยสำหรับทำนายปรากฏการณ์ต่าง ๆ สิ่งที่ถูกทำนายเรียกว่าตัวแปรเกณฑ์หรือตัวแปรตาม ตัวแปรทำนายคือตัวแปรอิสระในกระบวนการนี้ ตัวแปรตามหรือตัวแปรเกณฑ์จะมีเพียงตัวเดียว ส่วนตัวแปรอิสระหรือตัวแปรทำนายจะมีกี่ตัวก็ได้ ถ้าหากมีตัวเดียว จะเรียกว่าการถดถอยอย่างง่าย หากมีตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป จะเรียกว่า การถดถอยพหุคูณ

2.8.1 การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย

การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่ายจะประกอบไปด้วยตัวแปรเกณฑ์ 1 ตัวและตัวแปรทำนาย 1 ตัว มีสมการที่เขียนอยู่ในรูปของค่าพารามิเตอร์ดังสมการที่ 2.12

$$Y_i = a + bX \quad (2.12)$$

เมื่อ Y_i คือ ค่าของข้อมูลที่ i

a คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลเมื่อค่า X เท่ากับ 0 หรือจุดตัดแกน Y

b คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยในข้อมูลหรือความชันของเส้นถดถอย

สัมประสิทธิ์การถดถอย (b) เป็นค่าที่มีอิทธิพลของตัวแปรอิสระบนตัวแปรตาม อธิบายได้ง่าย ๆ ว่า เมื่อ X เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วยแล้ว Y จะเปลี่ยนแปลงไป b หน่วย

2.8.2 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ

ประกอบด้วยตัวแปรตาม 1 ตัวและตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป สามารถเขียนออกมาเป็นสมการถดถอยดังสมการที่ 2.13

$$Y_i = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k \quad (2.13)$$

เมื่อ Y_i คือ ค่าของข้อมูลที่ i

a คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลเมื่อค่า X ทั้งหมดเท่ากับ 0 หรือจุดตัดแกน Y

b_k คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยในข้อมูลหรือความชันของเส้นถดถอย

2.8.3 วิธีการคัดเลือกตัวแปร

วิธีการคัดเลือกตัวแปรเข้าสมการเพื่อให้สามารถทำนายตัวแปรเกณฑ์ได้สูงสุดมีวิธีการคัดเลือกตัวแปรดังนี้

1) วิธีการเลือกแบบก้าวหน้า (Forward Selection)

วิธีการนี้จะเป็นการเลือกตัวแปรทำนายที่มีสหสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงที่สุดเข้าสมการก่อน ส่วนตัวแปรที่เหลือจะมีการคำนวณหาสหสัมพันธ์แบบแยกส่วน (Partial Correlation) โดยเป็นความสัมพันธ์เฉพาะตัวแปรที่เหลือตัวนั้นกับตัวแปรตามโดยขจัดอิทธิพลของตัวแปรอื่น ๆ ออก ถ้าตัวแปรใดมีความสัมพันธ์กันสูงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติก็จะนำเข้าสมการต่อไป จะทำแบบนี้จนกระทั่งสหสัมพันธ์แบบแยกส่วนระหว่างตัวแปรอิสระที่ไม่ได้นำเข้าสมการแต่ละตัวกับตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ก็จะหยุดการคัดเลือกและได้สมการที่มีสัมประสิทธิ์การทำนายสูงสุด

2) วิธีการเลือกแบบถอยหลัง (Backward Selection)

วิธีการนี้เป็นการนำตัวแปรทำนายทั้งหมดเข้าสมการ จากนั้นก็จะค่อย ๆ ขจัดตัวแปรทำนายออกทีละตัว โดยจะหาสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทำนายที่อยู่ในสมการแต่ละตัวกับตัวแปรตามเมื่อขจัดตัวแปรทำนายอื่น ๆ ออกแล้ว หากทดสอบค่าสหสัมพันธ์แล้วพบว่าไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ก็จะขจัดออกจากสมการ แล้วดำเนินการทดสอบตัวแปรที่เหลืออยู่ในสมการต่อไป จนกระทั่งสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทำนายแต่ละตัวกับตัวแปรตามเมื่อขจัดตัวแปรอิสระอื่น ๆ ออกแล้วพบว่าไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ก็จะหยุดการคัดเลือก และได้สมการทดสอบที่มีสัมประสิทธิ์การทำนายสูงสุด

3) การคัดเลือกแบบลำดับขั้น (Stepwise Selection)

การคัดเลือกแบบนี้เป็นการผสมผสานระหว่างวิธีการคัดเลือกตัวแปรทำนายทั้งสองวิธีที่กล่าวมาแล้วเข้าด้วยกัน ในขั้นแรกจะเลือกตัวแปรทำนายที่มีสหสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงที่สุดเข้าสมการก่อนจากนั้นก็ทดสอบตัวแปรที่ไม่ได้อยู่ในสมการว่าจะมีตัวทำนายตัวใดบ้างมีสิทธิ์เข้ามาอยู่ในสมการด้วย วิธีการคัดเลือกแบบก้าวหน้า (Forward Selection) และทดสอบตัวแปรที่อยู่ในสมการด้วยว่าตัวแปรทำนายที่อยู่ในสมการตัวแปรใดมีโอกาสที่จะถูกขจัดออกจากสมการด้วยวิธีการคัดเลือกแบบถอยหลัง (Backward Selection) โดยจะกระทำการคัดเลือกผสมทั้งสองวิธีนี้ในทุกขั้นตอนจนกระทั่งไม่มีตัวแปรใดที่ถูกคัดออกจากสมการ และไม่มีตัวแปรใดที่จะถูกนำเข้าสมการ กระบวนการก็จะยุติ และได้สมการถดถอยที่มีสัมประสิทธิ์การทำนายสูงสุด

2.8.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

- 1) Correlation แสดงเมตริกซ์ของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
- 2) Multiple R แสดงค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่นำเข้าสมการกับตัวแปรตาม
- 3) Adjusted R Square แสดงค่า R Square ที่มีการปรับแก้ค่าให้เหมาะสม เมื่อข้อมูลที่ให้มีจำนวนน้อยและตัวแปรอิสระมีจำนวนมาก
- 4) Standard Error แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ตัวแปรตามจากตัวแปรอิสระ

- 5) ANOVA แสดงตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับใช้ในการทดสอบว่าจะสามารถใช้ตัวแปรอิสระที่คัดเลือกเข้าสมการนี้มาพยากรณ์ตัวแปรตามได้หรือไม่ ถ้ามีนัยสำคัญคือใช้พยากรณ์ได้
- 6) B แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัวแปรพร้อมทั้งค่าคงที่เพื่อนำมาใช้ในการสร้างสมการพยากรณ์
- 7) SE B แสดงค่าประมาณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับแต่ละตัวแปร
- 8) Beta แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยในแบบคะแนนมาตรฐาน สำหรับสร้างสมการพยากรณ์ในรูปของคะแนนมาตรฐาน จากค่า Beta สามารถบอกได้ว่าตัวแปรอิสระได้มีผลหรืออิทธิพลต่อตัวแปรตามมากหรือน้อยกว่ากัน ถ้า Beta ของตัวแปรอิสระใดมีค่ามาก (ไม่คิดเครื่องหมาย) แสดงว่าตัวแปรอิสระนั้นจะมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามมาก
- 9) T และ Sig T แสดงค่าสถิติและค่าความน่าจะเป็นของการทดสอบ T สำหรับทดสอบว่าตัวแปรอิสระตัวใดควรนำไปใช้ในสมการได้บ้าง ถ้าค่า T สูงอย่างมีนัยสำคัญแสดงว่าสามารถนำไปใช้ในสมการได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved