

บทที่ 6

วัสดุใหม่สำหรับงานคอนกรีต

การศึกษาวัสดุศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีต (Concrete Technology) ได้เจริญก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วมากในศตวรรษนี้ โดยมีการวิจัยและพัฒนาวัสดุผสมคอนกรีตประเภทอื่น ๆ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญคือ ต้องการปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้น ทั้งคอนกรีตที่อยู่สภาพเหลว เช่น ความสามารถเทได้ และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น กำลังอัด และที่สำคัญยิ่งคือ ต้องการให้ได้คอนกรีตที่มีความทนทาน รวมทั้งต้องการให้ได้คอนกรีตที่มีราคาเหมาะสมด้วย โดยได้มีการนำวัสดุอื่น ๆ มาผสมวัสดุที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายก็คือ

1. Pulverized Fuel Ash (PFA)
2. Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS) และ
3. Microsilica (MS) หรือ Silica Fume

การนำวัสดุเหล่านี้มาใช้ นอกจากจะได้ประโยชน์โดยตรงคือการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้นแล้ว ยังได้ประโยชน์ทางอ้อม คือ เป็นการนำของเสีย (Waste) มาใช้ ซึ่งช่วยจัดปัญหาเรื่องมลภาวะด้วย

6.1 กรรมวิธีการผลิต

1. Pulverized Fuel Ash (PFA)

PFA เป็นของแข็งเม็ดกลมมีความละเอียด ซึ่งลอยขึ้นมาพร้อมกับอากาศร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินที่บดละเอียด (Pulverized Coal) ในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และจะถูกจับด้วยเครื่องดักจับ (Precipitator) หลังจากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังถังเก็บ ถ่านหินที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนี้ประกอบด้วย สารประกอบคาร์บอนและแร่ธาตุอื่น ๆ เช่น ดินดาน, ดินเหนียว, ซัลไฟด์ และคาร์บอนเนต เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิสูงในเตาเผาคุณสมบัติของสารประกอบต่าง ๆ ในถ่านหินจะเปลี่ยนแปลงไป ทั้งด้านกายภาพและด้านเคมี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเตาเผา รวมทั้งวิธีการทำให้เย็น PFA ที่ได้จากการเผานี้ ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของซิลิกา และอลูมินา

2. Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS)

GGBS เป็นของเหลือ (By-Product) ของขบวนการผลิตเหล็กโดยใช้เตาหลอม Slag ที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากการหลอมตัวของคัลเซียมออกไซด์จากหินปูนกับซิลิกอนและอลูมินาจากแท่งเหล็กและถ่าน Coke

คุณภาพของเหล็กที่ได้จะสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเหล็ก และองค์ประกอบทางเคมีของ Slag ดังนั้นในการควบคุมคุณภาพของเหล็กที่หลอม ผู้ผลิตจะทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของ Slag อยู่ตลอดเวลา เพื่อทำการปรับปรุงตัดแปลงสัดส่วนของวัตถุดิบและสภาพการทำงานของเตาเผา Slag ที่หลอมลอยอยู่ด้านบนของเบ้าหลอม จะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยการเทลงในน้ำหรือใช้น้ำฉีดทันที ผลก็คือ Slag ส่วนใหญ่จะกลายเป็นเม็ดแก้วกลมที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ค่อนข้างแน่นอน หลังจากนั้นจะผ่านขบวนการระเหยน้ำออก และทำการบดเช่นเดียวกับการบดปูนซีเมนต์ โดยไม่มีการเติมวัสดุอื่นเข้าไป สุดท้ายจะทำการตรวจสอบคุณภาพเพื่อดูความสม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมี

3. Microsilica (MS) หรือ Silica Fume

MS หรือ Silica Fume หรือ Condensed Silica Fume เป็นของเหลือ (By-Product) จากขบวนการผลิต Silicon Metal หรือ Ferrosilicon Alloy โดยการนำเอาวัตถุดิบอันได้แก่ หินควอร์ต ถ่านและเหล็ก หลอมรวมกันในอัตราส่วนที่กำหนด เมื่อวัตถุดิบนี้ได้รับความร้อน เกิดการหลอมตัวจะเกิดไอของซิลิกอนโมโนออกไซด์ลอยตัวขึ้น ไอเหล่านี้จะถูกดักจับไว้และทำให้เย็นตัว ได้เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากของ Amorphous Silica โดยมีขนาดเล็กกว่าเม็ดซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า หลังจากนั้นจะถูกส่งไปบรรจุในไซโลและแยกใส่ถุงออกจำหน่าย คุณสมบัติของ MS จะแตกต่างจาก PFA และ GGBS คือ MS ในแหล่งเดียวกันจะมีความผันแปรด้านองค์ประกอบทางเคมีน้อยมาก เพราะวัตถุดิบสำหรับขบวนการผลิต Silicon หรือ Ferrosilicon ค่อนข้างบริสุทธิ์มาก

6.2 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของ PFA GGBS และ MS จะเหมือนกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่สัดส่วนจะแตกต่างกัน ดังแสดงค่าไว้ในตารางที่ 6.1

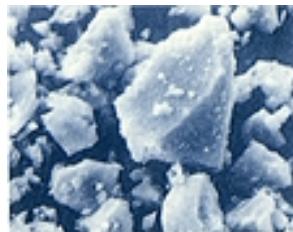
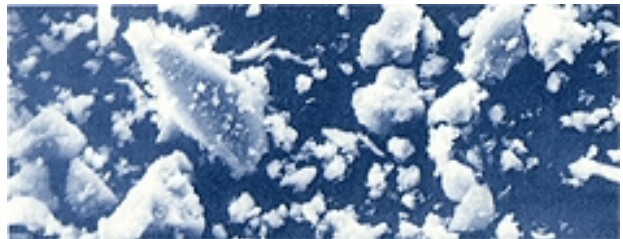
ตารางที่ 6.1 องค์ประกอบทางเคมีของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์, PFA, GGBS และ MS

ออกไซด์	% โดยน้ำหนัก			
	ปูนซีเมนต์ปอร์ต - แลนด์ประเภท 1	PFA	GGBS	MS
SiO ₂	20	48	37	92
Al ₂ O ₃	5	26	11	0.7
Fe ₂ O ₃	3	1.0	0.3	1.2
CaO	65	3	40	0.2
MgO	1.1	2	7	0.2
SO ₃	2.4	0.7	0.3	-
Na ₂ O	0.2	1.0	0.4	1.2
K ₂ O	0.9	3.0	0.7	1.9
ออกไซด์อื่น ๆ	1.4	1.3	2.3	2.6
Loss of Ignition	1	5	-	-

6.3 ลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพทั่วไปของปูนซีเมนต์, PFA, GGBS และ MS แสดงเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 6.2

ซีเมนต์



GGBS



PFA

รูปที่ 6.1 อนุภาคของซีเมนต์ PFA และ GGBS, PFA มีรูปร่าง ค่อนข้างกลม ในขณะที่ซีเมนต์และ GGBS มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม

คุณสมบัติ	ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภท 1	PFA	GGBS	MS
ความละเอียด (ตร.ซม./กรัม)	3,400	3,800	3,500	150,000
ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลบ.ม.)	1,400	900	1,200	240 600 (อัดตัวแน่น)
ความถ่วงจำเพาะ (กรัม/ลบ.ซม.)	3.15	2.3	2.9	2.2
สี	เทา	เทาอ่อนจนถึง เทาเข้มหรือบางครั้ง สีน้ำตาล	ขาว	เทาดำ

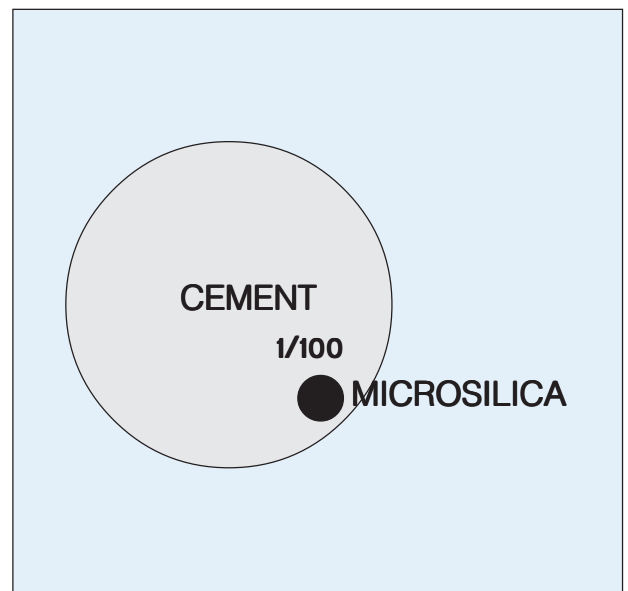
ตารางที่ 6.2 ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์, PFA, GGBS และ MS

จากตารางที่ 6.2 จะพบว่า

1) OPC, PFA และ GGBS ที่เหมาะสำหรับผสมคอนกรีต จะมีความละเอียดใกล้เคียงกัน แต่ MS จะมีความละเอียดสูงมาก

2) จากค่าความถ่วงจำเพาะถ้านำ PFA, GGBS หรือ MS มาผสมกับ OPC โดยน้ำหนักจะเป็นการเพิ่มปริมาตรของส่วนละเอียดเมื่อเทียบกับ OPC ที่น้ำหนักเท่ากัน ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่ผู้ออกแบบจะต้องนำมาพิจารณา

3) MS ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ประมาณ 100 เท่า ซึ่งทำให้การจัดเก็บและการลำเลียงทำได้ลำบาก การแก้ไขปัญหานี้ทำได้โดยการผสมน้ำกับ MS ในอัตราส่วนเท่ากัน เพื่อให้ได้ของเหลว (Slurry) สะดวกต่อการจัดเก็บและการลำเลียง รวมทั้งช่วยให้การกระจายตัวของ MS ในส่วนผสมคอนกรีตที่ดีขึ้นด้วย

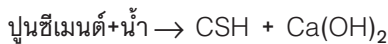


รูปที่ 6.2 ขนาดของ Microsilica เทียบกับปูนซีเมนต์

6.4 ลักษณะการทำงาน

1. Pulverized Fuel Ash

ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สารประกอบ 2 ชนิด คือ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Free Lime หรือ Calcium Hydroxide $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ดังสมการ



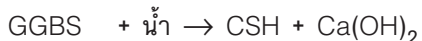
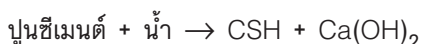
CSH ทำหน้าที่เป็นกาวเชื่อมให้ส่วนผสมของคอนกรีตจับตัวกัน ส่วน $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่เกิดขึ้นนี้ประมาณ 25% โดยปริมาตร ซึ่งไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ใด ๆ ในบางครั้งยังก่อให้เกิดผลเสียกับคอนกรีตด้วย เช่น ก่อให้เกิดฝ้าขาวบนผิวหน้าคอนกรีต (Efflorescence) หรือเกิดเป็นฟิล์มบนผิวมวลรวม ทำให้การยึดระหว่างมวลรวมและมอร์ต้าไม่ดีนัก แต่เมื่อใส่ PFA เป็นส่วนผสม SiO_2 ที่มีอยู่จำนวนมากใน PFA นี้ จะทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และก่อให้เกิด CSH เพิ่มขึ้นดังสมการ



CSH ซึ่งทำหน้าที่เป็นกาวที่เพิ่มขึ้นนี้ จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติด้านกำลังอัด, ความทนทาน, การต้านการซึมผ่านของน้ำ เป็นต้น

2. Ground Granular Blast Furnace Slag

เนื่องจาก GGBS มีองค์ประกอบทางเคมีของ CaO อยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้น ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ GGBS จะใกล้เคียงกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ทั่วไป แต่เกิดช้ากว่า หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว ก็เกิดปฏิกิริยาระหว่าง SiO_2 ใน GGBS กับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อีกครั้งหนึ่งดังสมการ

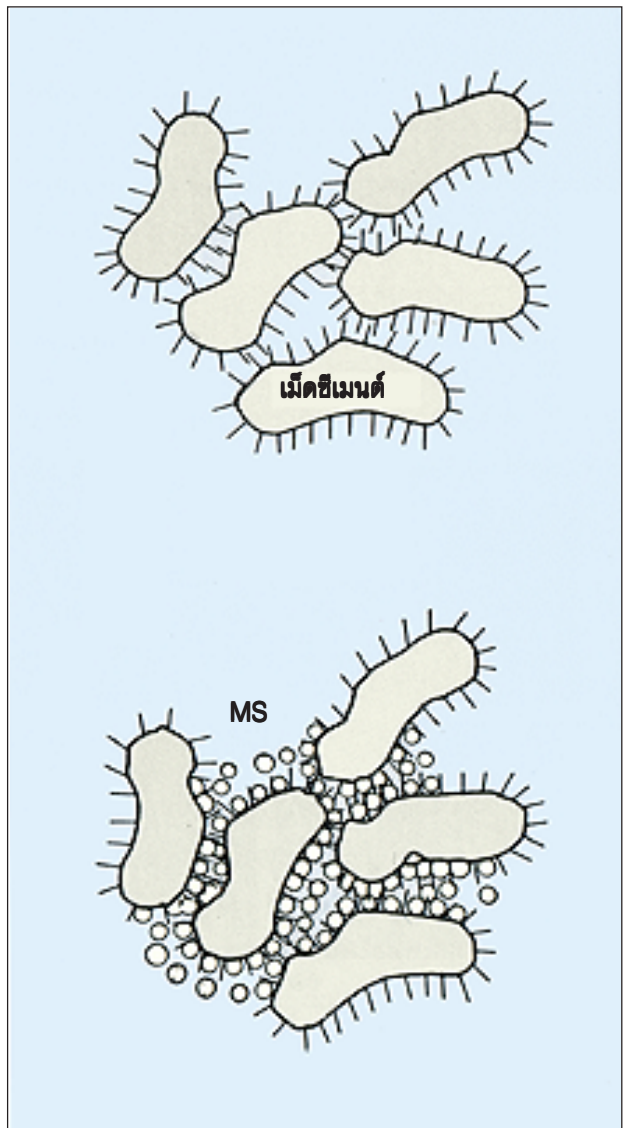


ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ GGBS อาจเร่งให้เกิดเร็วขึ้นได้โดยการบด GGBS ให้มีความละเอียดมากขึ้น

3. Microsilica

เนื่องจาก MS มีปริมาณ SiO_2 อยู่สูงถึงกว่า 90% ปฏิกิริยาของ MS ในส่วนผสมคอนกรีตจะเหมือนกับของ PFA แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วมาก เนื่องจาก MS มีความละเอียดสูงมากส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดทั้งช่วงต้นและช่วงปลายเป็นไปได้เร็วกว่าคอนกรีตทั่ว ๆ ไป

นอกจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นแล้ว MS ยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต ด้วยผลทางกายภาพอีกด้านหนึ่งกล่าวคือ MS เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นจะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ (Microfiller Effect) ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นสูงมาก เป็นผลดีทั้งด้านกำลังอัดและความทนทาน



รูปที่ 6.3 อนุภาคของ Microsilica แทรกตัวอยู่ระหว่างเม็ดซีเมนต์

6.5 คุณสมบัติและการใช้งาน

1. Pulverized Fuel Ash

ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ PFA เป็นส่วนผสมคอนกรีตมีดังนี้

1) ปรับปรุงความสามารถเทได้ของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตลื่นไหลเข้าแบบได้ดี เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของ PFA ซึ่งมีรูปร่างกลม ดังแสดงในรูป 6.1

2) ลดการเยิ้ม (Bleeding) และแนวโน้มการแยกตัวของคอนกรีตสด

3) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้า ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงซึ่งลดโอกาสการแตกร้าวของคอนกรีต โดยเฉพาะโครงสร้างขนาดใหญ่

4) เพิ่มกำลังอัดคอนกรีตที่อายุมากกว่า 28 วัน

5) เพิ่มความทนทานของคอนกรีต ด้วยเหตุผล 2 ประการคือ

- ปริมาณน้ำที่ใช้ลดลงเมื่อต้องการความสามารถเทได้เท่ากัน
- ปฏิกิริยาระหว่าง PFA กับ $Ca(OH)_2$ ทำให้ช่องว่างในเนื้อคอนกรีตลดลง

การใช้งาน PFA ทำได้ 2 ลักษณะ

1) ผสม PFA กับซีเมนต์ในปริมาณที่ต้องการจากโรงงานผสม

2) ใช้ PFA เสมือนเป็นส่วนผสมอีกส่วนหนึ่งของคอนกรีต โดยผสม ณ โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ

ปริมาณที่ใช้จะอยู่ในช่วง 15-50% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ข้อควรคำนึงถึงในการใช้ PFA

1) PFA โดยทั่วไปจะลดกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงแรก

2) การบ่มมีผลอย่างมากต่อคอนกรีตที่ผสม PFA กล่าวคือ การพัฒนากำลังอัดของ PFA คอนกรีตจะเกิดเมื่อคอนกรีตนั้นได้รับการบ่มขึ้นเท่านั้น

2. Ground Granular Blast Furnace Slag

ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ GGBS เป็นส่วนผสมคอนกรีตมีดังนี้

1) ปฏิกิริยาของคอนกรีตที่ผสมด้วย Slag จะช้ากว่าคอนกรีตทั่ว ๆ ไป ส่งผลให้ ความร้อนจากปฏิกิริยาต่ำ ทำให้เหมาะที่จะใช้ในงานโครงสร้างที่มีปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน เช่น ฐานรากแผ่ขนาดใหญ่, เขื่อน เป็นต้น

2) คอนกรีตมีความทนทานต่อซัลเฟต, น้ำทะเลและสารเคมีได้ดี

3) ลดปฏิกิริยา Alkali-Aggregate Reaction ในคอนกรีตที่ใช้หินที่ทำปฏิกิริยากับ Alkali ในปูน

4) ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่น มีความต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้ดี (Low Permeability) ทำให้เหมาะที่จะใช้ในงาน สระว่ายน้ำ ถังเก็บน้ำ เป็นต้น

5) เพิ่มกำลังอัดและกำลังดัด (Flexural Strength) คอนกรีตที่อายุมากกว่า 28 วัน

การใช้งาน GGBS ทำได้ 2 ลักษณะเช่นเดียวกับ PFA โดยปริมาณการใช้จะอยู่ในช่วง 25-65% แต่สำหรับ Supersulphate ซีเมนต์จะผสม Slag สูงถึง 85%

ข้อคำนึงการใช้ GGBS

1) เวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ผสมด้วย GGBS จะช้ากว่าคอนกรีตทั่ว ๆ ไป

2) กำลังอัดในช่วงต้นจะพัฒนาช้าและการบ่มจะมีผลอย่างมากเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ผสม

3. Microsilica

ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ MS เป็นส่วนผสมคอนกรีตมีดังนี้

1) ลดการเยิ้ม (Bleeding) และการแยกตัวของคอนกรีตสด

2) เพิ่มกำลังอัด ของคอนกรีตทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

3) เพิ่มความหนาแน่น ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นมาก ส่งผลให้มีความทนทานสูง การซึมผ่านของน้ำและอากาศเป็นไปได้ยาก

การใช้งาน MS ในทางปฏิบัติเราสามารถใส่ MS ผสมคอนกรีตได้ 2 ลักษณะ คือ

1) ใช้ MS ในลักษณะที่เป็นของแข็งผสมไปในคอนกรีตลักษณะเดียวกับปูนซีเมนต์

2) ใช้ MS ในลักษณะที่เป็นของเหลวเหมือนน้ำยาผสมคอนกรีตทั่วๆ ไป

ปริมาณการใช้จะอยู่ในช่วง 7-10% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ข้อคำนึงถึงในการใช้ MS

1) คอนกรีตที่ผสม MS ความสามารถเทได้จะลดลงอย่างมาก จึงจำเป็นต้องใช้น้ำยาประเภทลดน้ำจำนวนมาก (Superplasticizer) ผสมเพื่อเพิ่มค่ายุบตัว

2) คอนกรีตสดที่ผสม MS มีแนวโน้มจะเกิด Plastic Shrinkage Crack มากกว่าคอนกรีตปกติ ดังนั้นจึงควรวหาวิธีการป้องกัน