

บทที่ 5

สารผสมเพิ่ม (Admixtures)

5.1 บทนำ

นิยามของสารผสมเพิ่ม (Admixture) ที่นิยามโดย ACI 116 R [1] และ ASTM C125 [2] คือ วัสดุอื่นที่นอกเหนือจากนั้น, มวลรวม, ปูนซีเมนต์ และ เส้นใยเสริม และวัสดุเหล่านี้จะใส่ในคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ ขณะที่ผสมหรือก่อนที่จะทำการผสมคอนกรีตหรือมอร์ตาร์

การใช้สารผสมเพิ่มเพื่อวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงสภาพของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ให้ดีขึ้น และเหมาะสมที่จะใช้งาน อาจทำให้การทำงานง่ายขึ้น หรือประหยัดขึ้น หรือเพื่อประหยัดพลังงานหรือเพิ่มทำให้คอนกรีตที่ได้มีความคงทนต่อสภาพการกัดกร่อน หรือต่อสภาพดินฟ้าอากาศมากขึ้น

5.2 ประเภทของสารผสมเพิ่ม (Type of Admixtures)

สารผสมเพิ่มมีหลายชนิด อาจจำแนกสารผสมเพิ่มหลักๆ ได้ 4 ประเภท

1. สารเพิ่มฟองอากาศ (Air-entraining admixtures) ตามมาตรฐาน ASTM C260 [3] เป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำ
2. สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical admixtures) ตามมาตรฐาน ASTM C494 [4]
3. สารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ (Mineral admixtures) ตามมาตรฐาน ASTM C618 [5]
4. สารผสมเพิ่มอื่นๆ (Miscellaneous admixtures) เป็นสารผสมเพิ่มที่ไม่จัดอยู่ในมาตรฐานในบทนี้จะกล่าวถึงสารกักกระจายฟองอากาศ และ สารเคมีผสมเพิ่ม

5.3 สารเพิ่มฟองอากาศ (Air-Entrained Admixtures)

Air-entrained agent คือ วัสดุ หรือสารผสมเพิ่มที่เติมเข้าไปในปูนซีเมนต์ หรือคอนกรีตหรือมอร์ตาร์เพื่อทำให้เกิดฟองอากาศ (Entrained air) ในมอร์ตาร์หรือคอนกรีตในขณะที่ทำการผสม โดยทั่วไปการใช้ Air-entrained agent เพื่อเพิ่มความชื้นเหลวของคอนกรีต และเพื่อป้องกันผลกระทบจากการแข็งตัวของน้ำ

การใช้ Air-entrained agent นิยมใช้กับคอนกรีตที่ต้องผจญกับสภาพ Freezing and thawing ดังนั้นสารผสมเพิ่มชนิดนี้จึงใช้กับประเทศในแถบหนาวมาก ส่วนประเทศในแถบร้อนไม่ควรใช้สารพวกนี้เพราะจะทำให้คอนกรีตมีราคาแพง และอาจมีกำลังอัดที่ต่ำลง

องค์อาคารที่มักจะใช้ Air-entrained agent มักจะได้แก่ ถนน พื้นหรือลานจอดรถในที่แจ้ง หรือทางเดินเท้า เหตุเพราะอาคารเหล่านี้ เมื่อมีหิมะปกคลุมหรือมีสภาพน้ำ กลายเป็นน้ำแข็งจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง สภาพเหล่านี้จะลื่นมาก เพื่อแก้ไขปัญหานี้ “ลื่น” จึงต้องนำเกลือมาโรยเพื่อให้หิมะหรือหิมะละลาย ซึ่งเป็นลักษณะคล้ายกับ Freezing and thawing นั่นเอง

การใช้สาร Air-entrained agent จะทำให้ภายในคอนกรีตประกอบด้วยฟองเล็ก ๆ เป็นจำนวนมากมายและกระจายอย่างสม่ำเสมอ เป็นจำนวนหลายพันล้านฟองอากาศใน 1 ม³. ของคอนกรีต

5.3.1 ผลกระทบของ Air-Entraining Admixtures ต่อคอนกรีตสด

- คอนกรีตที่มีค่าความยุบตัวที่เท่ากัน (Same slump) พบว่าคอนกรีตที่มี Air-entraining admixture จะทำงานได้ง่ายกว่ากรณีที่คอนกรีตไม่ใส่ Air-entraining agent ยกเว้นในกรณีที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์สูงๆ
- ลดค่าการแยกตัว (Segregation) และการคายน้ำ (Bleeding)
- เมื่อใช้ Air-entraining admixture ในคอนกรีตที่ปริมาณปูนซีเมนต์สูง ๆ ทำให้คอนกรีตเหนียวมาก และตบแต่งผิวลำบากต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว
- ลดกำลังคอนกรีตลง ยิ่งปริมาณของฟองอากาศเกิดมากเท่าไร กำลังอัดของคอนกรีตยิ่งลดลงมากเท่านั้น

5.3.2 วัสดุที่ใช้เป็นตัวทำฟองอากาศ (Materials for Air Entrainment)

1. ในรูปของเหลว หรือที่เป็นผลงละลายน้ำ เช่นเกลือของ Wood resins, Synthetic detergents (ผงซักฟอก), Salts of sulfonated lignin, Salts of petroleum Acids, Fatty (ไขมัน)

วัสดุที่กล่าวถึงเหล่านี้ล้วนทำให้เกิดฟองในคอนกรีตบางชนิดเป็นส่วนผสมที่ใช้ทำแซมพูหรือผงซักฟอกวัสดุเหล่านี้ทำให้เกิดฟองในคอนกรีตจริง แต่ฟองที่ได้อาจไม่เหมาะสมที่จะเป็นฟองที่ใช้เป็น Air entrained ดังนั้นควรทำการทดสอบ หรือมีข้อมูลยืนยันที่แน่นอนว่าวัสดุที่นำมาใช้เหมาะสมที่จะใช้เป็น Air-entraining agent จริง

2. ในรูปของ Particulate Air-entraining admixtures คือเป็นวัสดุที่มีรูพรุนอยู่แล้วและเมื่อผสมในคอนกรีตมีพฤติกรรมคล้ายๆ กับฟองอากาศ เช่นพวกทรงกลมของพลาสติกกลวง อิฐป่นที่มีรูพรุน Expanded clay of shale (มักได้จากการเผาหินหรือ Shale ให้ขยายตัว) ขนาดของวัสดุพวกนี้มักมีค่า 290 ถึง 850 μm ความพรุนโดยรวมไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 โดยปริมาตร และ Pore-size distribution (ขนาดของรูพรุน) ควรมีความกว้าง 0.05 ถึง 3 μm

5.3.3 แฟกเตอร์ที่มีผลกระทบต่อปริมาณฟองอากาศ (Factors Influencing Amount of Entrained Air)

- สารเจือปนพวกสารอินทรีย์ในหินมักจะทำให้การใช้ปริมาณของ Air-entraining admixture ลดลง
- น้ำผสมคอนกรีตที่เป็นน้ำกระด้าง ทำให้ต้องใช้ Air-entraining admixture มากขึ้น
- ปูนซีเมนต์ที่ละเอียด (เช่น Type III) มักต้องการปริมาณของ Air-entraining agent มากกว่ากรณีของปูนซีเมนต์ที่หยาบกว่า (Type I)
- วัสดุพวกปอชโซลาน เช่น เถ้าถ่านหินจะลดปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตลง
- อุณหภูมิที่ผสมคอนกรีตสูง ต้องใช้ปริมาณสาร Air-entraining admixture สูงขึ้น

- การใช้สาร Air-entraining agent ร่วมกันกับสารอื่น เช่น แคลเซียมคลอไรด์ หรือพวก Water-reducing admixtures จะต้องตรวจสอบเสมอว่า สารที่ใช้ร่วมกันกับ Air-entraining agent ทำให้เกิดผลลบหรือบวกในเรื่องฟองอากาศ

สารผสมเพิ่มสามารถเรียกได้ว่าผลผลิตจากเคมี จะใช้เฉพาะการเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีต แต่ไม่เกิน 5% โดยมวลของซีเมนต์ หรือใช้เพิ่มก่อนที่จะมีสภาพเป็นคอนกรีต เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต

5.4 สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixtures) สามารถจำแนกสารเคมีผสมเพิ่มตามมาตรฐานของ ASTM C 494 [4] ได้ดังนี้

Type A สารลดปริมาณน้ำ (Water-reducing)

Type B สารหน่วงการก่อตัว (Retarding)

Type C สารเร่งการก่อตัว (Accelerating)

Type D สารลดปริมาณน้ำและสารหน่วงการก่อตัว (Water-reducing and retarding)

Type E สารลดปริมาณน้ำและสารเร่งการก่อตัว (Water-reducing and accelerating)

Type F สารลดปริมาณน้ำปริมาณในอัตราสูง (High-range water-reducing or superplasticizing)

Type G สารลดปริมาณน้ำปริมาณในอัตราสูงและสารหน่วงการก่อตัว (High-range water-reducing and retarding or superplasticizing and retarding)

5.4.1 สารเร่งการก่อตัว (Accelerating Admixtures)

ตามมาตรฐานของ ASTM สารผสมเพิ่ม Type C คือ สารเร่งการก่อตัว (Accelerators) หน้าที่ของสารเร่งการก่อตัว คือ จะเร่งให้คอนกรีตมีกำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ๆ โดยจะเกิดขึ้นในช่วงการก่อตัวของคอนกรีต สารเร่งการก่อตัวนี้จะใช้เมื่อคอนกรีตอยู่ในสถานที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ ๆ คืออุณหภูมิ 2-4°C (35-40°F) ใช้ในการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป (เมื่อต้องการถอดแบบเร็ว) หรือใช้ในงานซ่อมแซมที่ต้องการความเร่งด่วน สำหรับผลดีด้านอื่น ๆ คือ สามารถปาดผิวหน้าได้เร็ว เป็นฉนวน และสามารถสร้างโครงสร้างต่อไปได้ในเวลาอันรวดเร็ว

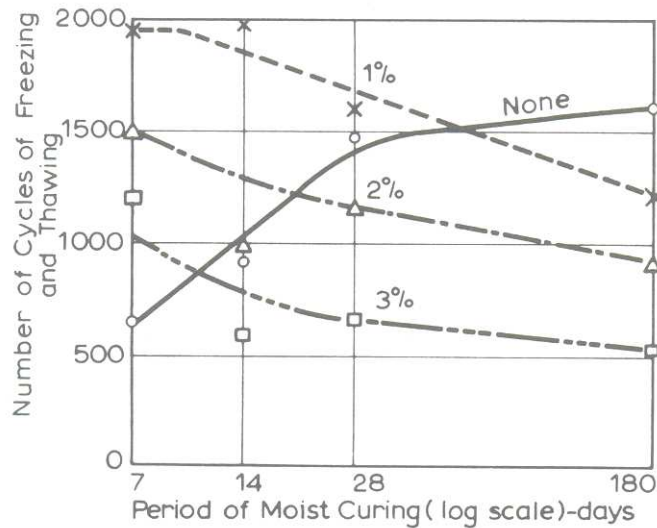
ในทางตรงกันข้ามที่อุณหภูมิสูง สารเร่งการก่อตัวจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนในอัตราสูงที่เกินไป ส่งผลให้การสูญเสียน้ำมากเกินไป ทำให้คอนกรีตแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว (Shrinkage) ในขณะที่การใช้สารเร่งการก่อตัวที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้จุดเยือกแข็งของคอนกรีตลดต่ำลงไม่เกิน 2°C (หรือประมาณ 3.5°F)

สารเร่งการก่อตัวที่ใช้กันมานานหลายทศวรรษโดยทั่วไป คือ แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา Hydration (ปฏิกิริยาการใช้น้ำในการเพิ่มกำลังของคอนกรีต) จาก แคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicates, C₃S) เป็นสารเร่งการก่อตัวที่หา

ได้ง่ายและมีราคาถูก แต่มีข้อเสียที่สำคัญหนึ่งอย่างคือ คลอไรด์ไอออน (Chloride ions) จะทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมหรือเหล็กอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้คือเหล็กเสริมจะถูกกัดกร่อนเกิดเป็นสนิมมาก

ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาการเกิดสนิมจะเกิดขึ้นเฉพาะในส่วนที่สัมผัสกับน้ำและออกซิเจน แต่ก็ไม่ควรจะเสี่ยงที่จะใช้คลอไรด์ไอออนในคอนกรีต เช่น การผสมแคลเซียมคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตอัดแรง ผลที่ตามมา คือ มาตรฐานต่างๆ สั่งห้ามใช้แคลเซียมคลอไรด์ในคอนกรีตที่มีเหล็กเสริม นอกจากนี้แม้แต่ในคอนกรีตส่วนที่ไม่มีความคงทนแล้วก็ไม่ควรจะใช้แคลเซียมคลอไรด์ ตัวอย่างผลของการใช้แคลเซียมคลอไรด์ คือ ซีเมนต์จะต้านทานซัลเฟตได้น้อยลง เมื่อผสม CaCl_2 ในคอนกรีตหยาบ (Lean) และเสี่ยงต่อปฏิกิริยาอัลคาไลน์ในมวลรวม (Alkali-aggregate) อย่างไรก็ตามผลของ CaCl_2 จะเล็กน้อยมากเมื่อมีการควบคุมปฏิกิริยาโดยใช้ซีเมนต์ที่มีสารอัลคาไลน์ในปริมาณต่ำและเติมสาร Pozzolanas ผลจากการใช้ CaCl_2 ที่ไม่พึงปรารถนาอีกก็คือ การหดตัว (Drying shrinkage) ของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 10-15% หรืออาจมากกว่านี้และความคืบ (Creep) ในคอนกรีตก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

ถึงแม้ว่าการใช้ CaCl_2 จะช่วยลดอันตรายจากอุณหภูมิที่ต่ำมากที่จะทำให้ น้ำในคอนกรีตแข็งในช่วงอายุ 2-3 วันแรก (ป้องกันอากาศเย็นเข้าไปทำปฏิกิริยาในคอนกรีตทำให้น้ำในคอนกรีตแข็งและละลายในภายหลัง) ดังแสดงในภาพ 5.1 แสดงผลของความชื้นที่มีต่อคอนกรีตที่อายุต่างๆ กับจำนวนรอบของการเย็นตัวและการละลาย



รูปที่ 5.1 แสดงความต้านทานการเย็นตัวและการละลายของคอนกรีตเมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 4°C (40°F) โดยใช้ซีเมนต์ที่มีสาร CaCl_2 ต่างกัน [6]

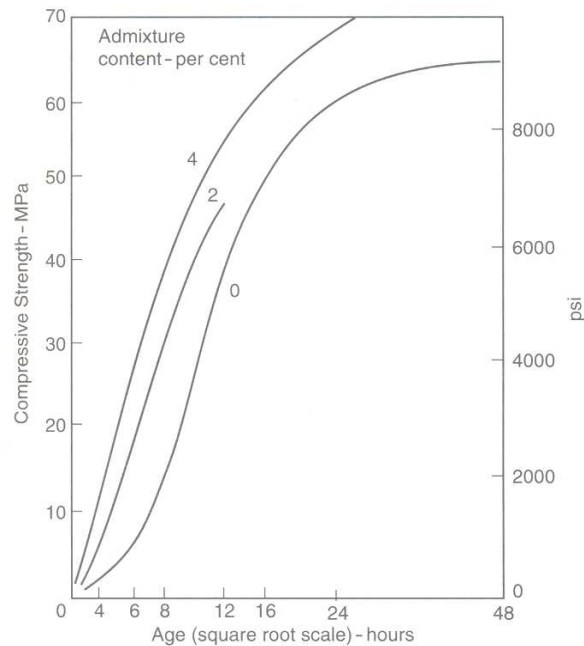
สำหรับข้อดีของการใช้ CaCl_2 ในด้านอื่น ๆ คือ ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดเซาะ (Erosion) และการกัดกร่อน (Abrasion) ตลอดอายุการใช้งาน เมื่อคอนกรีตส่วนถูกบ่มด้วยไอน้ำ CaCl_2 จะช่วยเพิ่มกำลังของคอนกรีตและสามารถเพิ่มอุณหภูมิให้สูงอย่างในขณะบ่มได้

ผลของโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) จะคล้ายคลึงกับแคลเซียมคลอไรด์ แต่ น้อยกว่า มีความไม่แน่นอนมากกว่า และการทำปฏิกิริยา Hydration ตั้งแต่วันที่ 7 ของคอนกรีตจะลด น้อยลงทำให้กำลังของคอนกรีตลดต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

นักวิจัยบางคนแสดงให้เห็นว่าการใช้แคลเซียมคลอไรด์ไม่มีผลกระทบต่อ การกักคร่อนของเหล็กเสริมถ้าคอนกรีตมีอัตราส่วนที่เหมาะสมและแน่นดี และถ้าระยะคอนกรีตหุ้ม เหล็กเพียงพอ แต่โซลไม่ดีที่ในงานสนามการทำงานและคอนกรีตไม่เป็นไปตามเงื่อนไข นอกเสีย จากว่าคอนกรีตที่มีการปฏิบัติอย่างดีจึงจะป้องกันการกักคร่อนได้

พอเป็นไปได้ที่จะนำแคลเซียมไนไตรท์และแคลเซียมไนเตรทมาเป็นสารเร่งก่อตัว โดยจะช่วย ยับยั้งการกัดเซาะ แคลเซียมฟอร์มเมทและโซเดียมฟอร์มเมทก็มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้งาน

แคลเซียมฟอร์มเมท (Calcium formate) จะมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อใช้ซีเมนต์ที่ใช้มีอัตราส่วน ของ C_3A ต่อ SO_3 อย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 4 และมี SO_3 ในปริมาณต่ำ



รูปที่ 5.2 ผลของ Calcium formate ที่ส่วนผสมต่างๆ (โดยมวลของซีเมนต์) ต่อการพัฒนา

กำลังของคอนกรีตจากปริมาณซีเมนต์ 420 กก./ม.³ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.35 [6]

Massazza และ Testolin พบว่ากำลังของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของแคลเซียมฟอร์มเมทเมื่อ เวลาผ่านไป 4.5 ชั่วโมง จะมีกำลังเท่ากับคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของแคลเซียมฟอร์มเมทเมื่อเวลาผ่านไป 9 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพ 5.2 และแคลเซียมฟอร์มเมทจะไม่ทำให้กำลังเสื่อม ในทางตรงกันข้าม ผลกระทบของการใช้สารเร่งการก่อตัวในด้านอื่นๆ ก็ยังไม่สามารถกำจัดได้

Rear และ Chin ทดสอบคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมเดิม (อัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ (water/cement ratio) เท่ากับ 0.54) โดยใช้ปอร์แลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 และสารผสม 3 แบบ มี ส่วนผสมดังนี้คือ

แบบที่ 1. Calcium-nitrite-based

แบบที่ 2. Calcium-nitrate-based

แบบที่ 3. Sodium-thiocyanate-based

ส่วนประกอบของซีเมนต์ (ปริมาณเป็น %) มีดังนี้

C₃S 49 – 59

C₂S 16 – 26

C₃A 5 – 10

C₃AF 7 – 11

ค่าความละเอียดของซีเมนต์อยู่ในช่วง 327-429 ม.²/กก. วัดโดยวิธีเบลน (Blain method)

จากผลของกำลังของแรงอัดที่อุณหภูมิ 20°C (72°F) แสดงดังตาราง 5.1 โดยแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีสารเร่งการก่อตัว

ตาราง 5.1 แสดงผลของการใช้สารเร่งการก่อตัวโดยใช้ส่วนผสมต่างๆ [6]

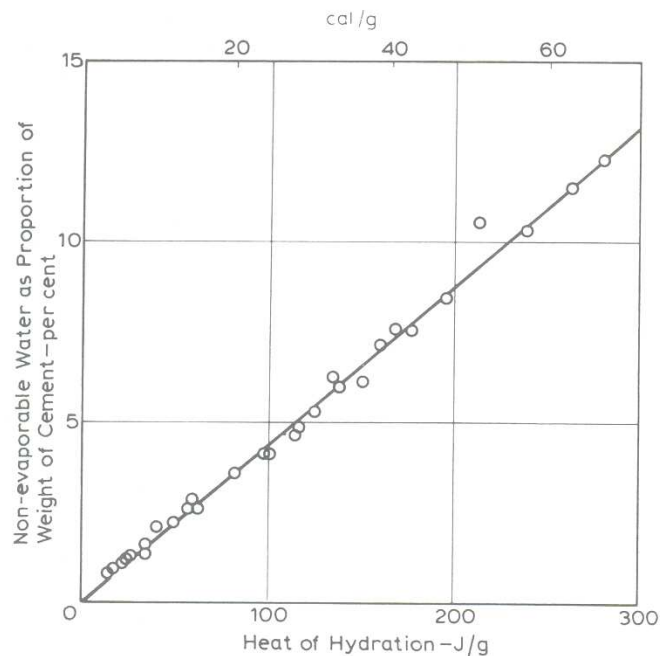
Accelerator No.	Dosage ml/100 kg of cement	Range of compressive strength (per cent) at the age of :		
		1 day	3 days	7 days
1	0	100	100	100
	1300	100-173	105-115	97-114
	2600	112-175	107-141	111-129
	3900	111-166	111-143	113-156
2	0	100	100	100
	740	64-130	90-113	100-116
	1480	65-157	95-113	105-132
	2220	58-114	99-115	107-123
3	0	100	100	100
	195	111-149	115-131	100-120
	390	123-185	101-132	107-130
	585	121-171	115-136	104-129

จากการอภิปรายระบุได้ว่าความต้องการในการใช้สารเร่งการก่อตัวลดจำนวนลง โดยเฉพาะการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป ถึงอย่างไรก็ตามการใช้สารเร่งการก่อตัวที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ยังคงใช้กันอยู่

5.4.2 สารหน่วงการก่อตัว (Retarding Admixtures)

ตามมาตรฐานของ ASTM สารผสมเพิ่ม Type B จะอ้างอิงถึง สารหน่วงการก่อตัว (Retarder) หน้าที่ของสารหน่วงการก่อตัว คือ จะทำให้การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ช้าลง มีประโยชน์มากในการผสมคอนกรีตบริเวณที่สภาพอากาศร้อนเพราะอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น ประโยชน์ในกรณีที่ต้องส่งคอนกรีตผสมเสร็จไปยังสถานที่ต่างๆ ที่อยู่ไกล ต้องใช้เวลานานในการเทคอนกรีตปริมาณมาก ๆ ซึ่งต้องการให้เกิดความต่อเนื่องเพื่อลดปริมาณรอยตำหนิในการเท เป็นต้น

สารหน่วงการก่อตัว ได้แก่ น้ำตาล คาร์โบไฮเดรท เกลือของสังกะสี สารบอเรต และเกลือชนิดอื่นๆ รวมทั้งเอทานอลในทางปฏิบัติแล้วสารหน่วงการก่อตัวมีคุณสมบัติในการลดปริมาณน้ำด้วย Khalil และ Ward [6] แสดงความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างมวลของน้ำที่ไม่ระเหยกลายเป็นไอน้ำและความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีสารผสมเพิ่ม Lignosulfonate-based แสดงในรูปที่ 5.3

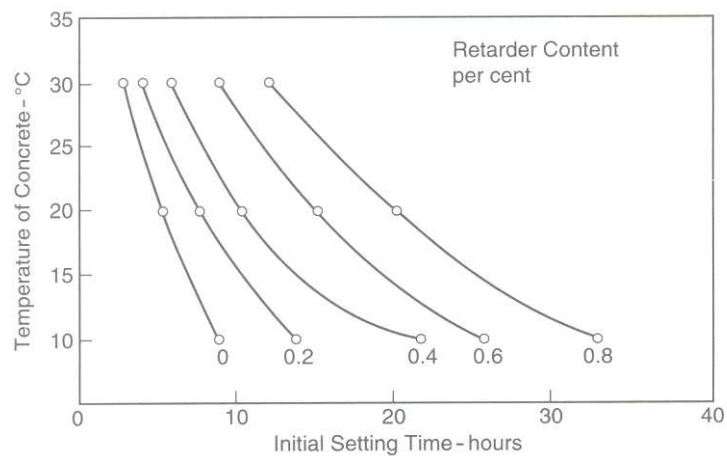


รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างซีเมนต์ที่ไม่มีไอน้ำและความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีและไม่มีสารหน่วงการก่อตัว [6]

การใช้น้ำตาลเป็นสารผสมเพิ่มควรจะใช้ในปริมาณน้อย (ประมาณ 0.05% ของปริมาณซีเมนต์) จึงจะเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการเป็นหน่วงการก่อตัว คือ จะหน่วงการก่อตัวของคอนกรีตประมาณ 4 ชั่วโมง เนื่องจากน้ำตาลไปหน่วงการจับกันของ C-S-H อย่างไรก็ดีตามผลของการใช้น้ำตาลยังขึ้นอยู่กับปริมาณสารเคมีในซีเมนต์ ดังนั้นการใช้น้ำตาลจึงควรลองผิดลองถูกผสมกับซีเมนต์จริงที่จะใช้ในงานก่อสร้างเพื่อหาปริมาณน้ำตาลที่ควรเติมที่เหมาะสม ส่วนปริมาณน้ำตาลที่มากเกินไป คือ 0.2-1% ของปริมาณซีเมนต์ จะทำให้ไม่เกิดการก่อตัว

เมื่อน้ำตาลถูกใช้เป็นสารหน่วงการก่อตัว กำลังของคอนกรีตในช่วงแรก ๆ จะลดลง แต่หลังจาก 7 วันกำลังก็จะเพิ่มมากขึ้นมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ใช้สารหน่วงการก่อตัว เนื่องมาจากการหน่วงการก่อตัวซึ่งมีผลต่อ

สารหน่วงการก่อตัวใช้บ่อยมากในสภาพอากาศร้อน และจะมีประสิทธิผลน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดูภาพ 5.4 ประกอบ และบางครั้งสารหน่วงการก่อตัวจะไม่มีผลเลยเมื่ออุณหภูมิสูงมาก ๆ คือ ประมาณ 60°C (140°F) เพื่อให้สารหน่วงการก่อตัวได้ผลอย่างแท้จริง จะแสดงการหน่วงการก่อตัวในรูปของการก่อตัวของคอนกรีตเริ่มต้น ดังแสดงในตาราง 5.2 ผลกระทบจากอุณหภูมิที่มีต่อเวลาการก่อตัวมีผลน้อยกว่า



รูปที่ 5.4 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการเซ็ตตัวเริ่มต้นของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารหน่วงการก่อตัวต่างๆ [6]

ASTM C 494 [4] ต้องการให้สารผสมเพิ่มประเภท B สามารถหน่วงการก่อตัวเริ่มต้นอย่างน้อยที่สุด 1 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 3.5 ชั่วโมง กำลังอัดของคอนกรีตเมื่อมีอายุ 3 วัน จะยอมให้มีกำลังน้อยกว่ากำลังของคอนกรีตที่ควบคุมได้ไม่เกิน 10%

5.4.3 สารลดปริมาณน้ำ (Water-reducing admixtures)

ตามมาตรฐานของ ASTM C 494 [4] สารผสมเพิ่ม Type A จะอ้างอิงถึง สารลดปริมาณน้ำ แต่สารลดน้ำและมีคุณสมบัติเป็นตัวหน่วงด้วยจะเป็นสารผสมเพิ่ม Type D สารผสมเพิ่มที่สามารถลดปริมาณน้ำและมีคุณสมบัติเร่งการแข็งตัว (Type E) จะมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมาก อย่างไรก็ตามสารลดปริมาณน้ำที่ใช้เป็นสารผสมเพิ่มจะแสดงขนาดของผลกระทบ การหน่วง ซึ่งสามารถใช้รวมกันในการผสม

หน้าที่ของสารลดปริมาณน้ำจะใช้ลดปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีต จะมีการใช้ประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ บางครั้ง (ในงานคอนกรีตที่ต้องการคุณภาพสูง) จะใช้ 15 เปอร์เซ็นต์ จุดประสงค์ที่มีการใช้สารผสมเพิ่ม เพื่อลดปริมาณน้ำในการผสมคอนกรีตซึ่งจะยอมให้มีอัตราส่วน Water/Cement ตามต้องการ หรือเพิ่มส่งเสริมการทำงานให้ดีขึ้นในสภาวะที่กำหนด Water/Cement มา

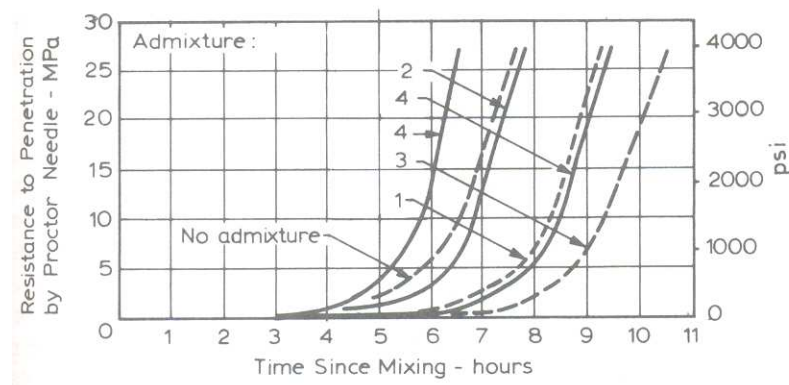
ให้ มวลรวมที่จะใช้จะต้องมีขนาดคละดีเมื่อมีการใช้สารลดปริมาณน้ำ โดยจะต้องมีการแยกตัวต่ำ และมีการไหลที่ดี

สารลดปริมาณน้ำสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตปั๊ม หรือ placed concrete ได้

สารผสมเพิ่มประกอบสารประกอบหลัก 2 ชนิดคือ

1. เกลือและสารประกอบ Lignosulfonic
2. เกลือและสารประกอบ Hydroxylated carboxylic acid

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากสารเหล่านี้แสดงดังรูป 5.5 จาก Type A หรือ Type E



รูปที่ 5.5 แสดงผลกระทบของการใช้สารลดปริมาณน้ำที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเวลาเซตตัวของคอนกรีตโดยหมายเลข 1 และ 2 เกิดจากการใช้สารประกอบหลัก Lignosulfonic, และหมายเลข 3 และ 4 เกิดจากการใช้สารประกอบหลัก Hydroxylated carboxylic acid [6]

ส่วนประกอบหลักที่ทำให้ผิวของวัสดุมีความแข็งแรงเกิดจากการรวมตัวของส่วน 2 ส่วนมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้าน ฟิสิกส์-เคมี ของแรงที่กระทำที่ผิว โดยวัตถุจะมีการดูดซับอนุภาคซีเมนต์มีผลทำให้มีการเปลี่ยนเป็นประจุลบ ซึ่งจะมีผลต่อเสถียรภาพทำให้ฟองอากาศเกิดการแยกตัวและไม่สามารถติดกันได้ ทำให้น้ำสัมผัสอนุภาคซีเมนต์ได้มากขึ้น สารลดปริมาณน้ำจะไปเพิ่มพื้นผิวของซีเมนต์ให้สามารถรวมตัวน้ำได้มากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อปฏิกิริยา Hydration

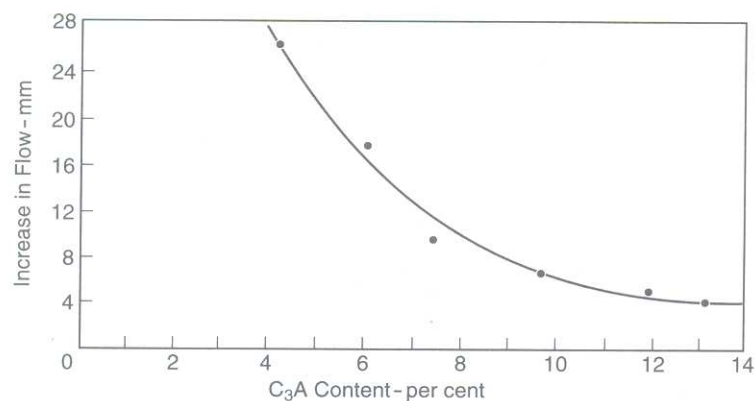
ในทางเพิ่มเติมสารผสมเพิ่มจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำ ทำให้ส่วนผสมที่การไหลดีขึ้นทำให้การทำงานได้ง่ายขึ้น

ผลกระทบของการกระจายอนุภาคซีเมนต์ ทำให้พื้นผิวของซีเมนต์เกิดปฏิกิริยา Hydration มากขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาเร็วมากในช่วงแรก คอนกรีตมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้มีสารผสมเพิ่ม โดยความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งซีเมนต์ สารผสมเพิ่มมีส่วนช่วยให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเพราะ จะไปส่งเสริมทำให้เกิดปฏิกิริยา

Hydration ดีขึ้น ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจะเห็นได้ชัดเมื่อคอนกรีตยังหนุ่มอยู่ แต่คอนกรีตจะยังแข็งดีอยู่เมื่อเวลาผ่านไปนาน

แม้ว่าสารลดปริมาณน้ำจะมีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา Hydration ของซีเมนต์ แต่ก็ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์และโครงสร้างของซีเมนต์ของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นเมื่อมีการใช้สารลดปริมาณน้ำก็ไม่มีความต้านทานการกัดกร่อนคอนกรีตในสถานะที่เป็นหนึ่งแข็งหรือหิมะ โดยทั่วไปเมื่อมีการประเมินผลประโยชน์ของการใช้สารลดปริมาณน้ำจำเป็นจะต้องเกี่ยวข้องกับพื้นฐาน แม้ว่าสารลดปริมาณน้ำมีผลต่อการหน่วงในการก่อตัวของคอนกรีตแต่ก็ไม่เสมอไป ในอนาคตเราจะพิจารณาถึงอันตรายที่เกิดจากการแยกตัวของคอนกรีต

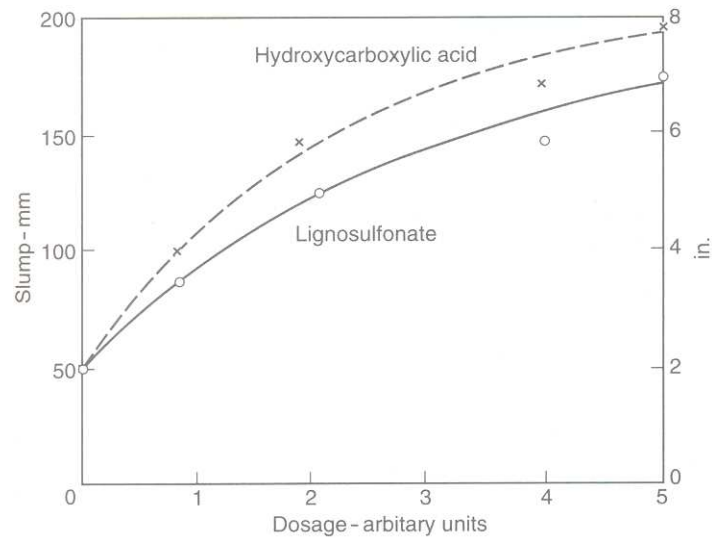
ผลกระทบของการใช้สารลดปริมาณน้ำจะมีผลต่อความแข็งแรงในส่วนผสมของซีเมนต์เมื่อเริ่มต้นจะมีการเปลี่ยนแปลงมาก และซีเมนต์จะมีค่าความเป็นด่างต่ำหรือมีปริมาณ C_3A ที่เป็นส่วนผสมอยู่น้อย ดังตัวอย่างจะมีการส่งเสริมให้การทำงานในส่วนผสมดีขึ้น การกำหนดปริมาณสารที่ใช้ในส่วนผสมจะขึ้นอยู่กับปริมาณ C_3A ที่ผสมไปปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ดังแสดงในรูป 5.6



รูปที่ 5.6 ผลกระทบของปริมาณ C_3A ในซีเมนต์ ที่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณการไหลของมอร์ตาร์ ที่มีสารประกอบ Lignosulfonate เป็นส่วนผสม 0.2 เปอร์เซ็นต์ [6]

โดยทั่วไปปริมาณที่กำหนดต่อซีเมนต์ 100 กิโลกรัมจะมีปริมาณต่ำ สารลดปริมาณน้ำจะมีผลกระทบมากเมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมใน Pozzolanas ในส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์อย่างเดียว

เมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำในส่วนผสมจะสามารถเพิ่มความสามารถในการทำงาน ดังแสดงในรูป 5.7 แต่จะไม่มีการเกิดการหน่วงเกิดขึ้น



รูปที่ 5.7 แสดงผลกระทบของปริมาณสารหน่วงการก่อตัวที่มีผลต่อ Slump [6]

ผลกระทบของการใช้สารลดปริมาณน้ำจะมีผลมากขึ้นเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และปริมาณของอลูมินาที่ใช้เป็นส่วนผสม แต่โดยแท้จริงแล้วผลกระทบที่เกิดจากการใช้สารลดปริมาณน้ำจะขึ้นกับปริมาณซีเมนต์ , ปริมาณน้ำ , ชนิดมวลรวมที่ใช้และปริมาณฟองอากาศหรืออุนท์หุมิ ดังนั้นจะต้องมีการทดลองผสมเพื่อหาปริมาณที่แท้จริงของวัสดุที่จะใช้ในงาน ตามชนิดและคุณภาพของสารผสมเพิ่มที่กำหนดไว้เป็นคุณสมบัติของสารผสมเพิ่มตามที่โรงงานผลิตกำหนดมา

5.4.4 สารลดน้ำพิเศษซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ (Superplasticizers)

Superplasticizers เป็นสารผสมเพิ่มที่ลดปริมาณน้ำ แต่จะแสดงและชัดเจนมากกว่า ดังนั้นเราจะพิจารณาถึงเงื่อนไขการลดปริมาณน้ำ โดยปกติสาร Superplasticizers จะสามารถลดปริมาณน้ำได้มากกว่าและสามารถทำให้คอนกรีตสดมีความแข็งแรงมากกว่า ซึ่งจะมีความแตกต่างกับสารลดปริมาณน้ำใน Type A, D, หรือ E

สำหรับสาร Superplasticizers ตามมาตรฐาน ASTM C 494 [4] และพิจารณาแยกตามหนังสือ โดยมาตรฐาน ASTM C 494 [4] จะพูดถึงว่าเป็นสารผสมเพิ่มที่ลดปริมาณน้ำได้สูง ซึ่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลายและมีคุณภาพที่ดี

ตามมาตรฐาน ASTM สาร Superplasticizers จะอ้างอิงถึงสารผสมเพิ่ม Type F และสารผสมเพิ่มที่มีคุณสมบัติการหน่วงด้วยจะอ้างอิงถึง Type G

ธรรมชาติของสาร Superplasticizers

สาร Superplasticizers ประกอบด้วยสารประกอบหลัก 4 อย่าง คือ

1. Sulfonated Melamine Formaldehyde Condensates
2. Sulfonated naphthalene-formaldehyde Condensates
3. Lignosulfonates

4. Sulfonic-acid esters และ Carbohydrate esters

สาร Superplasticizers เป็นสารพอลิเมอร์ Organic สามารถละลายน้ำได้ ซึ่งการนำไปใช้จะรวมตัวกันเป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลยาวและมีมวลโมเลกุลมาก ดังนั้นเมื่อเทียบกับสิ่งอื่นจึงมีราคาสูงกว่า ยิ่งไปกว่านั้นเพราะว่าในการผลิตมีความจำเพาะด้านที่จะลักษณะการผลิต ให้ได้โมเลกุลที่ยาว และมีจุดเชื่อมต่อน้อยที่สุด ดังนั้นจะต้องให้มีสิ่งเจือปนที่ไม่บริสุทธิ์น้อยที่สุด เพราะถ้ามากเกินไปจะทำให้เกิดความเสียหายกับคอนกรีตได้ มวลโมเลกุลที่ใหญ่เกินไปจะไปส่งเสริมที่สาร Superplasticizers มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

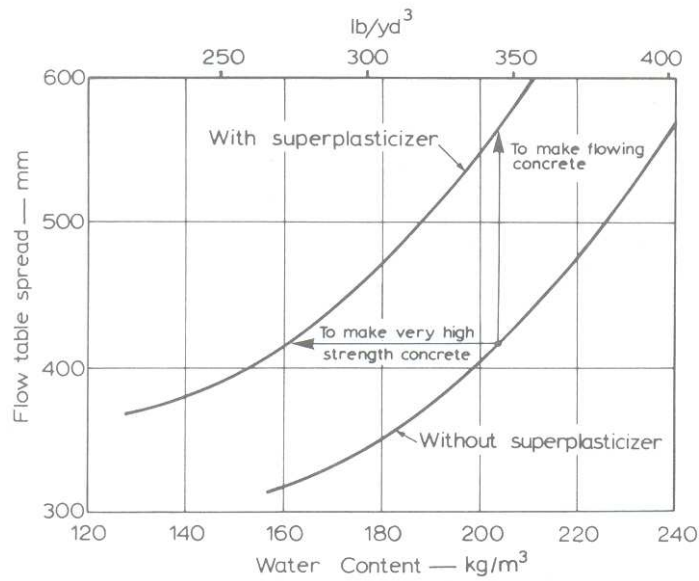
สาร Superplasticizers โดยส่วนมากได้มาจากเกลือโซเดียมและ เกลือแคลเซียมจากขั้นตอนสุดท้ายในการผลิต ผลที่ตามมาจากการใช้เกลือโซเดียมคือ คอนกรีตจะเกิดต่างมากขึ้นซึ่งจะมีผลต่อปฏิกิริยา Hydration ของซีเมนต์ สำหรับปริมาณที่จะใช้สารผสมเพิ่มจะจำกัดการใช้ไม่เกิน 0.02 เปอร์เซ็นต์ โดยมวลของซีเมนต์

ผลของการใช้สาร Superplasticizers (Effects of Superplasticizers)

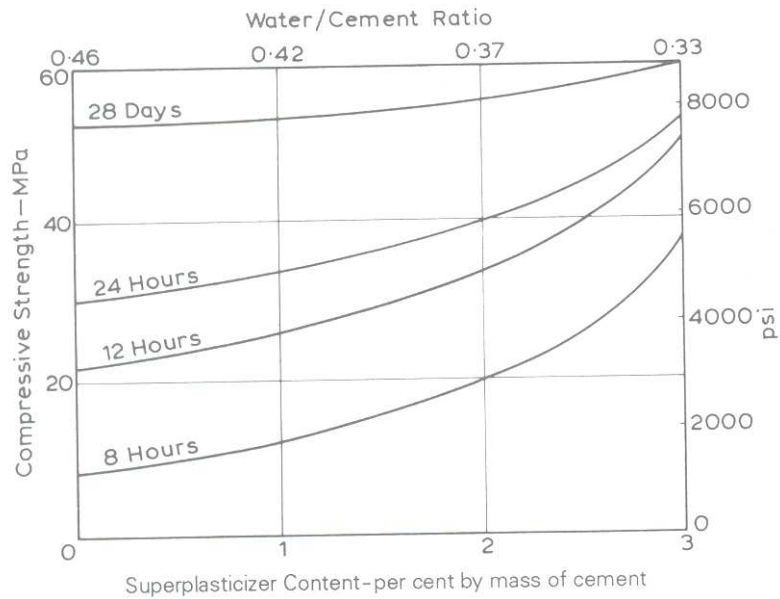
ปฏิกิริยาที่สำคัญคือ โมเลกุลที่ยาวจะไปห่อหุ้มอนุภาคซีเมนต์ มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นประจุลบมากขึ้น ดังนั้นผลึกจะมีการแยกห่างกันมากขึ้นเป็นผลให้อนุภาคซีเมนต์มีการกระตัว ซึ่งจะส่งเสริมการทำงานให้มีประสิทธิภาพที่สุดและคอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วย

เมื่อเรากำหนดอัตราส่วน water/cement และปริมาณน้ำที่จะใช้ในส่วนผสมสาร Superplasticizers จะทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังตัวอย่าง โดยการกำหนดให้ slump ตั้งแต่ 75 มม. ถึง 200 มม. ดังแสดงในรูป 5.8 เมื่อมีการใช้สาร Superplasticizers จะไปเพิ่มการไหลของคอนกรีตให้ทำงานได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะเหมาะกับงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดใหญ่ พื้นที่ไปไม่ทั่วถึง และงานที่ต้องการความรวดเร็ว

สิ่งที่สองที่ต้องมีการใช้สาร Superplasticizers เพราะในคอนกรีตที่มีการทำงานธรรมดาแต่ต้องการความแข็งแรงมาก เราจะสามารถลดอัตราส่วนของ water/cement ลง 0.2 จะได้ค่าความแข็งแรงที่ 28 วันของ cylinder เท่ากับ 150 Mpa โดยทั่วไปเราเรียกสาร Superplasticizers ว่าสารลดปริมาณน้ำโดยสามารถลดปริมาณน้ำในส่วนผสมสำหรับการทำงานได้ 25-35 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มความแข็งแรง 50-75 ชั่วโมง และจะเพิ่มขึ้นอีกตามอายุของคอนกรีต ในส่วนผสมที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 30 Mpa ในเวลา 7 ชั่วโมง ซึ่งแสดงในรูป 5.9



รูปที่ 5.8 ความสามารถในการไหลของคอนกรีตที่มีการใช้สาร Superplasticizers เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีการใช้สาร [6]



รูปที่ 5.9 การใช้สาร Superplasticizers ที่มีผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีต [6]

สาร Superplasticizers จะไม่ทำให้โครงสร้างของซีเมนต์เฟสค์เปลี่ยนแปลงไป แต่จะมีผลต่อการกระจายตัวอนุภาคของซีเมนต์ซึ่งจะส่งผลต่อปฏิกิริยา Hydration เราจะใช้สาร Superplasticizers เพื่อเพิ่มความแข็งแรงที่อัตราส่วน water/cement คงที่ มีการยืนยันว่าปริมาณความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 24 ชั่วโมงและเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 28 วัน

ปริมาณการใช้สาร Superplasticizer (Dosage of Superplasticizers)

สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในการผสม โดยทั่วไปจะใช้สาร Superplasticizer เป็นปริมาณ 1 ถึง 3 ลิตร ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร สาร Superplasticizer ที่เป็นของเหลวจะมี ปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมทั้งหมด เมื่อใช้สาร Superplasticizer จะลดปริมาณน้ำในส่วนผสมแล้ว ปริมาณสูงสุดที่อนุญาตให้ใช้คือ 5-20 ลิตร ต่อ คอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ในการคำนวณปริมาณอัตราส่วน water/cement และคุณสมบัติโดยทั่วไปของส่วนผสม ปริมาตรที่จะใช้สาร Superplasticizer

5.5 สารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ (Mineral Admixtures)

ในการปรับคุณสมบัติบางอย่างของคอนกรีตสามารถใช้สารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุบางชนิด ผสมเพิ่มเติมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ วัสดุเฉื่อย (Inert Materials) วัสดุซีเมนต์ (Cementing Materials) และ วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials)

5.5.1 วัสดุเฉื่อย (Inert Materials)

คอนกรีตที่ขาดมวลรวมที่ค่อนข้างละเอียดเกิดการแยกตัวได้ง่าย และไม่เหมาะสมในการลำเลียงโดยการสูบส่งหรือการเทโดยใช้ท่อ การเพิ่มการเกาะตัวของคอนกรีตสามารถทำได้โดยใช้วัสดุเฉื่อยจำพวก หินปูนบดละเอียด ทรายละเอียด และหินฝุ่น เป็นต้น การใช้วัสดุเฉื่อยละเอียด ผสมเพิ่มในคอนกรีตยังช่วยลดการเยิ้มและการตกแต่งผิวของคอนกรีตทำได้ง่ายขึ้น ปูนซีเมนต์ผสมที่นิยมใช้ในการก่ออิฐและฉาบได้มาจากการบดปูนเม็ดกับวัสดุเฉื่อย การใช้วัสดุเฉื่อยละเอียด เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์จะลดกำลังของคอนกรีตเพราะปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ในงานโครงสร้างของอาคารซึ่งต้องรับแรงสูง

5.5.2 วัสดุซีเมนต์ (Cementing Materials)

วัสดุซีเมนต์ได้แก่ปูนซีเมนต์ธรรมชาติและตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น เนื่องจากวัสดุเหล่านี้ มีคุณสมบัติเป็นปูนซีเมนต์ในตัวเองและสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ ดังนั้นเมื่อทำปฏิกิริยาเคมีจะให้สารประกอบของ CSH และ CAH เหมือนกับปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะช้ากว่า และกำลังในช่วงแรกจะต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1. ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Groud Granulated Blast-Furnace (GGBF) Slag)

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด หรือเรียกว่า Slag cement เป็นตะกรันเหล็กที่หลอมละลายในเตาถลุงเหล็ก โดยมีส่วนประกอบของซิลิกาและอลูมินาซิลิกาของแคลเซียม ซึ่งเกิดขึ้นในขณะหลอมละลายพร้อมกับเหล็กในเตาถลุงเหล็ก ตะกรันจะละลายอุณหภูมิประมาณ $1500^{\circ}C$ ($2730^{\circ}F$) และถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มลงในน้ำ ซึ่งมีลักษณะคล้ายทรายละเอียดไม่เป็นผลึก เมื่อทำการบดละเอียดมีขนาดเล็กลงกว่า 45 ไมครอน จะมีพื้นที่ผิว Blaine ประมาณ $400 - 600 m^2/kg$ ความ

ถ่วงจำเพาะของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดอยู่ในช่วง 2.85 – 2.95 ความหนาแน่นรวมมีค่าประมาณ 1050 – 1375 kg/m³ (66 – 86 lb/ft³)

ตะกรันมีลักษณะหยาบและมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ และ NaOH หรือ CaOH จากปฏิกิริยาต่อเนื่องจากปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ การทำปฏิกิริยากับน้ำ และการก่อตัวมีลักษณะคล้ายกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ อย่างไรก็ตามตะกรันที่ทำให้เย็นด้วยอากาศจะไม่มีคุณสมบัติในการแข็งตัวเมื่อผสมกับน้ำเหมือนกับตะกรันที่ทำให้เย็นด้วยน้ำ

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดได้ถูกพัฒนานำมาใช้เป็นครั้งแรกในเยอรมันปี 1853 ตะกรันที่บดถูกเป็นวัสดุประสานในคอนกรีตตั้งแต่ปี 1900 เมื่อนำตะกรันเตาถลุงเหล็กมาใช้ในงานคอนกรีตปกติในอเมริกาเหนือ จะนิยมโดยใช้แทนที่ซีเมนต์ระหว่าง 30% และ 45% บางครั้งคอนกรีตที่ผสมตะกรันจะมีตะกรัน 70% หรือมากกว่าของวัสดุประสาน ASTM C 989 [7] ได้แยกตะกรันตามการเพิ่มของปฏิกิริยา โดยแบ่งเป็น Grade 80, 100 หรือ 120 ASTM C 1073 [8]

5.5.3 วัสดุพอซโซลาน (Pozzolan Materials)

มาตรฐาน ASTM C 618 [5] ให้คำจำกัดความของ “วัสดุพอซโซลาน” (Pozzolan materials) ไว้ว่า วัสดุพอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา (Siliceous) หรือซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุพอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุพอซโซลานมีความละเอียดมากพอและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่าปฏิกิริยาพอซโซลาน (Pozzolan reaction) วัสดุพอซโซลานที่รู้จักกันทั่วไป ได้แก่ วัสดุพอซโซลานธรรมชาติ (Natural pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาว (Metakaolin) เป็นต้น และวัสดุพอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น

วัสดุพอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 [5] แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ประเภท F, ประเภท C และประเภท N โดยแบ่งจากคุณสมบัติทางด้านเคมีเป็นหลัก ดังแสดงในตารางที่ 5.2 วัสดุพอซโซลานประเภท F โดยปกติมักได้จากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) และมักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่ำกว่าร้อยละ 10 ประเภท C โดยปกติได้จากการเผาถ่านหินประเภทลิกไนต์ (Lignite) หรือสับ-บิทูมินัส (Subbituminous) และมักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10 ส่วนประเภท N เป็นวัสดุพอซโซลานตามธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงหรือนำมาผ่านกระบวนการเผาจนมีคุณสมบัติตามที่ต้องการก่อน

ปัจจุบันวัสดุพอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปของการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ เนื่องจากวัสดุพอซโซลานช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งในด้านการรับ

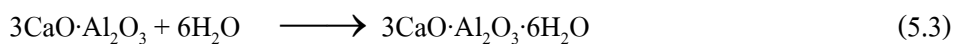
กำลังอัด ความทนทานต่อสารเคมีจำพวกกรดหรือซัลเฟต และสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลง เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ วัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดอาจส่งผลดีต่อคอนกรีตแตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัว โดยองค์ประกอบทางแร่ธาตุที่อยู่ในรูปไม่เป็ผลึกและความละเอียดของวัสดุปอซโซลาน คือ ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี

ตารางที่ 5.2 การแบ่งประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 [5]

คุณสมบัติ	ประเภท F	ประเภท C	ประเภท N
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ , น้อยที่สุดร้อยละ	70.0	50.0	70.0
SO ₃ , มากที่สุดร้อยละ	5.0	5.0	4.0
ปริมาณความชื้น, มากที่สุดร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้, มากที่สุดร้อยละ	6.0	6.0	10.0
ดัชนีกำลังที่อายุ 7 หรือ 28 วัน, น้อยที่สุดร้อยละ	75.0	75.0	75.0

ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่คายความร้อนออกมา และมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (3CaO·2SiO₂·3H₂O หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (3CaO·Al₂O₃·6H₂O หรือ C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ (5.1) ถึง (5.3)



ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่เกิดจากสมการที่ (5.1) และ (5.2) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) และอลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) ที่มีอยู่ในวัสดุปอซโซลาน ผลที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ดังสมการที่ (5.4) และ (5.5)





ค่า x , y และ z ในสมการที่ (5.4) และ (5.5) เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานนี้จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน และทำปฏิกิริยาต่อไป แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครั้งก็ตาม

1. เถ้าถ่านหิน (Fly Ash)

เถ้าถ่านหิน เป็นวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้มากที่สุดในคอนกรีต เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหิน ในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ในเตา สารประกอบส่วนใหญ่รวมถึงคาร์บอนจะไหม้และระเหยเป็นไอ นอกจากนี้ในระหว่างการเผาไหม้จะมีแร่ธาตุบางตัวที่เจือปนในถ่านหิน (เช่น ดินเหนียว, Feldspar, ควอตซ์, และหินเชล) จะหลอมละลายลอยสู่ปล่องควัน ในระหว่างที่วัสดุที่หลอมเหลวนั้นจะเย็นตัวลงและรวมกันเป็นอนุภาคกลมอสัญฐาน เรียกว่า เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย เถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาจากปล่องควันและถูกดักจับด้วยเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตหรือถุงดักฝุ่น เถ้าถ่านหินจะมีลักษณะเป็นผงละเอียดคล้ายปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

อนุภาคเถ้าถ่านหินจะมีรูปร่างกลมตันและบางส่วนจะเป็นโพรงเรียกว่า (Cenospheres) ในบางกรณีเถ้าถ่านหินที่มีรูพรุนอาจมีเถ้าถ่านหินขนาดเล็กๆ อยู่ภายใน ซึ่งเรียกรูปร่างอย่างนี้ว่า Plerospheres วัสดุผงที่เกิดจากการบด เช่น ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะมีขนาดเป็นเหลี่ยมมุม ขนาดละอนุภาคของเถ้าถ่านหินมีค่าตั้งแต่น้อยกว่า 1 ไมครอน ถึงมากกว่า 100 ไมครอนเมตร อย่างไรก็ตามเถ้าถ่านหินมักมีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 20 ไมครอนเมตร มีเพียง 10% - 30% ของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 45 ไมครอนเมตร และมีพื้นที่ผิวประมาณ 300 – 500 ม²/กก. อย่างไรก็ตามเถ้าถ่านหินบางอย่างอาจมีพื้นที่ผิวที่ต่ำ คือ 200 ม²/กก. และสูงถึง 700 ม²/กก. สำหรับเถ้าถ่านหินปกติที่ไม่ถูกอัดแน่น ความหนาแน่นโดยรวมจะมีค่าระหว่าง (มวลต่อปริมาตร 1 หน่วย โดยรวมอากาศระหว่างอนุภาค) 540 – 860 กก./ม³ และเมื่อมีการอัดแน่นหรือการเขย่าสั่นจะมีค่าประมาณ 1120 – 1500 กก./ม³

2. ดินขาวเผา (Metakaolin)

ดินขาวเผาหรือ Metakaolin ได้จากการนำดินขาวดิบหรือ kaolin ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติมาเผา ในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม โดยทั่วไปมีลักษณะของผลึกเป็นอันธรูป (Amorphous) มีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือสีชมพูขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุเหล็กที่เป็นองค์ประกอบทางเคมี โดยทั่วไปมีซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) และอลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) เป็นหลัก ดินขาวเผามีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มากโดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.5 ไมครอน ดินขาวเผาจัดเป็นสารปอซโซลาน Class N raw or calcined pozzolans ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [5] เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำจะเกิดสารประกอบ

คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$; CSH) และคัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต($3\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$; CAH) ที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานและให้กำลังแก่คอนกรีตนอกจากปฏิกิริยาเคมี (Pozzolanic reaction) ที่เกิดขึ้นแล้ว ดินขาวเฝ้ายังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตทางกายภาพอีกด้วย โดยอนุภาคของดินขาวช่วยลดความพรุน (Porosity) ในเนื้อคอนกรีตโดยอนุภาคของดินขาวเฝ้าที่มีขนาดเล็กเข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์(Microfiller effect) ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น ดังนั้นการใช้ดินขาวเฝ้าผสมในคอนกรีตมีผลในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในด้านกำลัง (Strength) และความทนทาน (Durability)

ลักษณะทางกายภาพของดินขาวเฝ้าที่ชัดเจนคือเป็นผงสีส้มอ่อนที่ละเอียดมาก จากภาพถ่ายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าดินขาวมีรูปร่างของอนุภาคไม่แน่นอนส่วนใหญ่เป็นแผ่นมีรูพรุนและเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน ดินขาวมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 9 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 9800 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม จากการทดสอบความละเอียดโดยวิธีการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Blaine specific surface area) ตามมาตรฐาน ASTM C 204 [9] อนุภาคดินขาวมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ถึง 3 เท่า

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และดินขาวเฝ้า (ASTM C 168) แสดงในตารางที่ 5.4 ดินขาวเฝ้ามีความถ่วงจำเพาะ 2.43 ซึ่งต่ำกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ทั้งนี้มีความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันเป็นผลเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีองค์ประกอบของคัลเซียมออกไซด์และเหล็กออกไซด์ที่มีมวลโมเลกุลสูงอยู่ในปริมาณมาก ในขณะที่ดินขาวเฝ้ามีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินาที่มีมวลโมเลกุลต่ำอยู่ในปริมาณมาก

3. เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash)

ในปีหนึ่งๆประเทศไทยได้แกลบจากการสีข้าวประมาณ 5 ล้านตัน ในแต่ละตันของข้าวเปลือกเมื่อสีแล้วจะมีแกลบอยู่ประมาณ 200 กก. และเมื่อนำแกลบไปเผาจะได้เถ้าแกลบ (Rice husk ash) ประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักของแกลบหรือประมาณ 40 กก. การเผาแกลบที่อุณหภูมิในช่วง 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส จะทำให้ SiO_2 อยู่ในรูปไม่เป็นผลึกซึ่งมีความไวต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ถ้าเผาแกลบที่อุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้มีสารอินทรีย์เหลืออยู่และไม่เหมาะสมกับการนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ แต่ถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงเกินไปซิลิกาที่ได้จะเป็นผลึกซึ่งจะเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานและไม่เหมาะต่อการนำไปผสมทำคอนกรีตเช่นกัน การเผาแกลบในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส สามารถทำได้โดยการเผาแกลบกองเล็กๆโดยใช้แกลบหนักประมาณ 20 กก. แกลบที่ได้จะมีสีเทาขาว ผิวของเถ้าแกลบที่มีรูพรุนสูง ซึ่งจะดูดน้ำเข้าไปในตัวเถ้าแกลบได้ง่าย มีรูปร่างไม่แน่นอน

นอกจากนี้ยังนิยมใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในโรงสี ซึ่งเถ้าแกลบที่ได้จากโรงสีมีสีดำและอุณหภูมิของการเผาแกลบจะสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากเวลาในการเผาค่อนข้างสั้นคือต่ำกว่า 10 นาที ทำให้เถ้าแกลบดำที่ได้ยังอยู่ในรูปไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ และสามารถผสม

แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้เช่นกัน แต่การบดละเอียดต้องใช้เวลานานขึ้น ซึ่งเมื่อนำไปบดให้ละเอียดจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี การบดเข้าเกลบให้ละเอียดเป็นการเพิ่มความไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน เถ้าเกลบเทาหรือเทาขาวบดละเอียดได้ง่ายกว่าเถ้าเกลบดำ ความละเอียดของเถ้าเกลบที่บดละเอียดแล้วมีค่าประมาณ 8,000 ถึง 15,000 ซม²/ก เมื่อวัดโดยวิธีของเบลนซึ่งค่อนข้างสูงเนื่องจากเถ้าเกลบมีพื้นที่ผิวมากเพราะโครงสร้างมีรูพรุนสูง ขนาดอนุภาคของเถ้าเกลบบดละเอียดจะมีความหลากหลาย คือ มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 100 ไมโครเมตร ขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการบดเถ้าเกลบ

4. ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume)

Silica fume, Microsilica , หรือ Condensed silica fume เป็นชื่อเรียกวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ซึ่งวัสดุนี้เป็นผลพลอยได้ (By - product) ของโรงงาน Silicon metal และ Ferrosilicon Alloy เป็นขบวนการ Reduction จาก Quartz ที่บริสุทธิ์ไปเป็น Silicon โดยวิธี Electric arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000° C ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ SiO₂ ซึ่งต่อมาจะ Oxidize และ Condense ที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้เป็นอนุภาคขนาดเล็กมากๆ ของ Silicon ที่อยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก (Glassy phase) ซิลิกาฟุ้งจะถูกดักจับใน Fillers บรรจุใส่ถุงไว้ โดยทั่วไปจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 μm และมี Surface area ประมาณ 20 ถึง 25 m²/g (โดยวิธี Nitrogen absorption) ขนาดของ Silica fume นี้ (0.1μm) เป็นขนาดเล็กมากๆ กล่าวคือมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 100 เท่า

เนื่องจากลักษณะอนุภาคของซิลิกาฟุ้งที่เล็กมากๆ และมี Surface area สูง และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก (Amorphous) ทำให้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยา ปอซโซลานได้เร็วมาก ปัญหาของซิลิกาฟุ้งที่พบบ่อยเมื่อใช้ในคอนกรีตคือการที่ต้องเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสม เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าเดิมซึ่งสาเหตุเองจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากๆ ของมัน

ในโรงงานของ Silicon metal and ferrosilicon alloy จะได้ผลพลอยได้ของ Silica fume โดยที่ร้อยละ 75 หรือมากกว่าจะประกอบด้วย Silicon และ Silicon ที่ได้นี้กว่าร้อยละ 85 ถึง 95 จะเป็น Glassy Phase ของ Silica ซึ่งพร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

ส่วนในโรงงาน Ferrosilicon ที่ได้ผลพลอยได้ของ Silicon ประมาณร้อยละ 50 พบว่า Silica ที่มีอยู่จะน้อย และเป็นรูปผลึกค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้การใช้ซิลิกาฟุ้งเหล่านี้ในคอนกรีตไม่ดีนัก เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำ

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ้งคือ SiO₂ ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ ซิลิกาฟุ้งที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมี SiO₂ มากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O และออกไซด์อื่นๆอีกร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้มีอยู่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของ SiO₂ หากนำค่าออกไซด์ของซิลิกาฟุ้งมาเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหิน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เถ้าเกลบ และ ดินขาวเผา จะพบว่า มีองค์ประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมากดังแสดงในตารางที่ 5.3

คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ่มที่เห็นชัดเจน คือเป็นฝุ่นผงที่ละเอียดมากสีเทา เทาดำ หรือเทาอมขาว แต่ถ้าเป็นซิลิกาฟุ่มควบแน่นจะมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากการรวมตัวของซิลิกาฟุ่มหลายๆอนุภาคเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟุ่มมีค่าประมาณ 2.2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวประมาณ 200,000 ถึง 250,000 ซม²/ก ซึ่งใช้การทดสอบโดยวิธีดูดซับก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen absorption test) และถือว่ามีค่าสูงมาก (ขณะที่เถ้าถ่านหินมีค่าประมาณ 3,000 ถึง 7,000 ซม²/ก ซึ่งทดสอบโดยวิธีเบลน) ขนาดอนุภาคของซิลิกาฟุ่มเป็นขนาดที่เล็กมากเพราะมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 150 เท่าเพราะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 15 ไมโครเมตร เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีขนาดเล็กมากจึงมีปัญหาในการขนย้าย เพื่อแก้ปัญหาจึงมีการนำซิลิกาฟุ่มมาอัดรวมกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่าซิลิกาฟุ่มควบแน่น สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของ ซิลิกาฟุ่ม เถ้าถ่านหิน ดินขาวเผา เถ้าแกลบ ตะกรัน เตาถลุงเหล็ก และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้แสดงเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.3 ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของวัสดุประสาน

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)					
	ปูนซีเมนต์ประเภท I	เถ้าถ่านหินแม่เมาะ	ตะกรันเตาถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟุ่ม	เถ้าแกลบ	ดินขาวเผา
SiO ₂	20	48	37	92	90	55
Al ₂ O ₃	5	26	11	0.7	0.5	40
Fe ₂ O ₃	3	10	0.3	1.2	2.0	0.5
CaO	60	5	40	0.2	0.5	-
MgO	1.1	2	7	0.2	0.2	-
SO ₃	2.4	0.7	0.3	-	1.5	-
ออกไซด์อื่นๆ	1.5	1.3	2.3	2.6	-	-
LOI.	2	3	-	-	4.7	-

ตารางที่ 5.4 คุณสมบัติทางกายภาพของซีลิกาฟูม, ใ้ถ่านหิน, ใ้ถ่กลบบด, ตะกรันเตาดลูงเหล็ก และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ดินขาวเผา	ใ้ถ่านหินแม่เมาะ	ใ้ถ่กลบบด	ตะกรันเตาดลูงเหล็ก	ซีลิกาฟูม
ความละเอียดของเบลน (ซม ² /ก)	3,400	9,800	3,500	8,000	3,500	200,000*
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.43	2.0	2.2	2.9	2.2
สี	เทา	สีส้มอ่อน	เทาอ่อนจนถึงเทาเข้มหรือสีน้ำตาล	เทาถึงเทาดำ	เทา	เทาอมขาวจนถึงเทาดำ

หมายเหตุ * วิธีเบลนไม่สามารถใช้วัดความละเอียดของซีลิกาฟูมได้ แต่ใช้วิธี nitrogen absorption แทน

5.6 สารผสมเพิ่มอื่นๆ (Miscellaneous Admixtures) ที่ใช้มีอยู่หลายอย่างเช่น

1. Gas-forming admixtures : คือสารที่ทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อคอนกรีต เช่น Hydrogen peroxid (ยาล้างแผล), Metallic aluminum ทำให้เกิดก๊าซไฮโดเจน
2. Grouting admixtures : มักใช้ในการ Grouting มักจะเป็นสารผสมเพิ่มที่ใช้ในงานเฉพาะ เช่น พวก Bentonite clay เพื่อลดความหนาแน่น ของ Slurry หรือใ้ Barite และ Iron เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของ Slurry
3. Expansion-producing admixtures พวกนี้มักใช้เพื่อลดปัญหาการหดตัวของคอนกรีตคือใ้สารที่มีการขยายตัวเป็นการเผื่อการหดตัวของซีเมนต์เนื่องจาก Shrinkage
4. Bonding admixtures : เพื่อแรงยึดหน่วงในปูนซีเมนต์ เช่นพวก Latex
5. Pumping aids : เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อทำให้สามารถปั้มคอนกรีตได้โดยเพิ่มความยืดเกาะตัวของคอนกรีตใ้สูงขึ้น เช่น Water-soluble synthetic, Cellulose derivatives, Carboxyl-containing styrene copolymers, Paraffin, Coaltar , Asphalt, Bentonites, silicafume, Fly ash, Hydrated lime.

นอกจากนี้ยังมี

- Coloring admixtures
- Flocculation admixtures
- Damproofing admixtures.
- Permeability-reducing admixtures
- Chemical admixtures to reduce alkali-aggregate expansion
- Corrosion-inhibiting admixture

เอกสารอ้างอิง

1. American Concrete Institute, ACI 116R-90: Cement and Concrete Terminology, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Michigan, 2000.
2. American Society for Testing and Materials, ASTM C125-03 Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, ASTM Standards on Disc, October 2005, Vol. 04.02.
3. American Society for Testing and Materials, ASTM C260-01 Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete, ASTM Standards on Disc, October 2005, Vol. 04.02.
4. American Society for Testing and Materials, ASTM C494/C494M-05 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM Standards on Disc, October 2005, Vol. 04.02.
5. American Society for Testing and Materials, ASTM C618-05 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM Standards on Disc, October 2005, Vol. 04.02.
6. A. M. Neville, 1995, Properties of Concrete, 4th Edition, Addison Wesley Longman Limited, England.
7. American Society for Testing and Materials, ASTM C989-05 Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars, ASTM Standards on Disc, October 2005, Vol. 04.02.
8. American Society for Testing and Materials, ASTM C1073-97a(2003) Standard Test Method for Hydraulic Activity of Ground Slag by Reaction with Alkali, ASTM Standards on Disc, October 2005, Vol. 04.02.
9. American Society for Testing and Materials, ASTM C204-00 Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus, ASTM Standards on Disc, September 2005, Vol. 04.01.

คำถามท้ายบท

1. การเกิดสภาพการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันไป (Freeze-thaw) สามารถทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้อย่างไร จงอธิบาย
2. หากต้องเทคอนกรีตที่อาจเกิดปัญหาสภาพการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันไป จะทำการป้องกันได้อย่างไร
3. เพราะเหตุใด ส่วนผสมคอนกรีตในประเทศไทยจึงไม่นิยมใช้สารกักกระจายฟองอากาศ (Air entraining agent) ส่วนประเทศที่นิยมใช้สารชนิดนี้ในส่วนผสมคอนกรีตมักได้แก่ประเทศในแถบใด และมีเหตุผลอย่างไรที่ต้องใช้สารชนิดนี้

4. การใช้สารกักกระจายฟองอากาศจะส่งผลต่อการเยิ้ม น้ำ ความสามารถในการเท และกำลังของคอนกรีตอย่างไรบ้าง
5. ความละเอียดของปูนซีเมนต์ และ การใช้วัสดุปอซโซลาน ผสมในคอนกรีตจะส่งผลต่อปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตอย่างไรบ้าง และมีข้อแนะนำอย่างไรเพื่อแก้ไขผลกระทบดังกล่าวที่เกิดขึ้นต่อคอนกรีต
6. การเลือกใช้สารหน่วงการก่อตัวในงานคอนกรีตมีหลักการเลือกใช้กับงานประเภทใดและมีสภาพอากาศแบบใด จงอธิบายมาพอเข้าใจ
7. การใช้สารหน่วงการก่อตัวในคอนกรีตจะส่งผลกระทบต่อคอนกรีตอย่างไรบ้าง จงอธิบายมาพอเข้าใจ
8. การเลือกใช้สารเร่งการก่อตัวในงานคอนกรีตมีหลักการเลือกใช้กับงานประเภทใดและมีสภาพอากาศแบบใด จงอธิบายมาพอเข้าใจ
9. การใช้สารเร่งการก่อตัวในคอนกรีตจะส่งผลกระทบต่อคอนกรีตอย่างไรบ้าง จงอธิบายมาพอเข้าใจ
10. จงอธิบายถึงผลกระทบของการใช้แคลเซียมคลอไรด์ในคอนกรีต ต่อสิ่งต่อไปนี้
 - ระยะเวลาการก่อตัว - ปริมาณฟองอากาศ
 - ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน - กำลังอัด
 - การคืบและการหดตัว (Creep and shrinkage)
11. จงอธิบายถึงข้อดีและข้อเสียของการใช้สารลดน้ำพิเศษต่อคอนกรีตว่ามีอะไรบ้าง
12. เพราะเหตุใด จึงไม่นิยมใช้น้ำตาลเป็นสารหน่วงการก่อตัวในคอนกรีต ทั้งที่น้ำตาลเป็นสารหน่วงการก่อตัวที่ได้ผลดีมากชนิดหนึ่ง
13. อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมในขณะเทคอนกรีตที่ผสมสารหน่วงการก่อตัวมีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตอย่างไร
14. หากจำเป็นต้องใช้สารผสมเพิ่มให้เลือก (ซึ่งได้แก่ สารหน่วงการก่อตัว, สารเร่งการก่อตัว, สารกักกระจายฟองอากาศ, สารลดน้ำอย่างมาก, เถ้าถ่านหิน, ซิลิกาฟูม) และเลือกปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 2, 3, 4, 5, ปูนซีเมนต์ขาว, ปูนซีเมนต์ผสม) จงอธิบายหลักการและเหตุผลในการเลือกใช้สารเคมีผสมเพิ่มและปูนซีเมนต์ เพื่อทำคอนกรีตในงานดังต่อไปนี้
 - ก. การก่อสร้างอาคารในประเทศที่มีอากาศหนาวมาก อุณหภูมิติดลบ
 - ข. งานก่อสร้างอาคารสูง 85 ชั้น ใน กทม.
 - ค. งานก่อสร้างโกดังขายทะเล ง. งานก่อสร้างบ้านพักอาศัย 2 ชั้น
15. Super plasticizers คืออะไร มีประโยชน์ต่อการผลิตคอนกรีตอย่างไร
16. วัสดุเหนียว, วัสดุเชื่อมประสาน, วัสดุปอซโซลาน คืออะไร มีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างไร