บทที่ 2
คอนกรีตคุณภาพสูง

2.1 นิยามของคอนกรีตคุณภาพสูง

คอนกรีตคุณภาพสูงหมายถึงคอนกรีตที่มีคุณสมบัติที่ดีทั้งในสภาพคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว กล่าวคือ เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นคอนกรีตเหลวก็สามารถใช้งานได้ง่าย มีการไหลลื่นที่ดี สามารถเทลงแบบหล่อที่ซับซ้อนได้โดยง่าย แม้จะมีเหล็กเสริมอยู่อย่างหนาแน่น โดยส่วนผสมของคอนกรีตมีการยึดเหนี่ยวกันดี ไม่มีการแยกตัวของมวลรวม ทำให้การเทคอนกรีตเป็นไปโดยง่าย และได้งานคอนกรีตที่ดี ปราศจากข้อบกพร่องของเนื้อคอนกรีตอันเนื่องมาจากการทำงาน เช่น คอนกรีตแยกตัว, คอนกรีตเป็นโพรง เป็นต้น และเมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัว เป็นคอนกรีตในสภาพแข็ง จะมีการหดตัวน้อยมาก โดยจะปราศจากรอยแตกร้าวที่ผิวของคอนกรีตอันเนื่องมาจากการหดตัว โดยมีการรักษาปริมาตรคงที่ มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในช่วงต้นสูง และค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันมีค่าสูงตามที่ต้องการ คอนกรีตที่ได้มีค่าอัตราความซึมผ่านต่ำ และมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดีในสภาพการใช้งานจริง

2.2 วัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตคุณภาพสูง

การผลิตคอนกรีตคุณภาพสูง จะกระทำได้จะต้องควบคุมวัสดุส่วนผสมและขบวนการผลิตเป็นอย่างดี โดยวัสดุหลักในการผลิตคอนกรีตได้แก่ ปูนซีเมนต์, น้ำ, หินทราย, สารเคมีผสมเพิ่มและวัสดุผสมเพิ่ม

2.2.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานคอนกรีตคุณภาพสูงโดยทั่วไปจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป ในกรณีงานหล่อชิ้นส่วนสำเร็จรูปหรืองานคอนกรีตอัดแรงก็อาจพิจารณาใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 3 ได้ตามความเหมาะสม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C 150 , มอก. 15-2523

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลผลิตที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่าง ๆ ที่อุณหภูมิประมาณ 1,400 ถึง 1,500 องศา วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิต แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่หนึ่ง คัลเซี่ยม ได้แก่ หินปูน ดินสอพอง ดินปูนขาว ประเภทที่สอง ให้ธาตุซิลิก้า และอลูมิน่า ได้แก่ หินเชล ดินเหนียว หินชนวน สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อเผาส่วนผสมของปูนซีเมนต์แล้วสารออกไซด์ของธาตุคัลเซี่ยม ซิลิก้า อลูมิน่า และเหล็กจะทำปฏิกิริยาเคมีรวมตัวกันได้สาร

ประกอบที่สำคัญ อันได้แก่ ไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต , ไดคัลเซี่ยมซิลิเกต , ไทรคัลเซี่ยมอลูมิเนต , และ เทตราคัลเซี่ยมอลูมิโนเฟอร์ไรท์

ตารางที่ 2.1 สารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต	$3CaO.SiO_2$	C_3S
ไดคัลเซี่ยมซิลิเกต	$2CaO.SiO_2$	C_2S
ไทรคัลเซี่ยมอลูมิเนต	$3Cao.Al_2O_3$	C_3A
เทตราคัลเซี่ยมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นอกจาก จำนวนของสารประกอบจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดของสารประกอบก็เป็นตัวสำคัญที่กำหนดคุณลักษณะต่าง ๆ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนี้

-ไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต [Tricalcium Silicate, (C_3S)] จะทำให้ปูนซีเมนต์รับกำลังได้เร็ว ให้กำลังสูง และเกิดความร้อนมาก การเพิ่มยิปซั่มจะทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสภาพพลาสติกมากขึ้น และช่วยหน่วงเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ช้าลง

-ไดคัลเซี่ยมซิลิเกต [Dicalcium Silicate, (C_2S)] จะทำให้ปูนซีเมนต์รับแรงได้ช้า ให้กำลังสูง และเกิดความร้อนน้อยในการเพิ่มยิปซั่มจะให้ผลหน่วงการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บ้างเล็กน้อย

-ไทรคัลเซี่ยมอลูมิเนต [Tricalcium Aluminate , (C_3A)] จะก่อตัวทันทีที่ผสมกับน้ำ ให้ความร้อนสูง จะให้กำลังรับแรงได้เล็กน้อยในวันแรก และจะไม่ให้กำลังเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่มีประโยชน์ คือ ช่วยเร่งปฏิกิริยาของไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต

-เทตราคัลเซี่ยมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ [Tetracalcium Aluminoferrite , (C_4AF)] จะก่อตัวอย่างรวดเร็ว แต่ช้ากว่า และให้ความร้อนน้อยกว่าไทรคัลเซี่ยมอลูมิเนตเล็กน้อย ส่วนการให้กำลังรับแรงยังไม่เป็นที่ทราบแน่นอน ในปูนซีเมนต์จะมีสารประกอบของไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต และไดคัลเซี่ยมซิลิเกต รวมประมาณร้อยละ 70 ถึง 80 และเป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ คัลเซี่ยม (CaO) ประมาณร้อยละ 60 และซิลิก้า (SiO_2)ประมาณร้อยละ 20 ซึ่งทั้ง 2 ธาตุนี้เป็นสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต และไดคัลเซี่ยมซิลิเกต ซึ่งจะให้กำลังรับแรงได้สูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และ

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Hydration and Pozzolanic Reaction) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration)เป็นปฏิกิริยาหลักของการเปลี่ยนสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ให้เป็นสารเชื่อมประสาน เพื่อพัฒนากำลังรับแรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต (C_3S) และไดคัลเซี่ยมซิลิเกต (C_2S) เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับน้ำแล้ว จะเกิดสารประกอบคัลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรท [Calcium Silicate Hydrate , (CSH)] และคัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ [Calcium Hydroxide , ($Ca(OH_2)$)] อีกประมาณร้อยละ 20 ถึง 25 ขั้นตอนของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นคือ เมื่อผงซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำแล้วจะเกิดเป็นไฮเดรทคอมพาวด์ (Hydrate Compound) โดยไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต และไดคัลเซี่ยมซิลิเกต จะแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งเขียนเป็นสมการเคมีได้ ดังนี้

$$2(3CaO\ SiO_2) + 6H_2O \text{ ----------> } 3CaO\ SiO_2H_2O + 3Ca(OH)_2$$
$$2(2CaO\ SiO_2) + 4H_2O \text{ ----------> } 3CaO\ SiO_2\ 3H_2O + Ca(OH)_2$$

ปฏิกิริยานี้จะดำเนินเรื่อยไป โดยคัลเซี่ยม (CaO) จะแยกตัวออกมาจากคัลเซี่ยมซิลิเกต ($CaO\ SiO_2$) ไปเป็น คัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] จนสารละลายนั้นอิ่มตัว ด้วยคัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ หรือสารประกอบคัลเซี่ยมซิลิเกตทำปฏิกิริยาไปจนหมดจากสารละลายสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทั้ง 2 ส่วน คือ

1. คัลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรท (CSH) มีสูตรเคมีเป็น $3CaO\ SiO_2\ 3H_2O$ ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสาน
2. คัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ มีสูตรเคมีเป็น [$Ca(OH)_2$] คัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์อิสระนี้สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีก ถ้ามีธาตุที่เหมาะสมมาร่วมทำปฏิกิริยากับซิลิก้า และอลูมิน่าในปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เถ้าถ่านหินเป็นสารปอซโซลาน คือเป็นวัสดุซึ่งตัวของมันเองไม่มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสาน แต่สามารถทำปฏิกิริยากับคัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์อิสระแล้วก่อตัวเป็นสารเชื่อมประสาน ดังนั้น เมื่อใส่วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมซิลิก้า (SiO_2) และอลูมิน่า (Al_2O_3) จากวัสดุปอซโซลาน จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับคัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์อิสระ ซึ่งเป็นสารประกอบที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงแรก โดยอาจเขียนเป็นสมการเคมีได้ ดังนี้

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \text{ ----------> } 3CaO\ 2SiO_2\ 3H_2O$$
$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \text{----------> } 3CaO\ 2Al_2O_3\ 3H_2O$$

สารประกอบคัลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรท $3CaO\ 2SiO_2\ 3H_2O$ และสารประกอบคัลเซี่ยมอลูมิเนตไฮเดรท $3CaO\ 2Al_2O_3\ 3H_2O$ เป็นสารประกอบที่ให้กำลังเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งจากการศึกษา

อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ และการผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วน เมื่อปฏิกิริยาเกิดช้าจะเป็นการลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลงด้วย

2.2.2 น้ำ (Water)

น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หรือใช้บ่มคอนกรีต ต้องเป็นน้ำที่สะอาด ไม่มีสารแขวนลอย เช่น มีความขุ่น (Turbidity limit) ไม่เกิน 2,000 ppm. น้ำสะอาดต้องปราศจากรสหวาน รสเค็ม หรือ รสกร่อย น้ำกระด้างย่อมมีเกลือกำมะถันละลายอยู่สูง น้ำจากบ่อบาดาล หรือ น้ำจากลำธาร โอกาสที่จะมีเกลือแร่คลอไรด์หรือเกลือซัลเฟต ละลายอยู่สูง แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าความเข้มข้นของเกลือเหล่านี้ผสมอยู่ในน้ำไม่เกิน 3,000 ppm. ถือว่าน้ำนั้นสามารถใช้บ่ม หรือผสมคอนกรีตได้

การใช้น้ำกระด้างที่มีเกลือซัลเฟตละลายอยู่ร้อยละ 1 (10,000 ppm.) ผสมคอนกรีต ไม่มีผลต่อกำลังของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน แต่เมื่ออายุ 1 ปี กำลังของคอนกรีตจะตกต่ำลงร้อยละ 10 ถ้าใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 5 แต่ถ้าใช้น้ำที่มีเกลือแกงละลายอยู่ร้อยละ 5 ผสมคอนกรีตด้วยซีเมนต์ธรรมดา กำลังของคอนกรีตจะต่ำกว่าค่าควบคุมร้อยละ 30 และถ้าคอนกรีตใช้น้ำที่มี Carbonated mineral ละลายอยู่สูง และมีเกลือซัลเฟต และ เกลือแกง (NaCl) ผสมอยู่เพียงเล็กน้อย จะทำให้กำลังของคอนกรีตตกลงถึงร้อยละ 80

2.2.3 มวลรวม

มวลรวมหรือวัสดุผสม (Aggregate) คือวัสดุเฉื่อย อันได้แก่ หิน ทราย กรวด ที่เป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีตเนื่องจากมวลรวมมีปริมาตร 70-80% ของปริมาณของส่วนผสมทั้งหมด มวลรวมเป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่มีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นในส่วนผสมของคอนกรีตจึงควรใช้ปริมาณมวลรวมให้พอเหมาะเพื่อที่จะให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดน้อยลง ประการต่อมา คุณสมบัติของมวลรวม จะช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน (Durability) และปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก (Volume Stability) รวมทั้งมวลรวมยังทำหน้าที่ต้านทานน้ำหนักที่กดลงบนคอนกรีตด้วย กำลังและคุณสมบัติทางกายภาพอีกหลายประการของมวลรวม มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ทั้งในสภาพที่เป็นคอนกรีตเหลวและคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ดังนั้นการเลือกใช้มวลรวมที่เหมาะสม จะช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้นด้วย มวลรวมที่ดีซึ่งจะส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานสูง ควรมีคุณสมบัติพื้นฐานที่ดีดังนี้ คือ ต้องมีความคงทนไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบในซีเมนต์ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดผลเสียต่อเสถียรภาพทางปริมาตรของคอนกรีต และมวลรวมจะต้องไม่มีสิ่งเจือปนที่มีผลเสียต่อกำลังและความคงตัวของซีเมนต์เพสต์ เราสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1) มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ได้แก่ หิน หรือ กรวดที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มม. ขึ้นไป หรือ ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4

2) มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ได้แก่ ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มม. หรือสามารถผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มม. หรือ ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

ส่วนที่มีขนาดเล็กกว่ามวลรวมละเอียดซึ่งมีอยู่จำนวนน้อยมากในส่วนผสมคอนกรีต สามารถแบ่งได้เป็น

Silt จะมีขนาดประมาณ 0.07 มิลลิเมตร

Clay จะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.02-0.06 มิลลิเมตร

มวลรวมที่ดีเมื่อผสมเป็นคอนกรีตแล้ว จะต้องทำให้คอนกรีตนั้นมีความสามารถเทได้ง่าย แข็งแรงทนทาน นอกจากนี้มวลรวมควรจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ

ความแข็งแกร่ง (Strength)

มวลรวมจะต้องมีความสามารถรับแรงกดได้ไม่น้อยกว่ากำลังของคอนกรีตที่ต้องการ ซึ่งปกติมวลรวมที่ใช้โดยทั่วไปจะมีความสามารถรับแรงกดได้สูงกว่าคอนกรีตมาก คือจะรับแรงกดได้ 700-3500 กก./ตร.ซม. ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของมวลรวมที่ใช้

ความต้านทานต่อแรงกระแทกและการเสียดสี (Impact and Abrasion Resistance)

ความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระแทก และการเสียดสีของมวลรวมมักจะถูกใช้เป็นตัวชี้บอกถึงคุณภาพของมวลรวม คุณสมบัตินี้มีความสำคัญมากสำหรับมวลรวมที่ใช้ผสมทำคอนกรีตที่จะต้องถูกกระทำจากการกระแทกหรือขัดสี เช่น งานผิวถนน, พื้นโรงงาน, พื้นสนามบิน เป็นต้น ดังนี้ มวลรวมที่ใช้ได้ดีควรมีความแข็งแรง, เนื้อแน่น ปราศจากอนุภาคที่อ่อนนุ่มหรือเป็นรูพรุนหรือแตกละเอียดได้ง่าย

ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemical Stability)

มวลรวมจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์ หรือกับสิ่งแวดล้อมภายนอก ในบางพื้นที่มวลรวมบางประเภทจะทำปฏิกิริยากับด่าง (Alkalis) ในปูนซีเมนต์ เกิดเป็นวุ้นและขยายตัวก่อให้เกิดรอยร้าวโดยทั่วไปในคอนกรีต ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า Alkalis-Aggregate Reaction (AAR)

รูปร่างและลักษณะผิว (Particle Shape and Surface Texture)

รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมจะมีอิทธิพลคุณสมบัติของคอนกรีตสด มากกว่าคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว มวลรวมที่มีผิวหยาบหรือมีรูปร่างแบนและยาว จะต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์มากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรูปร่างกลมหรือเหลี่ยมที่ระดับความสามารถเทได้ (Workability) เดียวกัน ตามมาตรฐานอังกฤษ มีการกำหนดการทดสอบรูปร่างของมวลรวมไว้ 2 ประการ คือ

1) การทดสอบความแบน (Flakiness) ซึ่งคือ อัตราส่วนของความกว้างต่อความหนาของมวลรวม

2) การทดสอบความยาวเรียว (Elongate) ซึ่งคือ อัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของมวลรวม

ส่วนคละ (Gradation)

ส่วนคละของมวลรวมจะมีผลต่อความสามารถเทได้ และปริมาณส่วนผสมของปูนซีเมนต์ในคอนกรีต การทำคอนกรีตที่ดีนั้น แต่ละก้อนของมวลรวมจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ ไม่ว่ามวลรวมนั้นจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ตาม นอกจากนี้ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม

เมื่อนำมาผสมรวมกันแล้ว มวลรวมที่ขนาดเล็กกว่าจะต้องบรรจุอยู่ในช่องว่างระหว่างก้อนของมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่าให้มากที่สุด ซึ่งจะมีผลทำให้ประหยัดซีเมนต์เพสต์ที่จะใช้ยึดมวลรวมเข้าด้วยกัน รวมทั้งอุดช่องว่างระหว่างมวลรวม ดังนั้นการใช้มวลรวมที่ส่วนขนาดคละที่เหมาะสมจึงทำให้ลดปริมาณซีเมนต์เพสต์ลง ทำให้ประหยัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์ลงได้

ขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมที่ใช้ (Maximum Size of Aggregate)

ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้ พิจารณาได้จากการทำการทดสอบหาส่วนคละของมวลรวม แล้วดูผลจากเปอร์เซ็นต์ที่ค้างว่าตะแกรงร่อนใหญ่ (หยาบ) ที่สุดอันใดมีเปอร์เซ็นต์ของมวลรวมที่ค้างมากกว่าหรือเท่ากับ 15% ให้นับขนาดตะแกรงอันที่ใหญ่กว่านั้นขึ้นไปอีก 1 ชั้น เป็นขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมนั้น

ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้มีผลโดยตรงกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ต้องการ และขนาดคละของวัสดุผสม กล่าวคือ มวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวโดยรวมน้อยกว่ามวลรวมที่ขนาดเล็กเมื่อน้ำหนักของมวลรวมเท่ากัน ดังนั้นมวลรวมขนาดใหญ่จึงต้องการปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์น้อยกว่า เพื่อให้มีความสามารถในการเทได้เท่ากัน หรือถ้าใช้ปริมาณซีเมนต์และค่ายุบตัวเท่ากัน และกำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นถ้าใช้มวลรวมขนาดใหญ่ขึ้น เพราะสามารถลดน้ำหรือลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์นั่นเอง

2.2.4 สารผสมเพิ่มในคอนกรีต

สารผสมเพิ่มที่ใช้ในการผสมกับคอนกรีต หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สารผสมร่วม (Admixture) หมายถึง สารซึ่งใช้ผสมเพิ่มเข้าไปในคอนกรีตในช่วงเวลา หรือระยะเวลาที่กำลังทำการผสมมวลรวมกับซีเมนต์และน้ำ เพื่อให้ได้คอนกรีต ที่มีคุณสมบัติที่ เหมาะสมกับความต้องการ ทั้งในสภาพที่เป็นคอนกรีตสดและเป็นคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

สารผสมเพิ่ม หรือสารผสมร่วม (Admixture) มีความหมายต่างกับคำว่า สารเติม (Additive) ซึ่งเป็นสารที่ผสมเข้าไปในปูนซีเมนต์ระหว่างกรรมวิธีการผลิต เพื่อช่วยในการผลิต หรือเพื่อต้องการทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่พิเศษ ตัวอย่างเช่น การผสมสารยิบซั่ม เพื่อให้ปูนซีเมนต์มีระยะเวลาก่อตัวช้าลง หรือ ผสมสารคัลเซียมซัลเฟต เพื่อให้คอนกรีตมีความต้านทานซัลเฟตได้ดี เป็นต้น ในปัจจุบันได้มีการนำสารผสมเพิ่มมาใช้กันอย่างกว้างขวางในการก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศต่างๆ ในทวีปยุโรป สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น ซึ่งในการพัฒนาคอนกรีตคุณภาพสูงนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องใช้สารผสมเพิ่ม ร่วมในการปรับปรุงคุณภาพคอนกรีต โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดได้แก่ สารเคมีผสมคอนกรีต (Chemical Admixture) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำที่เติมลงไป ในส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสม ควบคุมการก่อตัวและการแข็งตัว ปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตเหลว และสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral Admixture) มีลักษณะเป็นผงละเอียด ใช้ปรับปรุงความสามารถในการใช้งาน เพิ่มความคงทนทำให้ คอนกรีตมีคุณสมบัติในการก่อตัวดีขึ้น และยังสามารถใช้ทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ได้บางส่วน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารลดปริมาณน้ำอย่างสูงและหน่วงการก่อตัว

ตามมาตราฐาน ASTM C 494 Type G, มอก.733-2530 ร่วมกับ ซิลิก้าฟูม (Silica Fume) และ ขี้เถ้าลอยแม่เมาะ (Fly Ash) เพื่อพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความสามารถเทได้ของคอนกรีตคุณภาพสูง เพิ่มเติมจากการปรับปรุงขนาดคละของมวลรวม

2.2.4.1 สารเคมีผสมคอนกรีต การแบ่งประเภทของสารผสมเพิ่มที่ใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตตามข้อกำหนดของ ASTM C 494 (Standard Specification for Chemical Admixture for Concrete) ได้มีการแบ่งประเภทตามวัตถุประสงค์ในการใช้งานต่างๆ ออกเป็น 7 ประเภทด้วยกันคือ

1. Type A สารผสมเพิ่มลดปริมาณน้ำ (Water-Reducing Admixtures)
2. Type B สารผสมเพิ่มหน่วงเวลาการก่อตัว (Retarding Admixtures)
3. Type C สารผสมเพิ่มเพื่อเร่งการก่อตัว (Accelerating Admixtures)
4. Type D สารผสมเพิ่มเพื่อลดปริมาณน้ำและหน่วงการก่อตัว (Water-Reducing and Retarding Admixtures)
5. Type E สารผสมเพิ่มเพื่อลดปริมาณน้ำและเร่งการก่อตัว (Water-Reducing and Accelerating Admixtures)
6. Type F สารผสมเพิ่มเพื่อลดปริมาณน้ำในอัตราสูง (Water-Reducing High Range Admixtures)
7. TypeG สารผสมเพิ่มเพื่อลดปริมาณน้ำในอัตราสูง และหน่วงการก่อตัว (Water Reducing High Range and Retarding Admixtures)

การจำแนกประเภทของสารผสมเพิ่ม ยังสามารถแบ่งประเภทออกเป็นข้อย่อยๆอีก ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารผสมเพิ่มในแต่ละประเภท ในส่วนของงานวิจัยนี้ได้ใช้ สารเคมีลดปริมาณน้ำในอัตราสูงและหน่วงการก่อตัว ตามมาตรฐาน ASTM C 494 TYPE G และตามมาตราฐาน มอก. 733-2530 หรือ เรียกในการใช้งานว่าน้ำยา Superplasticizer เป็นสารที่เติมเพื่อให้ คอนกรีตมีการไหลลื่นสูง ใช้เติมเพื่อลดปริมาณน้ำได้มากกว่าสารลดปริมาณน้ำธรรมดาถึง 10 เท่าโดยไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการชลอการก่อตัวของซีเมนต์ ซึ่งสารลดปริมาณน้ำในอัตราสูงนี้จัดเป็นสารเคมีชนิดใหม่เริ่มใช้ในประเทศอังกฤษ ครั้งแรกเมื่อปี 1972 ส่วนในประเทศญี่ปุ่นได้มีการพัฒนาเกี่ยวกับสารประเภทนี้ตั้งแต่ปี 1960 เป็นต้นมา มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในยุโรป ญี่ปุ่น และอเมริกา สำหรับงานโครงสร้างทุกชนิดรวมทั้ง อาคาร สะพาน โครงสร้างทางทะเล ตลอดจนทั้งในโรงงานอุตสาหกรรม คอนกรีตอัดแรง และคอนกรีตสำเร็จรูปต่างๆ ซึ่งสารเคมีที่ใช้เป็นสารลดปริมาณน้ำในอัตราสูงนั้นแบ่งออกตามชนิดของสารเคมีได้เป็น 2 ชนิด คือ

1 ซัลโฟเนท แนพทาลีนฟอร์มมาลดีไฮด์ คอนเดนเซทส์ (Sulphonated Naphthalene Formaldehyde Condensates) เป็นสารเคมีที่ได้จากกรรมวิธีทางเคมีโดยใช้ แนพทาลีน (Napthalene, $C_{10}H_8$) ผ่านซัลโฟเนท (Sulphonation) ด้วยกรดซัลฟูริค (H_2,SO_4) จะได้สารประกอบของแนพทาลีน

กับ กรดซัลโฟนิค (SO_3H) ต่อมานำสารที่ได้มาทำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde,CH_2O) ได้สารประกอบชนิดใหม่ แล้วนำไปทำการแปรสภาพโดยวิธีโพลิเมอร์ (Polymerization) แต่เนื่องจากสารประกอบชนิดใหม่นี้มีสภาพเป็นกรด ดังนั้นกลุ่มของกรดซัลโฟนิก จึงถูกทำลายความเป็นกรด (Neutralization) ด้วย โซเดี่ยมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ได้สารประกอบของเกลือ (Sulphonated Naphthalene Formaldehyde Condensates)

2 ซัลโฟเนทเมลาไมน์ ฟอร์มาลดีไฮด์ คอนเดนเซทส์ (Sulphonated Melamine Formaldhyde Condensates) เป็นสารเคมีที่ได้จากกรรมวิธีทางเคมี โดยใช้เมลาไมน์ (Melamine,$C_3 H_6 N_6$) ทำปฏิกิริยา กับฟอร์มาลดีไฮด์ ได้สารประกอบของ ไตรเมลิรอลเมลาไมน์ (Trimethylol Melamine) แล้วนำไปทำปฏิกิริยาต่อกับ โซเดี่ยมไบซัลไฟท์ (Sodium Bisulphite,Na HSO_3) ได้สารประกอบชนิดใหม่แล้วจึงนำไปทำการแปรสภาพ โดยวิธีโพลิเมอร์ ได้เป็นสารประกอบของเกลือ (Sulphonated Meldmine Formaldehyde Condensates)

สารเคมีดังกล่าวมีคุณสมบัติทำให้เกิดการลอยตัวของมวลซีเมนต์ (Cement Dispersion Characteristic) คล้ายกับพฤติกรรมของสารลดปริมาณน้ำปกติ แต่ว่ามีความสามารถในการกระจายมวลซีเมนต์ได้มากกว่าอย่างสม่ำเสมอกว่า โดยประโยชน์ของสารลดปริมาณน้ำในอัตราสูง ก็เพื่อผลิตคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวสูงถึง 20 ซม. หรือมากกว่า และเพื่อผลิตคอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete) ซึ่งทำให้ลดปริมาณน้ำได้ถึง 30% ในขณะที่ยังคงรักษาความสามารถในการเทได้คงเดิม หรือทำให้สามารถลดปริมาณซีเมนต์ที่ต้องใช้ลงได้ประมาณ 10-20% โดยที่ยังคงรักษาความสามารถในการเทและกำลังอัดของคอนกรีตได้เท่าเดิม

2.2.4.2 วัสดุผสมเพิ่ม

ในการปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งใน คอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลว เช่น ความสามารถเทได้ และ คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น กำลังอัด และ ความทนทานของคอนกรีต โดยได้มีการนำวัสดุอื่นนอกจากสารเคมีผสมเพิ่มเข้ามาร่วมผสมด้วย สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุผสมเพิ่มอัน ได้แก่

1. ขี้เถ้าลอย (Pulverized Fuel Ash , PFA)

ขี้เถ้าลอย PFA หรือ Fly Ash เป็นวัสดุมีลักษณะเป็นผง เม็ดกลมมีความละเอียด ซึ่งลอยตัวขึ้นมาพร้อมกับ อากาศร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินที่บดละเอียด (Pulverized Coal) ในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และจะถูกจับด้วยเครื่องดักจับ (Precipitator) เพื่อนำไปเก็บไว้เพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ ขี้เถ้าลอยจากแหล่งแม่เมาะจังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นขี้เถ้าลอย(Fly Ash) ที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนท์ ซึ่งบดละเอียด และส่งเข้าไปในเตาเผาไหม้ที่อากาศเพียงพอ การเผาไหม้จะเกิดได้อย่างสมบูรณ์ ความร้อนในเตาเผาจะช่วยให้ปฏิกิริยาทางเคมีของ การเผาไหม้เปลี่ยนแปลงสภาพของแร่ธาตุ (Mineral Matter) ที่มีอยู่ให้เป็นแร่ธาตุในรูปของ ออกไซด์ของโลหะหลายชนิดที่ซับซ้อน เช่น ดินโคลน (Shale)

ดินเหนียว (clay) สารประกอบกำมะถัน สารประกอบคาร์บอเนต โดยสรุปเถ้าลิกไนต์ที่ได้จะมี 2 สภาพคือ

เถ้าลอย (Fly Ash, Pulverized Fuel Ash, Dry Ash) เป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกไปสู่ปล่องควัน และถูกจับไว้ใน (Electrostatic Pricipitator) แล้วถูกรวบรวมไว้ใน Ash hopper

เถ้าหนัก (Bottom Ash, Wet Ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการปะทะของอนุภาคเถ้าในบริเวณที่เกิดการสันดาป (Combustion Zone) อุณหภูมิบริเวณนี้สูงพอที่จะหลอมเถ้าที่จะปะทะกัน เป็นเม็ดหรือก้อนตกลงสู่ก้นเตา บางส่วนของเถ้าจะปะทะกับผนังเตาและหลอมติดกันรวมตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ เรียกว่า slag เมื่อรวมตัวกันมากเข้าจนมีน้ำหนักมากก็จะหล่นลงสู่ก้นเตา

ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเถ้าลิกไนต์นั้นเป็นการยากที่จะแยกธาตุแต่ละชนิดให้ออกมาเป็นปริมาณหรือธาตุเดี่ยวๆ โดยอาศัยวิธีทางกายภาพ ดังนั้นจึงต้องหาธาตุโดยอาศัยวิธีทางเคมี (Ash Analysis) ในรูปร้อยละของอ๊อกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

ส่วนประกอบทางเคมี (%)	เถ้าลอยแม่เมาะ	ASTM C618 CLASS C	PORTLAND CEMENT TYPE I
$Si\ O_2$	45.13	50	20.20
$Fe_2\ O_3$	7.46	50	2.92
$AI_2\ O_3$	9.20	50	5.42
Ca O	20.50	-	63.82
Mg O	0.84	5	1.50
SO_3	5.76	5	2.55
$Na_2\ O$	0.82	-	0.26
$K_2\ O$	1.14	-	0.46

ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของขี้เถ้าลอยได้แก่ SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, Cao,Mgo, Na_2o, K_2O, So_3, และ C ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีความแตกต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งที่มาของขี้เถ้าลอย

เนื่องจากขี้เถ้าลอยเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาถ่านหิน และถ่านหินที่ใช้กันในแถบยุโรปและ อเมริกา และญี่ปุ่นเป็นถ่านหินคุณภาพดี ให้ความร้อนสูง ส่วนถ่านหินในประเทศไทยเป็นถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งให้ความร้อนต่ำกว่า ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ได้แบ่งประเภทของขี้เถ้าลอย ตามปริมาณของ SiO_2+ $Al_2\ O_3$+$Fe_2\ O_3$ ไว้ดังนี้

ขี้เถ้าลอย Class C จะมีส่วนประกอบของ SiO_2+ $Al_2\ O_3$+$Fe_2\ O_3$ อยู่ปริมาณไม่ต่ำกว่า 50%

ขี้เถ้าลอย Class F จะมีส่วนประกอบของ SiO_2+ Al_2O_3+Fe_2O_3 อยู่ปริมาณไม่ต่ำกว่า 70 % นอกจากนี้ความแตกต่างระหว่างขี้เถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด คือ ขี้เถ้าลอย Class F ได้จากการเผาถ่านหินประเภท แอนทราไซด์ หรือ บิทูมินัส ซึ่งถ่านหินทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นถ่านหินที่ใช้กันมาก ในแถบยุโรป อเมริกา และญี่ปุ่น เป็นถ่านหิน เกรดดี คือให้พลังงานความร้อนมาก เพราะมีปริมาณคาร์บอนสูง มีความแข็ง และเป็นถ่านหินที่มีอายุมากกว่าถ่านหินประเภทอื่น ส่วนขี้เถ้าลอย Class C ได้จากการเผาถ่านหินประเภท ซับบิทูมินัส หรือ ลิกไนต์ เป็นถ่านหิน เกรดต่ำ มีปริมาณคาร์บอนน้อย โดย ขี้เถ้าลอย Class F จะมีปริมาณคาร์บอน หลงเหลืออยู่มาก และอาจมีปริมาณสารอินทรีย์อยู่ด้วย ในขณะที่ขี้เถ้าลอย Class C จะมีปริมาณสารทั้งสองเหลืออยู่น้อยกว่า แต่จะมี CaO ในปริมาณเกินกว่า 10 % จึงจัดอยู่ในประเภทสารปอซโซลาน และ สารเชื่อมประสาน เพราะขี้เถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูง จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับซิลิกาและอลูมินาในขี้เถ้าลอยนั้นเองได้ ส่วนขี้เถ้าลอย Class F เป็นสารปอซโซลานแต่เพียงอย่างเดียวจึงอาจสามารถ แบ่งขี้เถ้าลอย ออกเป็น 2 ชนิด ตามปริมาณ คัลเซียมในขี้เถ้าลอย คือ ประเภทแรกจะมีปริมาณ CaO น้อยกว่า 5 % มักจะเป็นขี้เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินประเภท แอนทราไซด์ และ บิทูมินัส ประเภทที่สองจะมีปริมาณ CaO ประมาณ 15-35 % มักจะเป็นขี้เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินประเภท ซับบิทูมินัส และ ลิกไนต์

ขี้เถ้าลอยลิกไนต์ส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน(Pozzolan) ตาม ASTM C595 และมีสภาพป่นเป็นฝุ่นเมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำ และ CaO ส่วนที่เป็น Free lime จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น $Ca(OH)_2$ ซึ่งสารนี้จะทำปฏิกิริยาต่อไปกับ SiO_2 และ Al_2O_3 ในขี้เถ้าลอย และเกิดเป็นสารประกอบใหม่ คือ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(Calcium silicate hydrate) และ คัลเซียมอาลูมิเนทไฮเดรต(Calcium aluminate hydrate) ซึ่งมีหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) เบากว่าดินทั่วไปและมีคุณสมบัติเชื่อมเกาะ (Cementitious) เพิ่มขึ้นตามเวลา (Age - Hardening Property)

ดังสมการ

$$CaO+H_2O \text{ ----------> } Ca(OH)_2$$

$$3Ca(OH)_2+2SiO_2 \text{ ----------> } 3CaO.2SiO_2.3H_2O$$

$$3Ca(OH)_2+2Al_2O_3 \text{ ----------> } 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$$

การเพิ่มขี้เถ้าลอย (Fly Ash) ลงในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต สามารถพิจารณาได้ใน 3 ลักษณะ คือ

การแทนที่ (Replacement Method) โดยการใช้ขี้เถ้าลอยผสมแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง อาจกระทำได้โดยปริมาตรหรือน้ำหนัก แต่การแทนที่ซีเมนต์โดยน้ำหนักจะได้คอนกรีตที่มีกำลังสูงกว่าการแทนที่โดยปริมาตร และเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต ที่ได้จากซีเมนต์ล้วนจะพบว่า กำลังของคอนกรีต ที่ใช้

ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ บางส่วนทั้งโดยปริมาตรและโดยน้ำหนักจะให้ กำลังต่ำกว่าคอนกรีตที่ได้จากปูนซีเมนต์ล้วน

การผสมเพิ่ม (Addition Method) โดยการใช้ขี้เถ้าลอยผสมเพิ่มในซีเมนต์วิธีการนี้ มักจะนิยมใช้เพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติความสามารถทำงานได้ ลดการเยิ้มของคอนกรีต คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยโดยวิธีนี้มักจะให้กำลังสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ทั้งนี้เพราะขี้เถ้าลอยเป็นส่วนเพิ่มจากซีเมนต์ ซึ่งจะช่วยเพิ่มกำลังโดยเกิดจากพฤติกรรมของสารปอซโซลาน

การแทนที่และการผสมเพิ่มรวมกัน (Replacement-addition Method) โดยพิจารณาการปรับปรุงกำลังของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยให้ดีขึ้นกว่า การใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และยังต้องการจะประหยัดการใช้ปริมาณซีเมนต์เพื่อลดราคาต้นทุนการผลิตคอนกรีตให้ถูกลง จึงใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ให้ปริมาณที่มากกว่าปูนซีเมนต์ที่ลดลง เพื่อเร่งการเพิ่มกำลังคอนกรีตโดยปฏิกิริยาปอซโซลาน

2. ซิลิก้าฟูม (Silica Fume ,SF หรือ Microsilica ,MS)

ซิลิก้าฟูมเป็นของเหลือ (By product) จากขบวนการผลิตโลหะซิลิกอน (Silicon Metal) หรือ Ferrosilicon Alloy เป็นผลผลิตจากการหลอมวัตถุดิบ อันได้แก่ หินควอร์ต ถ่านและเหล็ก หลอมรวมกันในอัตราส่วนที่กำหนด เมื่อวัตถุดิบนี้ได้รับความร้อน เกิดการหลอมตัวจะเกิดไอของซิลิกอน โมโนออกไซด์ลอยตัวขึ้น ไอเหล่านี้จะถูกดักจับไว้และทำให้เย็นตัวได้เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากของ Amorphous Silica โดยมีขนาดเล็กกว่า เม็ดซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า หลังจากนั้นจะถูกส่งไปบรรจุในไซโลและแยกบรรจุออกจำหน่าย คุณสมบัติของซิลิก้าฟูมจะแตกต่างจากขี้เถ้าลอย คือ ซิลิก้าฟูมในแหล่งเดียวกันจะมีความแปรผันด้านองค์ประกอบทางเคมีน้อยมาก เพราะวัตถุดิบในขบวนการผลิตค่อนข้างบริสุทธิ์ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของ ตัวอย่างซิลิก้าฟูม จากแหล่งต่าง ๆ กัน พบว่า ซิลิก้าฟูม มีปริมาณ SiO_2 อยู่ประมาณ 90 % ขึ้นไป

ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของซิลิก้าฟูม จากแหล่งต่างกัน

Silica Fumes		1	2	3	4	5	6
Specific Areas	(BET) m^2/g	14.2	22.3	21.6	22.2	22.2	19.3
	SiO_2	91.50	97.35	88.75	92.83	96.50	93.30
	Al_2O_3	5.78	0.03	0.08	0.02	0.03	0.02
	Fe_2O_3	0.16	0.12	1.60	0.19	0.06	0.30
	MgO	0.03	0.19	1.48	0.54	0.24	0.38
Chemical	CaO	0.08	0.10	0.66	0.16	0.01	0.12
Composition	Na_2O	0.12	0.12	0.71	0.24	0.26	0.76
(%)	K_2O	0.08	0.23	2.41	1.76	0.47	1.40
	ZrO_2	1.10	-	-	-	-	-
	Alkalies	0.20	0.35	3.12	2.00	0.73	2.16
	Carbon	-	1.06	1.59	2.59	0.89	2.75

จากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะทำให้ได้สารประกอบสองชนิดคือ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Hydroxide $Ca(OH)_2$ ดังสมการ

$$CEMENT + H_2O \text{ ----------> } CSH + Ca(OH)_2$$

CSH จะทำหน้าที่ยึดเกาะให้ส่วนผสมคอนกรีตจับตัวกัน ส่วน $Ca(OH)_2$ หรือ Free Lime เป็นส่วนเหลือจากการทำปฏิกิริยา ซึ่งไม่มีประโยชน์ต่อคอนกรีตซึ่งมีอยู่ประมาณ 20-25% โดยน้ำหนักของซีเมนต์เพสท์นั้น เมื่อผสม ซิลิก้าฟูม ซึ่งมี SiO_2 อยู่ในปริมาณสูงเข้าไปในคอนกรีต SiO_2 จะทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ที่เหลือร่วมกับ H_2O ทำให้ได้ปริมาณ CALCIUM SILICATE เพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้น ดังสมการ

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \text{ ----------> } CSH$$

ซึ่งจากผลการวิจัย [22] พบว่าปริมาณการใช้ ซิลิก้าฟูม ที่ให้คุณสมบัติของคอนกรีตที่ดีที่สุด อยู่ระหว่าง 20-25% ของน้ำหนักซีเมนต์ แต่ในทางปฏิบัตินั้นพบว่าอัตราการใช้ซิลิก้าฟูมในปริมาณ 10-15% ของน้ำหนักซีเมนต์ จะเหมาะสมต่อการทำงานจริง โดยเป็นการประหยัดต้นทุนในการผลิต โดยให้คุณภาพของคอนกรีต

เป็นที่น่าพอใจ

ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 และสารปอซโซลาน

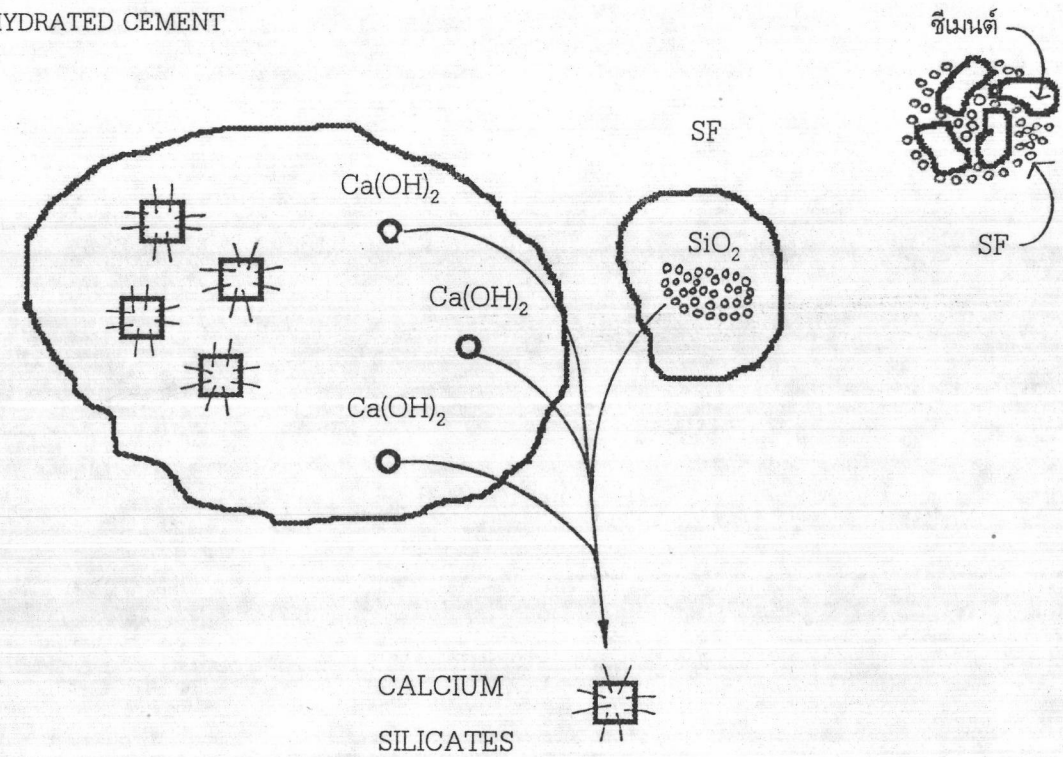
ส่วนประกอบทางเคมี (%)	Portland Cement	ซิลิก้าฟูม SF	ขี้เถ้าลอย PFA	สแลค SLAG
CaO	60 - 67	0.1 - 0.6	1 - 5	32 - 48
$Si O_2$	17 - 25	86 - 96	40 - 55	28 - 40
$Al_2 O_3$	2 - 8	0.2 - 2.2	20 - 30	10 - 22
$Fe_2 O_3$	0 - 6	0.3 - 2.2	5 - 10	3 - 5
Mg O	0.1 - 4	0.3 - 3.5	1 - 4	2 - 16
SO_3	1 - 4	0.4 - 1.5	0.4 - 2	2 - 4
$Na_2 O$	0.1 - 1	0.8 - 1.8	0.1 - 2	0.2 - 1.2
$K_2 O$	0.2 - 1.5	1.5 - 2.5	1 - 5	0.3
C	-	0.5 - 2.5	1 - 6	-

ตารางที่ 2.5 ลักษณะทางกายภาพของ Portland Cement และ Pozzolans

คุณสมบัติ	Portland Cement	ซิลิก้าฟูม SF	ขี้เถ้าลอย PFA	สแลค SLAG
ความถ่วงจำเพาะ (kg/m^3)	3150	2300	2100	2900
ความหนาแน่น (kg/m^3)	1200 - 1400	500 - 700	900 - 1000	1000 - 1200
SURFACE AREA (m^2/kg)	200 - 500	15000 - 20000	200 - 600	200 - 500

องค์ประกอบทางเคมีของ ซิลิก้าฟูม แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบกับวัสดุผสมเพิ่มชนิดอื่น พบว่ามีปริมาณ SiO_2 ในสัดส่วนที่สูงมาก และจากตารางที่ 2.5 ซีเมนต์,ขี้เถ้าลอย และ สแลค ที่เหมาะสม

สำหรับผสมคอนกรีตจะมีความละเอียดใกล้เคียงกัน (จากค่า Surface Area) แต่ ซิลิก้าฟูม จะมีความละเอียดสูงมาก ซึ่งจะทำให้ต้องการปริมาณน้ำ หรือสารลดปริมาณน้ำในจำนวนที่มากกว่าเพื่อเพิ่มค่าความยุบตัว และจากค่าความถ่วงจำเพาะที่แสดง ถ้านำ ซิลิก้าฟูม ,ขี้เถ้าลอย หรือ สแลค มาผสมกับ ซีเมนต์ โดยน้ำหนักจะเป็นการเพิ่มปริมาตรของส่วนละเอียด เมื่อเทียบกับซีเมนต์ ที่น้ำหนักเท่ากัน



รูปที่ 2.1 แสดงการทำปฏิกิริยาของซิลิก้าฟูม กับ $Ca(OH)_2$ และการแทรกตัวของซิลิก้าฟูม ในช่องว่างของซีเมนต์

เนื่องจากซิลิก้าฟูมมีความละเอียดสูงมาก ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วมาก ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดทั้งช่วงต้น และช่วงปลายเป็นไปได้เร็วกว่าคอนกรีตทั่วไป นอกจากปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวในตอนต้นแล้ว ซิลิก้าฟูมยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต ด้วยผลทางกายภาพอีกด้านหนึ่งกล่าวคือ ซิลิก้าฟูมเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นมันจะสามารถไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ (Microfiller Effect) ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นสูงมาก

2.3 คุณสมบัติของคอนกรีต

คอนกรีตคุณภาพสูงมีคุณสมบัติที่ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาทั่วไปในด้านต่างๆ ซึ่งจะสามารถจำแนกออกได้ในสองสภาวะ คือ สภาพที่เป็นคอนกรีตสด (Fresh State) และในสภาพที่เป็นคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (Harden State) คุณสมบัติที่ดีขึ้นดังกล่าวที่เห็นได้อย่างชัดเจน ได้แก่ ความสามารถทำงานได้ (Workability) ดีขึ้น, ลดปัญหาคอนกรีตเป็นโพรงหรือมีรูพรุน, มีกำลังรับแรงอัดสูง เช่นเดียวกับคอนกรีตกำลังสูง, มีความทนทาน, ต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้ดี เป็นต้น

2.3.1 ลักษณะของคอนกรีตสด

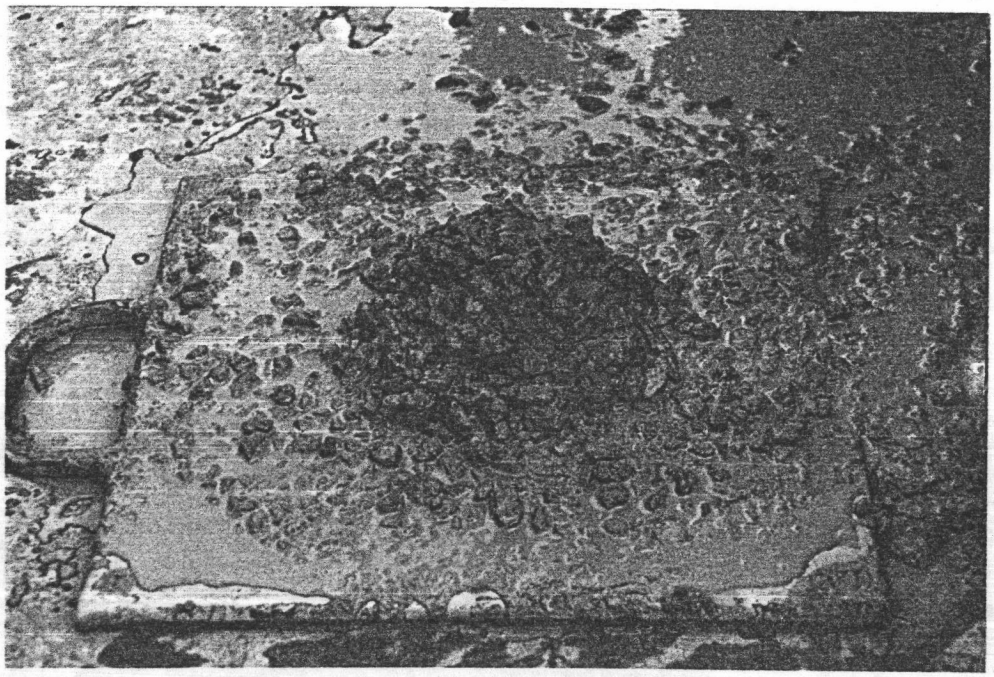
คอนกรีตสดประกอบไปด้วยส่วนผสมของปูนซีเมนต์ น้ำ มวลรวม และสารผสมเพิ่ม โดยวัสดุมวลรวมหลักคือ หิน, ทราย จะเป็นวัสดุเฉื่อย (ไม่ทำปฏิกิริยาเคมี) มีอยู่ประมาณ 60-80% ของปริมาตรคอนกรีต ซึ่งสามารถช่วยลดปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมลงได้มาก ช่วยให้ลดอัตราการหดตัว (Shrinkage) และการคืบ (Creep) ของคอนกรีตในช่วงที่เป็นคอนกรีตแข็ง ส่วนผสมของตัวเชื่อมประสานได้แก่ ส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำรวมเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Paste) ในคอนกรีตสด ซีเมนต์เพสต์จะมีบทบาทต่อคอนกรีต คือ ซีเมนต์เพสต์จะแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของมวลรวมและเป็นตัวแยกมวลรวมออกจากกัน แต่ยังคงให้มวลรวมแพร่กระจายอยู่ในเนื้อเพสต์ อีกทั้งซีเมนต์เพสต์จะทำหน้าที่เป็นวัสดุหล่อลื่นระหว่างมวลรวม ทำให้คอนกรีตสดอยู่ในสภาวะพลาสติกได้ โดยคุณสมบัติของคอนกรีตสดจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและปริมาณของเพสต์

การลดปริมาณเพสต์ลงจะทำให้ลดการแพร่กระจายของมวลรวม เป็นการเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างมวลรวมทำให้คอนกรีตสดมีความหนืดสูง แต่ถ้าเพิ่มปริมาณเพสต์จะได้คอนกรีตที่เหลวแต่ยึดเกาะกันดี ในกรณีที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์ต่ำกว่าปริมาณที่ป้องกันการแยกตัวของมวลรวมจะทำให้คอนกรีตสดที่ได้กระด้าง และเกิดการแยกตัวได้ง่าย

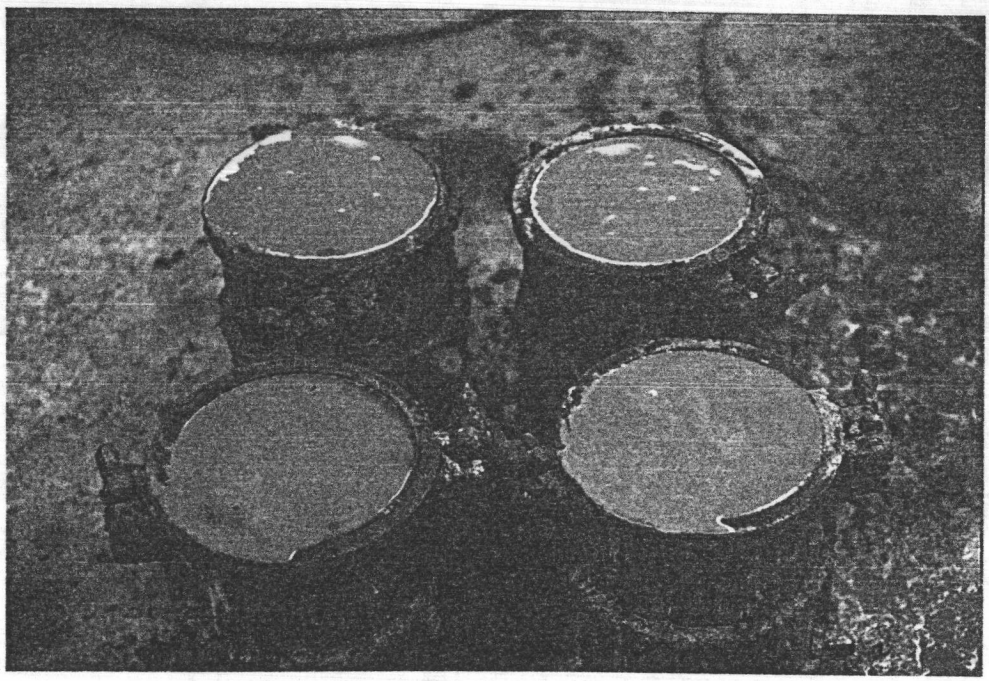
ดังนั้นปริมาณเพสต์ที่เหมาะสมในคอนกรีตสดจะช่วยให้ได้คุณสมบัติคอนกรีตสดที่ดี นอกจากนั้นยังมีปัจจัยอื่นอีก อันได้แก่ ส่วนประกอบในซีเมนต์เพสต์ ถ้าปริมาณน้ำที่ใช้น้อยจะมีความหนืดสูง เพสต์ลักษณะนี้จะสามารถแพร่กระจายมวลรวมได้ แต่ไม่สามารถทำให้เกาะรวมตัวกันอยู่ได้ จึงทำให้การหล่อลื่นมีน้อย คอนกรีตลักษณะนี้กระด้าง ความหนืดสูง ถ้าเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้นจะทำให้เพสต์อ่อนนุ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณน้ำมากจนเกิดไปจะทำให้เพสต์ไม่สามารถแพร่กระจายมวลรวมและยึดเกาะให้รวมตัวกันอยู่ได้ ทำให้เกิดการแยกตัว (Segregation) และการเยิ้ม (Bleeding) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3

การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตคุณภาพสูงนั้น ตามแนวทางการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตของคอนกรีตคุณภาพสูง จำเป็นต้องรักษาอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (W/C Ratio) ให้มีค่าต่ำเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตให้มีค่าสูง ดังนั้นปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในซีเมนต์เพสต์จึงมีค่าน้อย คอนกรีตที่ได้จึงมีลักษณะกระด้างและมีความหนืดสูง ในการผลิตคอนกรีตคุณภาพสูงในปัจจุบันจึงได้มีการนำ สารผสมเพิ่มลดปริมาณน้ำอย่างมาก (Superplasticizer) เข้ามาใช้ผสมเพื่อเพิ่มความข้นเหลวของคอนกรีตสด โดย

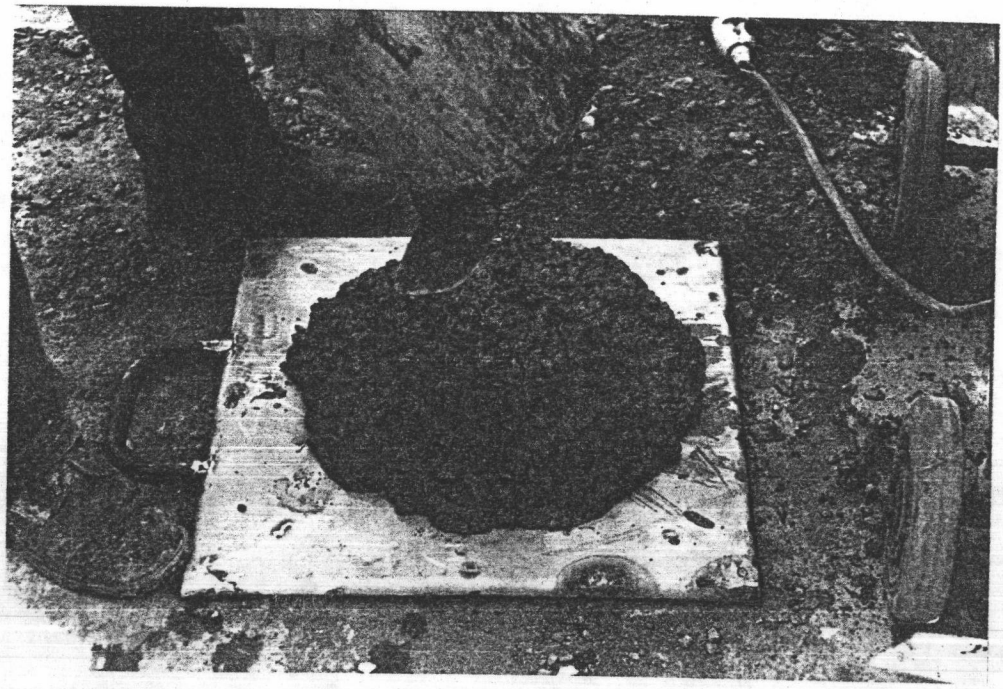
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



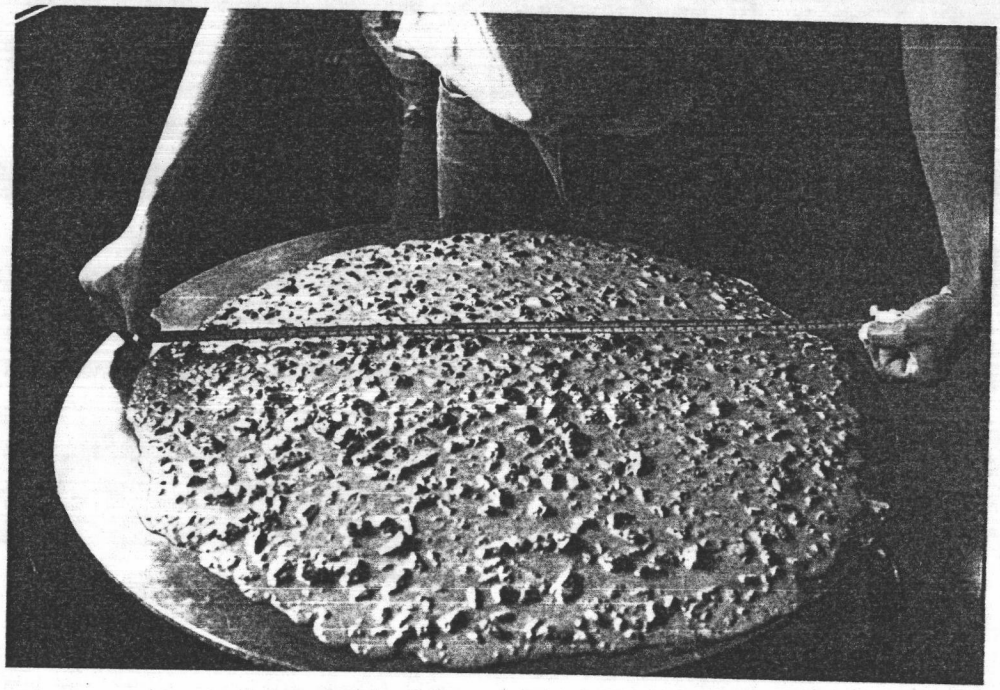
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของคอนกรีตที่เกิดการแยกตัว



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการเยิ้มของน้ำในคอนกรีต



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของคอนกรีตคุณภาพสูง ค่าความยุบตัวประมาณ 21 ซม.



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของคอนกรีตคุณภาพสูง ค่าการไหลแผ่ประมาณ 65 ซม.

ผลทางเคมีของสารลดปริมาณน้ำอย่างมาก จะช่วยในการกระจายอนุภาคของซีเมนต์ ทำให้ช่วยลดแรงดึงดูดที่เกิดขึ้น เนื่องจากแรงระหว่างโมเลกุลและช่วยเพิ่มแรงผลักระหว่างอนุภาคของเพสต์ ทำให้คอนกรีตมีความข้นเหลวเพิ่มขึ้น

2.3.2 ความสามารถเทได้ (Workability)

ความสามารถเทได้ เป็นคุณสมบัติที่ต้องการอย่างหนึ่งของคอนกรีตสด ก็คือผลรวมของพลังงานหรือกำลังงานที่จะเอาชนะแรงเสียดทานในระหว่างอนุภาคที่จะก่อให้เกิดการอัดแน่นของคอนกรีตอย่างสมบูรณ์ หมายถึงการที่คอนกรีตสดสามารถไหลเข้าแบบหล่อได้ดี ทำให้แน่นตัวได้ง่าย และคอนกรีตที่เทเข้าแบบหล่อปราศจากรูโพรงต่างๆ กล่าวคือ ช่องว่างทั้งสิ้นระหว่างวัสดุผสมจะต้องมีซีเมนต์เพสท์บรรจุเต็ม เหล็กเสริมต้องมีคอนกรีตหุ้มอยู่เป็นอย่างดี และต้องไม่มีการแยกตัวของส่วนผสมคอนกรีต

ซึ่งในทางทฤษฎีพลังงานผลรวมนี้ จะต้องเอาชนะแรงเสียดทานภายในระหว่างอนุภาคของส่วมผสมในเนื้อคอนกรีต แต่ในทางปฏิบัติ พลังงานที่ใส่เข้าไปนี้จะต้องเอาชนะทั้งแรงเสียดทานภายในระหว่างอนุภาค แรงเสียดทานระหว่างส่วนผสมคอนกรีตกับไม้แบบและเหล็กเสริม นอกจากนี้พลังงานบางส่วนจะสูญเสียไปในการเขย่าไม้แบบและเขย่าคอนกรีตที่อัดแน่นเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะวัดค่าความสามารถเทได้ของคอนกรีตตามคำนิยาม การวัดความสามารถเทได้จึงเป็นวิธีการที่ประยุกต์ใช้ในการวัดความข้นเหลวของคอนกรีต

เนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีตจะผันแปรหรือถูกกระทบโดยตรง โดยช่องว่างที่ปรากฏอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตที่อัดแน่น ดังนั้นควรทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ นั่นคือจำเป็นต้องทำให้คอนกรีตสดมีความสามารถเทได้เพียงพอ เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถอัดแน่นได้ดี โดยใช้พลังงานที่เหมาะสมภายใต้สภาพที่กำหนด

องค์ประกอบที่มีผลต่อความสามารถเทได้

1 ปริมาณน้ำในส่วนผสม ปริมาณน้ำมีอิทธิพลต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีตโดยตรง การเพิ่มปริมาณน้ำจะทำให้เกิดการหล่อลื่นในระหว่างอนุภาคมากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีสภาพเหลว การเทและการอัดแน่นทำได้ง่าย แต่กลับทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดลดลง เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น รวมทั้งปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดช่องว่างเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วมากขึ้น อันเกิดจากน้ำส่วนเกิน (Excess Water) ที่ระเหยออกไป นอกจากนี้ คอนกรีตสดที่เหลวยังเกิดการแยกตัวได้ง่าย ในทางกลับกันการมีน้ำผสมอยู่น้อยไปจะทำให้คอนกรีตสดมีลักษณะแห้ง การผสมและการอัดแน่นทำได้ยาก

2 คุณสมบัติของหินและทราย รูปร่างและส่วนขนาดคละของวัสดุผสมจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด หินทรายที่มีส่วนขนาดคละที่ดีจะทำให้ได้คอนกรีตที่มีความสามารถเทได้ดีขึ้น หินที่มีอนุภาคกลมจะทำให้คอนกรีตมีความไหลลื่นและมีความสามารถเทได้ดีกว่ามวลรวมที่มีรูปร่างแบนและเป็นเหลี่ยมมุมมาก เพราะมวลรวมจะเกิดการขัดกันระหว่างอนุภาค ความพรุนของมวลรวมจะทำให้เกิดการดูดซึมน้ำสูง

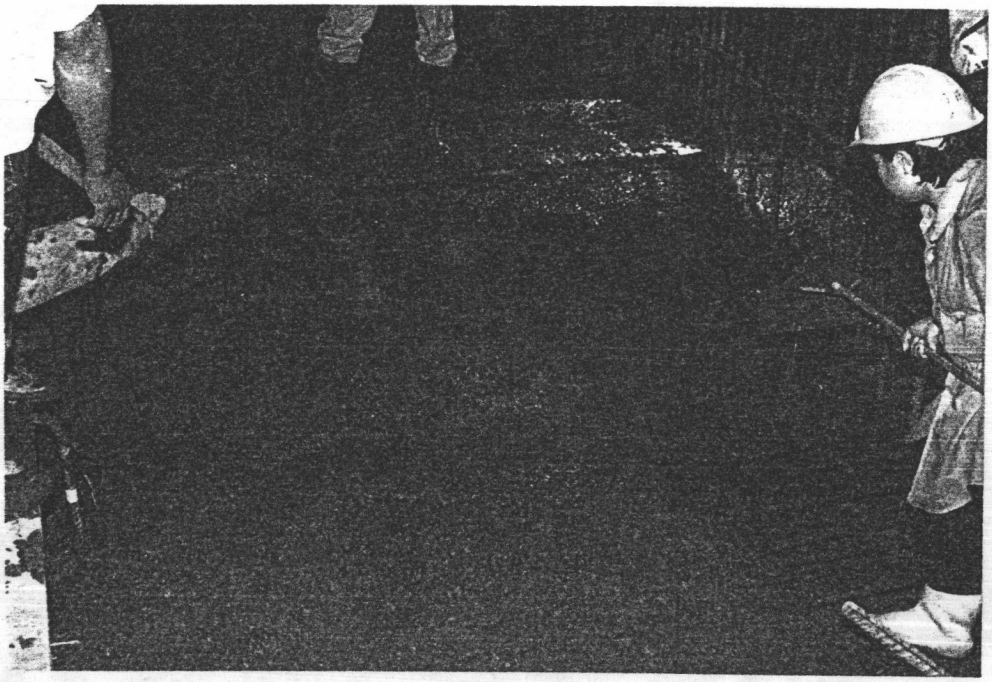
และลดความสามารถเทได้ลง รวมทั้งมวลรวมที่มีความละเอียดมากกว่าจะใช้ปริมาณน้ำในการผสมมากกว่าเพื่อให้ได้ความข้นเหลวตามต้องการ

3 ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มีความไวต่อปฏิกริยาเคมีจะทำให้ปฏิกริยาเกิดขึ้นได้เร็วและจะลดความสามารถเทได้ของคอนกรีตลง โดยปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากจะต้องการน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นเพราะมีพื้นที่ผิวมากและทำให้เกิดปฏิกริยาทางเคมีไฮเดรชั่น (Hydration) ได้เร็วขึ้น

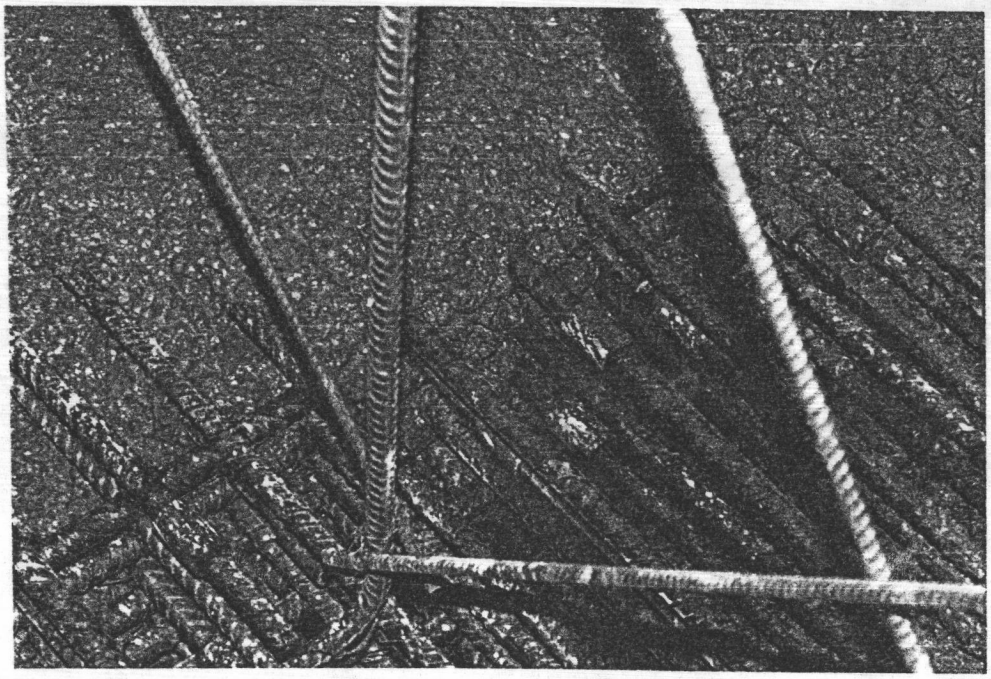
4 ส่วนผสมของคอนกรีต ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนทรายต่อมวลรวมทั้งหมดต่ำ (S/A Ratio) อาจทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัวและทำให้ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตต่ำลง และในกรณีที่ส่วนผสมมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่ ค่าความสามารถเทได้จะเพิ่มขึ้นถ้าอัตราส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์ (W/C Ratio) ลดลง ในการใช้ทรายในส่วนผสมมากอาจทำงานได้ง่ายขึ้น และสิ้นเปลืองปริมาณซีเมนต์มากขึ้น ถ้าจะคงกำลังอัดเท่าเดิม

5 สารเคมีผสมเพิ่ม การเพิ่มความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต สามารถทำได้โดยการใช้สารเคมีลดปริมาณน้ำ จะช่วยเพิ่มความข้นเหลวของคอนกรีต โดยจะลดปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมลงและเพิ่มกำลังรับแรงอัด ส่วนสารเพิ่มฟองอากาศ (Air Entraining Agent) จะทำให้เกิดการลื่นไหลดีขึ้น แต่กำลังอัดที่ได้อาจลดลง สารผสมเพิ่มที่เป็นผงละเอียดจะช่วยเพิ่มความลื่นไหลแทนส่วนของซีเมนต์และลดการเยิ้ม (Bleeding) ของคอนกรีตที่มีค่าความข้นเหลวมากๆ ตัวอย่างวัสดุผสมเช่น ขี้เถ้าลอย หรือ ซิลิก้าฟูม

6 เวลาและอุณหภูมิ ความสามารถเทได้ของคอนกรีตจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูง คอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้วทิ้งไว้นาน จะทำให้ความสามารถทำงานได้ลดลง เนื่องจากปฏิกริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ของปูนซีเมนต์กับน้ำ รวมทั้งการสูญเสียน้ำจากการระเหยและการดูดน้ำของมวลรวม การผสมน้ำเพิ่มจะทำให้ความสามารถทำงานได้ดีขึ้นอีก ถ้าคอนกรีตยังไม่ก่อตัว แต่การเพิ่มน้ำมากจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง เพราะเป็นการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C Ratio) อาจหลีกเลี่ยงโดยการเติมสารลดปริมาณน้ำ (Superplasticizer) ในการผสมซ้ำแทนที่จะใช้น้ำ



รูปที่ 2.6 แสดงความสามารถเทได้คอนกรีตคุณภาพสูง ในการใช้งานปั๊ม



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการไหลของคอนกรีตคุณภาพสูง ผ่านเหล็กเสริมที่หนาแน่น

2.3.3 การก่อตัวและการสูญเสียค่าความยุบตัว

ระยะเวลาการก่อตัวมีความสำคัญมากต่องานคอนกรีต โดยเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเวลาการเทคอนกรีต คอนกรีตสดที่เทลงแบบและปล่อยทิ้งไว้โดยไม่มีสิ่งรบกวนจะค่อยๆ กระด้าง และก่อตัว หลังจากนั้นก็จะแข็งตัว สำหรับคอนกรีตคุณภาพสูงควรมีระยะเวลาที่จะคงสภาพพลาสติกอย่างน้อย 1 ถึง 1.5 ชม. เพื่อที่จะให้มีระยะเวลาเพียงพอในการลำเลียงและเทลงแบบหล่อ การก่อตัวของคอนกรีตจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. การเริ่มก่อตัว (Stiffening time) คือเวลาที่คอนกรีตเหลวรับแรงเสียดทานจากเครื่องทดสอบได้ 5 กก. /ตร. ซม. หรือ 70 ปอนด์ / ตารางนิ้ว โดยคอนกรีตจะเริ่มแข็งและกระด้าง

2. การก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting time) คือเวลาที่คอนกรีตเหลว รับแรงเสียดทานได้ 35 กก./ตร.ซม, หรือ 500 ปอนด์/ตารางนิ้ว คอนกรีตในช่วงนี้จะเริ่มแข็งตัวแล้ว

3. การก่อตัวสุดท้าย (Final Setting time) คือเวลาที่คอนกรีตแข็งตัวสมบูรณ์โดยสามารถรับแรงเสียดทานได้ 276 กก./ตร.ซม. หรือ 4000 ปอนด์/ตารางนิ้ว

การก่อตัวของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการอันได้แก่ ชนิดของปูนซีเมนต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ C_3A, C_3S และยิปซั่มในส่วนผสม, อุณหภูมิของอากาศ, ความชื้นสัมพัทธ์, ขนาดความหนาบางของโครงสร้างคอนกรีต

ในการทำงานคอนกรีตจะต้องเทคอนกรีตให้เสร็จสิ้นก่อนเวลาการเริ่มก่อตัว เพื่อลดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของคอนกรีตในการเทที่ใช้เวลานาน ในปัจจุบันคอนกรีตผสมเสร็จที่มีขายในท้องตลาดได้ผสมสารหน่วงระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต (ASTM C494 TYPE D) ทำให้เพิ่มระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นอยู่ในช่วง 4-6 ชั่วโมง

ระหว่างการเทคอนกรีต คอนกรีตเหลวจะค่อยๆ สูญเสียความสามารถทำงานได้ตามระยะเวลาที่ผ่านไป ซึ่งบางส่วนเป็นผลที่เกิดจากปฏิกริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ของ C_3S และ C_3A ซึ่งเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในระหว่างระยะเวลาการพักตัว (Dormant Period) และบางส่วนเกิดจากการสูญเสียน้ำจากการระเหยและดูดซับ และเนื่องจากแรงกระทำระหว่างอนุภาคที่เปลี่ยนไปเพราะการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชั่น (Hydration) การสูญเสียค่าการยุบตัวจะประมาณเป็นความสัมพันธ์ในรูปโดยตรงเทียบกับระยะเวลา การสูญเสียค่าการยุบตัวจะเกิดมากในช่วงระยะเวลา 1/2 - 1 ชั่วโมง ภายหลังการผสม

2.3.4 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

คุณสมบัติของคอนกรีตในขณะที่ยังอยู่ในสภาพเหลวจะมีความสำคัญเพียงขณะก่อสร้างเท่านั้น ในขณะที่คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตนั้น ในทางปฏิบัติคุณสมบัติของคอนกรีตทั้ง 2 ลักษณะจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องต่อกัน การที่จะให้ได้คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วดี จะต้องมาจากการเลือกสัดส่วนผสมเพื่อให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพ

เหลวมีความเหมาะสมในการใช้งาน

คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วที่สำคัญ ได้แก่

คุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีต ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ กำลังของมอร์ต้ามีบทบาทอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยกำลังของมอร์ต้านี้ขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อมอร์ต้า ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความพรุนจะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากำลังของมอร์ต้าขึ้นอยู่อย่างมากกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์, กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวมจะสูงเป็นหลายเท่าของกำลังของมอร์ต้า กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้หินขนาดใหญ่ขึ้น เพราะหินขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดน้ำใต้หินมากขึ้น ทำให้แรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ต้าลดลง ขนาดของมวลรวมจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำหรือปานกลางมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูง การเพิ่มปริมาณของมวลรวมในส่วนผสมจะเป็นการเพิ่มกำลังอัด รวมทั้งถ้าใช้หินที่มี โมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะทำให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้น, แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับมอร์ต้าจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ เช่น รูปร่าง ลักษณะผิวของมวลรวมและลักษณะทางเคมี คือปฏิกริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับแร่ธาตุต่างๆ ในเนื้อมวลรวม

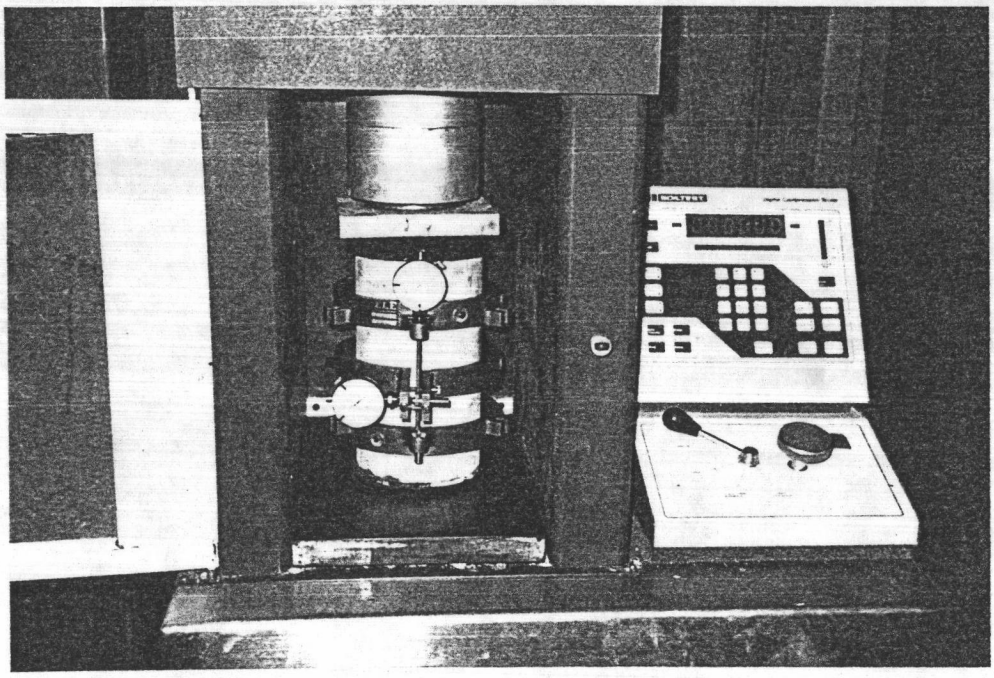
คุณสมบัติด้านการเปลี่ยนรูป (Deformation) แบ่งออกเป็นการเปลี่ยนรูปที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุก อันได้แก่ ความเครียดหยืดหยุ่น (Elastic Strain), การคืบ (Creep) และการเปลี่ยนรูปที่ไม่ขึ้นกับน้ำหนักบรรทุก อันได้แก่ การหดตัว (Shrinkage), การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Expansion)

ความเครียดยืดหยุ่น (Elastic Strains) เกิดจากการใส่แรงลงในคอนกรีตจะเกิดหน่วยการหดตัว หรือความเครียด (Strain) ซึ่งสามารถแสดงเป็นคุณสมบัติของคอนกรีตที่สัมพันธ์กับหน่วยแรง (Stress) ในโมค่าดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่น ได้แก่ คุณสมบัติของมวลรวม เป็นมวลรวมที่มีค่าโมดูลัสสูงจะส่งผลให้ค่าโมดูลัสของคอนกรีตสูงขึ้นด้วย, สัดส่วนผสมถ้าใช้มวลรวมมากคอนกรีตจะมีค่าโมดูลัสสูงขึ้น, การบ่มคอนกรีต, อายุของคอนกรีต, และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะแปรผันโดยตรงกับค่าโมดูลัส

การคืบ (Creep) ของคอนกรีต เป็นการเปลี่ยนรูปของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักหรือแรงกดที่บรรทุกค้างไว้เป็นเวลานาน โดยมีข้อสันนิษฐานว่า การคืบของคอนกรีตเกิดจาก การหดตัวของช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต การไหลของซีเมนต์เพสต์ (Viscous flow) การไหลของผลึก (Crystalline flow) ในวัสดุผสมและจากการซึมของน้ำจากเจล (Gel) เมื่อมีน้ำหนักภายนอกกระทำต่อคอนกรีต

การหดตัว (Shrinkage) คือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตเมื่อเกิดการสูญเสียน้ำหรือเกิดปฏิกริยาเคมีของส่วนผสม อันได้แก่ การหดตัวพลาสติก(Plastic Shrinkage) เกิดจากการจมตัวลงของส่วนที่เป็นของแข็งในส่วนผสมและการสูญเสียน้ำจากคอนกรีตสด,การหดตัวออโทจินัส(Autogenous Shrinkage) เกิดจากปฏิกริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดการลดลงของปริมาตร เนื่องจากปริมาตร

รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตคุณภาพสูง



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการทดสอบหาค่าโมดูลัสการยืดหยุ่น

ของสิ่งที่ได้จากปฏิกริยาไฮเดรชั่นน้อยกว่าปริมาตรของน้ำกับซีเมนต์ที่ใช้ผสมกัน, การหดตัวคาบอเนชั่น (Cabonation Shrinkage) เกิดจากปฏิกริยาเคมีของ free lime หรือ คัลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำปฏิกริยากับก๊าซคาร์บอนได้ออกไซด์ในอากาศจะทำให้เกิดการลดลงของปริมาตรของเพสต์และเกิดการหดตัว (Drying Shrinkage) เกิดจากการสูญเสียน้ำจาก Capillary และ Gel pore ทำให้อัตราการหดตัวช่วงแรกจะมีค่าสูง

การเปลี่ยนรูปเนื่องจากความร้อน (Thermal Movement) คือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนไปโดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตถือว่าน้อยมาก สัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีต เนื่องจากความร้อน (Coefficient of Linear Expansion) มีค่าปริมาณ 5.9×10^{-6} ถึง 7.4×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ซึ่งคุณสมบัติด้านการเปลี่ยนรูปเนื่องจากความร้อนนี้มีความสำคัญในการพิจารณา ถึงแบบและขนาดของโครงสร้าง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเสียหายของคอนกรีตอันเนื่องมาจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตคุณภาพสูงในสภาวะคอนกรีตสด ซึ่งก็จะมีความเกี่ยวพันกันกับคุณสมบัติในสภาพแข็งตัว โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อให้ได้คอนกรีตที่เป็นไปตามนิยามของคอนกรีตคุณภาพสูง โดยทำการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 24 ชั่วโมง และ 28 วัน เพื่อเป็นข้อมูลประกอบกับผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพเหลว

2.3.5 ความทนทานและการต้านทานการซึมผ่าน

ความทนทาน (Durability) ของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของคอนกรีต หมายถึงความสามารถในการทนต่อการเปลี่ยนแปลงจากสภาพแวดล้อม, ทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี, ทนต่อแรงกระแทกหรือการกระทำอื่นๆ ซึ่งคอนกรีตที่ทนทานจะต้องคงสภาพได้นานตลอดอายุการใช้งาน สาเหตุที่ทำให้คอนกรีตขาดความทนทาน และเกิดความเสียหายอาจมีสาเหตุมาจาก 3 ประการ ได้แก่

1. สาเหตุด้านกายภาพ (Physical) ซึ่งส่วนใหญ่มีผลมาจากแรงดึง (Tensile Stress) ที่กระทำต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าวและทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนโครงสร้างลดลง ตัวอย่างเช่น ความเสียหายโดยน้ำแข็ง (Feezing and Thawing), ความเสียหายโดยความร้อนหรือไฟ, ความเสียหายจากน้ำหนักบรรทุก, การกระแทก (Impact) ความล้าจากน้ำหนักบรรทุกหมุนเวียน(Cyclic Loading)

2. สาเหตุด้านเคมี (Chemical Attack) ความเสียหายอันเกิดจากสาเหตุด้านเคมีและความรุนแรงของแต่ละกรณีจะแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ความเสียหายโดยซัลเฟตซึ่งจะทำการกัดกร่อนและทำอันตรายต่อเพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ทำให้เกิดการขยายตัวและคอนกรีตแตกร้าว

3. ความเสียหายเชิงกล (Mechanical Attack) ความเสียหายจากการใช้งานเนื่องจากการเสียดสี (Abrasion) อยู่อย่างสม่ำเสมอ

คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของคอนกรีตซึ่งมีผลต่อความทนทานของคอนกรีตก็คือ ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) ซึ่งหมายถึงความสะดวกหรือความง่ายที่ของเหลวหรือก๊าซจะสามารถซึมผ่านคอนกรีต ความสามารถซึมผ่านของน้ำสามารถวัดได้โดยใช้น้ำที่มีความดันผ่านคอนกรีต เมื่อถึงสภาพที่คอนกรีตอิ่มตัวน้ำจะซึมผ่านคอนกรีตออกมา แล้วทำการวัดปริมาณน้ำนี้ในช่วงเวลาหนึ่ง รวมทั้งวัดความหนาของคอนกรีต โดยความสามารถซึมผ่านของน้ำจะถูกแสดงออกมาในรูปสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ มีหน่วยเป็นเมตร / วินาที

สำหรับคอนกรีตธรรมดาที่ใช้หินทั่วๆ ไป ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำจะถูกควบคุมด้วยความพรุนของซีเมนต์เพสต์ โดยความพรุน (Capillary Porosity) จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ และความสมบูรณ์ของปฏิกริยาไฮเดรชั่น(Hydration) ความสามารถซึมผ่านได้จะต่ำสำหรับเพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ โดยเฉพาะในช่วงที่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำกว่า 0.50 ซึ่งช่องทางไหลของน้ำ (Capillary) จะถูกแบ่งแยกออกไม่ต่อเนื่องกัน เนื่องจากโครงสร้างของเนื้อคอนกรีตมีการเรียงตัวแน่นขึ้น และมีการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชั่น (Hydration) อย่างต่อเนื่อง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 การออกแบบขนาดคละของมวลรวมคอนกรีตคุณภาพสูง

การพิจารณาขนาดคละของมวลรวมที่ใช้สำหรับงานคอนกรีตคุณภาพสูง เป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C33[20] ดังแสดงในตารางที่ 2.6 โดยแยกตามขนาดใหญ่สุดของมวลรวม (Maximum Size Aggregate) แบ่งออกเป็น หิน 1",3/4",3/8" และทรายตามลำดับ ซึ่งวัสดุผสมหินและทราย ที่จะใช้ผสม เทคอนกรีต ควรจะต้องมีความลดหลั่นหรือ ขนาดคละเป็นไปตามเกณฑ์กำหนด ซึ่งจะช่วยให้เนื้อคอนกรีตเรียงตัวกันได้แน่น และมีช่องว่างน้อย ช่วยให้ทำงานได้ง่าย ช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่จำเป็นต้องใช้ลงได้ คือเพียงพอที่จะเคลือบผิววัสดุผสมทั้งหมด และเติมเต็มช่องที่เหลืออยู่ระหว่างมวลรวม เพื่อเชื่อมให้วัสดุผสมยึดติดกัน โดยมวลรวมที่ขนาดเล็กกว่าจะเข้าไปแทรกอยู่ในระหว่างช่องว่างระหว่างก้อนมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่า

ตารางที่ 2.6 เกณฑ์กำหนดส่วนขนาดคละของวัสดุผสมหินและทราย (ASTM C33)

Sieve Size	Percent Passing by Weight			
	Sand	3/8" - #8	3/8" - #8	1"
1 1/2"				100
1"			100	95-100
3/4"		100	90-100	
1/2"				25-60
3/8"	100	85-100	20-55	
#4	95-100	10-30	0-10	0-10
#8	80-100	0-10	0-5	0-5
#16	50-85	0-5		
#30	25-60			
#50	10-30			
#100	2-10			

ในการรวมหินและทรายเข้าด้วยกัน (Combined Gradation) การหาอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมแต่ละชนิด เพื่อจะผสมรวมกันให้ได้ส่วนขนาดคละที่เหมาะสมนั้น แบ่งออกเป็น การหาอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมหยาบระหว่างหินขนาดต่างๆ เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน และการหาอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมรวมทั้งหินและทราย ซึ่งจะสามารถพิจารณาได้ในลักษณะของ เปอร์เซ็นต์ของทรายที่ผสม

I16658960

(Percentage of Sand) หรือเรียกโดยทั่วไปว่า S/A Ratio (Sand by Aggregate Ratio) เปอร์เซ็นต์ของทรายที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตคุณภาพสูง จะต้องช่วยในการลดปริมาณช่องว่างในมวลรวมให้น้อยที่สุด ซึ่งจะมีผลทำให้ลดปริมาณของ ซีเมนต์เพสท์ (Paste) ลงไปได้ และยังจะช่วยในด้านคุณสมบัติความสามารถเทได้ของคอนกรีตอีกด้วย อัตราส่วนทรายต่อมวลรวมที่เหมาะสมจะมีความเกี่ยวพันกับปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม และความข้นเหลวของคอนกรีต ซึ่งโดยปกติ ค่าอัตราส่วนทรายต่อมวลรวมที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตทั่วไปจะมีค่าอยู่ประมาณ 0.40 แต่ในกรณีของคอนกรีตคุณภาพสูงนั้นจำเป็นที่จะต้องพิจารณาในด้านคุณสมบัติของการไหลลื่นได้ดี โดยปราศจากการแยกตัวของมวลรวมการหาขนาดคละของหินและทรายที่รวมกัน (Combined Gradation) ได้พิจารณาตามข้อกำหนดแนะนำสำหรับงานคอนกรีตปั๊มตามมาตรฐาน ACI-304 [29] และ DIN 1045 [30] ดังแสดงใน ตารางที่ 2.7 สำหรับ หิน 1"และ 3/4" ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันอาจพิจารณาจากมาตรฐาน ASTM C33 โดยกำหนดสัดส่วนทรายต่อหิน (S/A Ratio) เท่ากับ 0.40 ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.7 ขนาดคละแนะนำของมวลรวมตามมาตรฐาน ACI-304 และ DIN 1045

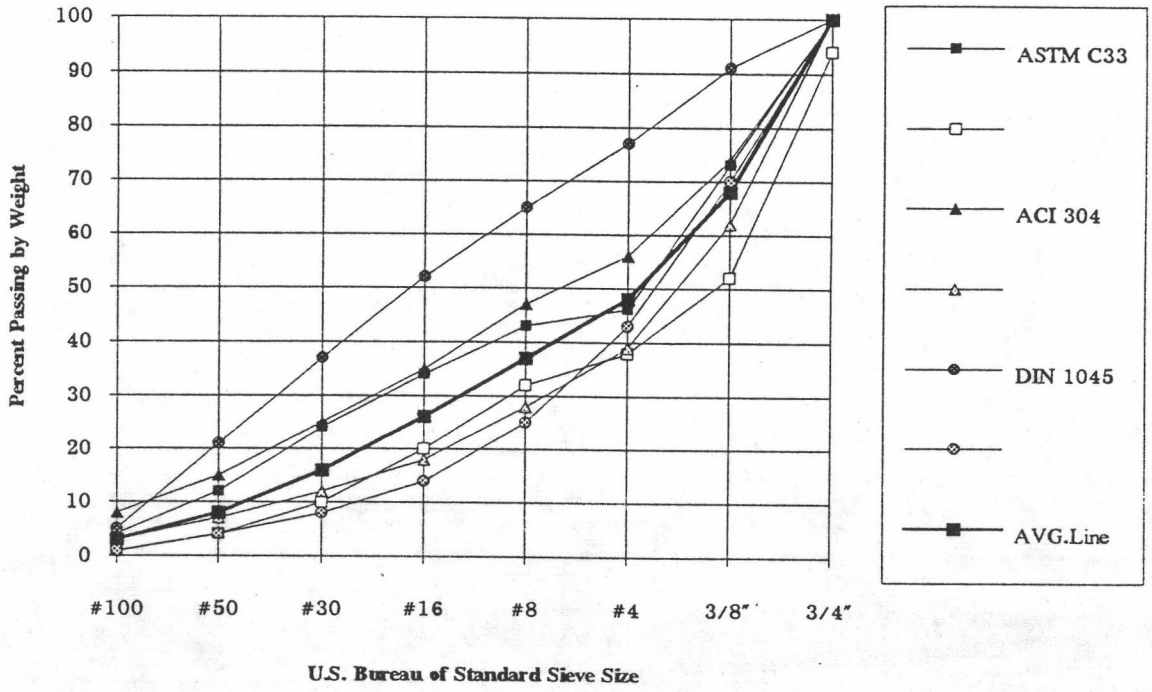
Sieve Size	Percent Passing by Weight		
	ACI 304		DIN 1045
	MSA 3/4"	MSA 1"	MSA 16mm.
1"		100	
3/4"	100	80-88	100
1/2"	75-83	64-75	
3/8"	62-74	55-70	70-91
#4	39-56	39-56	43-77
#8	28-47	28-47	25-65
#16	18-35	18-35	14-52
#30	12-25	12-25	8-37
#50	7-15	7-15	4-21
#100	3-8	3-8	1-5

ตารางที่ 2.8 แสดงขนาดคละของมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C33

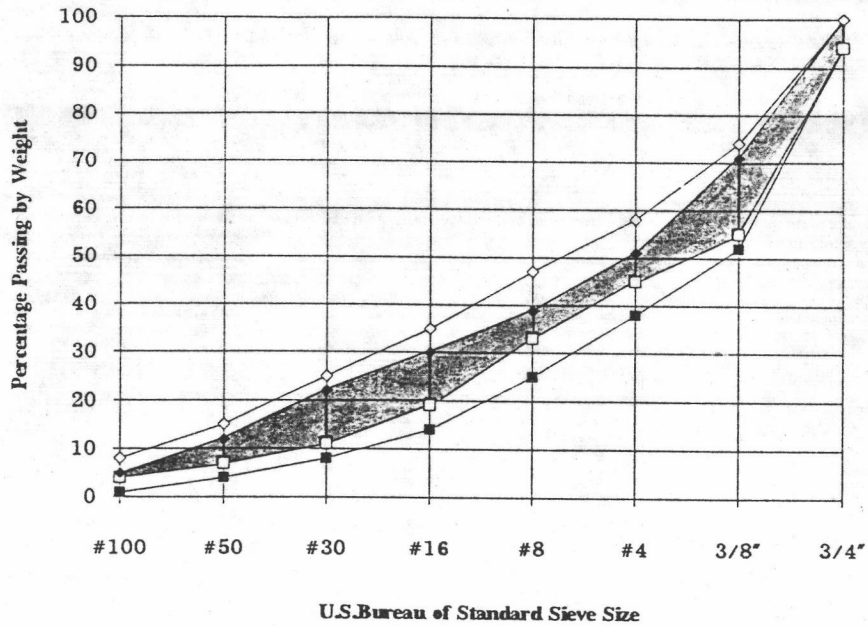
MSA =3/4" S/A Ratio = 0.40

SIEVE NO.	SIZE	3/4"		SAND		COMBINE
		A	60%	B	40%	0.6A+ 0.4B
1"	(25 mm.)	100	60	100	40	100
3/4".	(19 mm.)	90-100	54-60	100	40	94-100
3/8"	(9.5 mm.)	20-55	12-33	100	40	52-73
# 4	(4.75 mm.)	0-10	0-6	95-100	38-40	38-46
# 8	(2.36 mm.)	0-5	0-3	80-100	32-40	35-43
# 16	(1.18 mm.)	-	-	50-85	20-34	20-34
# 30	(0.60 mm.)	-	-	25-60	10-24	10-24
# 50	(0.30 mm.)	-	-	10-30	4-12	4-12
# 100	(0.15 mm)	-	-	2-10	0.8-4	0.8-4

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าขนาดใหญ่สุดของมวลรวม (Maximum Size of Aggregate) จะมีผลต่อปริมาณของซีเมนต์เพสท์ (Paste) ที่ต้องการในส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งการใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่สุดมาก ก็จะทำให้ช่องว่างระหว่างวัสดุผสมหยาบมีน้อยลง ดังนั้นปริมาณความต้องการทรายเพื่อแทรกในช่องว่างระหว่างวัสดุผสมหยาบก็จะน้อยลงไป ส่งผลให้ลดปริมาณของซีเมนต์เพสท์ที่ต้องการลงไปด้วย แต่การใช้ขนาดของมวลรวมใหญ่เกินไปจะมีผลต่อความสามารถทำงานได้ ของคอนกรีตรวมถึงกำลังรับแรงของคอนกรีตด้วย ในการศึกษาคอนกรีตกำลังสูงจึงมักพบว่าขนาดใหญ่สุดของมวลรวมมักจะมีขนาดเล็กเช่น 3/4",1/2" หรือ 3/8" ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมา [2] พบว่าขนาดใหญ่สุดของมวลรวม ที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตคุณภาพสูง ควรมีค่าไม่เกิน 20 mm. ทั้งนี้จะต้องมีขนาดคละเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 ทั้งมวลหยาบและมวลละเอียด สำหรับขนาดคละของมวลรวมหินและทราย (Combined Aggregate) ควรจะมีค่าอยู่ในช่วงขอบเขตกำหนดตามมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งได้รวมขอบเขตขนาดคละแนะนำตามมาตรฐานต่างๆ ข้างต้นเข้าไว้ด้วยกัน เมื่อพิจารณาจากขอบเขตขนาดคละตามมาตรฐานต่างๆ ดังกล่าว จะสามารถกำหนดค่าเฉลี่ยขอบเขตของมาตรฐานทั้ง 3 ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ในการวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลขนาดคละของมวลรวมหยาบและ มวลรวมละเอียด ดังแสดงในภาคผนวก และได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูล พิจารณาค่าเบี่ยงเบนและค่า ความแปร ปรวน จากค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลจากที่แสดงในรูปที่ 2.11 การกำหนดขอบเขตในช่วงกลางส่วนที่แรเงาเป็นค่าที่กำหนดจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มข้อมูล ที่เก็บรวบรวมในสภาพการใช้งานจริง โดยใช้ค่า Proportion Defective เท่ากับ 15% โดยการกำหนดขอบเขตขนาดคละนี้จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของทรายต่อหิน,จำนวนข้อมูล และอัตราเปอร์เซนต์ผ่านที่ยอมให้เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ย



รูปที่ 2.10 แสดงขอบเขตขนาดคละ (Combined Gradation) ตามมาตรฐานต่างๆ



รูปที่ 2.11 ขอบเขตขนาดคละของมวลรวมสำหรับคอนกรีตคุณภาพสูง