หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

คอนกรีตสมรรถนะสูง

2.1 ทั่วไป

การศึกษาและพัฒนาคอนกรีตสมรรถนะสูงเป็นไปอย่างแพร่หลาย ในหลายประเทศและกลุ่มองค์กรวิจัยได้ให้นิยามและข้อกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่แตกต่างกันตามความจำเป็นในการใช้งาน รายละเอียดบางส่วนได้ถูกรวบรวมไว้ ดังนี้

NIST/ACI[16] ได้ให้นิยามและข้อกำหนดของคอนกรีตสมรรถนะสูงว่าเป็นคอนกรีตที่มีคุณสมบัติที่ดีมีความเป็นเนื้อเดียว ซึ่งไม่สามารถทำการผลิตได้ด้วยเพียงวัสดุผสม วิธีการผสม การเท และการบ่มที่ใช้สำหรับคอนกรีตแบบดั้งเดิม มีคุณสมบัติที่สำคัญคือ ในสภาวะเหลวคอนกรีตต้องมีความสามารถทำงานได้สูงง่ายแก่การเทลงในแบบหล่อและปราศจากการแยกตัว ในสภาวะแข็งตัวคอนกรีตต้องมีกำลังอัดในระยะต้นสูง มีคุณสมบัติเชิงกลในระยะยาวที่ดี มีความแกร่ง มีเสถียรภาพเชิงมิติ และมีความสามารถในการให้บริการในระยะยาว

กลุ่มประเทศในแถบยุโรปและกลุ่มสแกนดิเนเวียโดย FIP/CEB [17] ได้ทำการศึกษาและกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงเพื่อการใช้งาน โดยในสภาวะเหลวคอนกรีตต้องมีความสามารถทำงานได้สูงสามารถทำการทดสอบได้จากโต๊ะการไหล มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของการไหลอยู่ระหว่าง 50 – 60 เซนติเมตร และมีค่ายุบตัวไม่น้อยกว่า 20 เซนติเมตร นอกจากนี้คอนกรีตจะต้องมีเวลาให้ทำงานได้ไม่น้อยกว่า 1.5 ชั่วโมง โดยปราศจากการแยกตัว ในสภาวะแข็งตัวคอนกรีตต้องมีกำลังอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วันมีค่ามากกว่า 600 กก/ตร.ซม. โดยมีกำลังรับแรงอัดในระยะต้นสูง กล่าวคือที่ 24 ชั่วโมง ต้องมีค่าเกินกว่าร้อยละ 50 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน นอกจากนี้คอนกรีตต้องมีเสถียรภาพเชิงมิติ กล่าวคือ มีการหดตัวน้อย และปราศจากการแตกร้าว มีอัตราการซึมผ่านของน้ำต่ำและมีความทนทานสูง

Federal Highway Administration (FHWA) [18] ได้ให้นิยามของคอนกรีตสมรรถนะสูงว่า เป็นคอนกรีตที่ผลิตขึ้นจากกระบวนการที่เหมาะสมทั้งในด้านของการคัดเลือกวัสดุผสมที่มีคุณภาพ มีสัดส่วนผสมที่พอเหมาะ ด้วยวิธีการผสม การขนส่ง การเท การอัดแน่น และการบ่มที่พอเพียง ซึ่งจะได้คอนกรีตที่มีสมรรถนะการใช้งานที่ดีในสภาวะแวดล้อมที่ต้องเผชิญ ภายใต้แรงกระทำตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างนั้น ๆ และโดยการพิจารณาคุณสมบัติที่เหมาะสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงตามแนวคิดของ FHWA นั้นได้คำนึงถึงปัจจัยหลักที่มีผลต่อหน้าที่การใช้งานคอนกรีต ได้แก่ ประเภทและการใช้งานของโครงสร้าง สภาพแวดล้อม น้ำหนักหรือแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง และปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

SHRP-C-205 [19] ได้แบ่งประเภทของคอนกรีตสมรรถนะสูงจากกำลังอัดของคอนกรีตดังนี้

ก. คอนกรีตที่มีกำลังอัดในระยะต้นสูงมาก ได้แก่ คอนกรีตที่มีกำลังอัดที่ 4 ชั่วโมง ไม่น้อยกว่า 175 กก./ตร.ซม.
ข. คอนกรีตที่มีกำลังอัดในระยะต้นสูง ได้แก่ คอนกรีตที่มีกำลังอัดที่ 24 ชั่วโมง ไม่น้อยกว่า 350 กก./ตร.ซม.
ค. คอนกรีตกำลังสูงมาก ได้แก่ คอนกรีตที่มีกำลังอัดที่ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 700 กก./ตร.ซม.

นอกจากนี้ คอนกรีตต้องมีค่าตัวประกอบความทนทาน (Durability Factor) มีค่ามากกว่า 80% ภายหลังจากผ่านการทดสอบการแข็งตัวและละลายเป็นจำนวน 300 รอบ ตามมาตรฐาน AASHTO T161 และ ASTM C666 Procedure A โดยสัดน้ำต่อวัสดุซีเมนต์ต้องมีค่าไม่เกิน 0.35 ซึ่งจากข้อกำหนดของ SHRP-C-205 พบว่ามุ่งเน้นคุณสมบัติทางด้านกำลังในระยะต้น และความทนทานของคอนกรีตเป็นสำคัญ โดยให้ตอบรับกับความต้องการใช้งานด้านงานทางเป็นหลัก

ข้อกำหนดของคอนกรีตสมรรถนะสูงในประเทศญี่ปุ่น[20,21] พิจารณาจากคุณสมบัติในสภาวะเหลวเป็นเกณฑ์ กล่าวคือเป็นคอนกรีตที่มีความสามารถในการไหลสูงมาก สามารถไหลเข้าไปในทุกซอกทุกมุมของแบบหล่อได้โดยปราศจากการจี้เขย่า ส่วนผสมปราศจากการแยกตัว มีการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากการหดตัว และความเครียดจากความร้อนในระยะต้นน้อยที่สุด มีความสามารถซึมผ่านได้ต่ำ ในขณะที่มีกำลังอัดตามความต้องการในการใช้งาน คอนกรีตสมรรถนะสูงประเภทนี้ผลิตได้ด้วยการจำกัดปริมาตรของมวลรวมหยาบให้มีค่าต่ำ จำกัดปริมาณต่ำสุดของมอร์ตาในส่วนผสม ร่วมกับการใช้สารเคมีผสมเพิ่มประเภทลดน้ำอย่างมากเพื่อเพิ่มความหล่อลื่น ร่วมกับสารเพิ่มความหนืดเพื่อเพิ่มความต้านทานการแยกตัวของส่วนผสม

2.2 ประเภทของคอนกรีตสมรรถนะสูง

การใช้งานคอนกรีตสมรรถนะสูงในปัจจุบันมิได้เน้นที่มีกำลังอัดสูงเสมอไป โดยมีวัตถุประสงค์การใช้งานแตกต่างออกไปตามเงื่อนไขการก่อสร้าง ไม่ว่าจะเป็นความต้องการคอนกรีตที่มีความสามารถทำงานได้สูงในขณะที่มีกำลังอัดไม่สูงนัก การใช้งานคอนกรีตกำลังสูงหรือคอนกรีตที่สามารถพัฒนากำลังอัดระยะต้นอย่างรวดเร็ว รวมทั้งมีความทนทานสูงเป็นพิเศษ ทั้งนี้ยังรวมไปถึงคอนกรีตหลาที่ต้องควบคุมปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นภายใน เพื่อให้คอนกรีตสมรรถนะสูงตอบรับกับวัตถุประสงค์การใช้งานโดยทั่วไป งานวิจัยได้จำแนกคอนกรีตสมรรถนะสูงออกเป็นสามประเภท ได้แก่ คอนกรีตไหล คอนกรีตกำลังสูง และคอนกรีตหลา

2.2.1 คอนกรีตไหล

มาตรฐาน ASTM C1017 ได้กำหนดนิยามของคอนกรีตไหล คือคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวสูงกว่า 7.5 นิ้ว (190 มิลลิเมตร) และมีการยึดเกาะตัวที่ดี โดยต้องมีคุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 2.1 ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาข้อกำหนดตามมาตรฐานของ ASTM C1017 ร่วมกับข้อกำหนดของ CEB-FIP สามารถที่จะกำหนดคุณสมบัติในสภาวะเหลวของคอนกรีตไหลดังนี้

คอนกรีตต้องมีความสามารถทำงานได้สูงโดยมีค่าการยุบตัวไม่น้อยกว่า 20 เซนติเมตร และมีค่าการไหลตัวจากทดสอบโดยโต๊ะการไหล ไม่น้อยกว่า 50 เซนติเมตร โดยที่มีระยะเวลาในการทำงานได้ไม่น้อยกว่า 60 นาที กล่าวคือมีอัตราการสูญเสียค่าการยุบตัวน้อย นอกจากนี้คอนกรีตต้องปราศจากการแยกตัวทั้งในขณะขนส่ง และขณะเทเข้าสู่แบบหล่อ และมีการเยิ้มน้อย ในสภาวะแข็งตัวคอนกรีตต้องมีกำลังอัดเพียงพอต่อการใช้งาน

อย่างไรก็ตามเพื่อแบ่งแยกความแตกต่างระหว่างคอนกรีตกำลังสูงให้ชัดเจน ค่ากำลังอัดประลัยของตัวอย่างทรงกระบอกที่อายุ 28 วันของคอนกรีตไหลจะต่ำกว่า 600 กก./ตร.ซม.

2.2.2 คอนกรีตกำลังสูง

การกำหนดกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง ในงานวิจัยได้ยึดถือข้อกำหนดของ CEB-FIP ให้คุณสมบัติในสภาวะแข็งตัวของคอนกรีตกำลังสูงดังนี้

คอนกรีตจะต้องมีกำลังอัดประลัยของตัวอย่างทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 600 กก./ตร.ซม. ค่ากำลังอัดประลัยของตัวอย่างทรงกระบอกที่อายุ 24 ชั่วโมงไม่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของกำลังอัดที่ 28 วัน การซึมผ่านของน้ำมีค่าต่ำ มีเสถียรภาพเชิงมิติ การหดตัวน้อย คอนกรีตกำลังสูงควรจะมีคุณสมบัติการใช้งานในสภาวะเหลวเป็นไปตามข้อกำหนดของคอนกรีตไหลเพื่อเพิ่มความสามารถทำงานได้ สามารถอัดแน่นตามความเหมาะสมกับการใช้งาน

2.2.3 คอนกรีตหลา

คอนกรีตหลาตามนิยามของ ACI 207[22] คือ คอนกรีตที่มีการหล่อในที่ด้วยปริมาณมากและมีมิติมากจะต้องทำการตรวจวัดผลของการก่อกันและผลของการสะสมความร้อนที่เกิดขึ้นภายใน และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรรวมถึงการขจัดการแตกร้าวที่อาจจะเกิดขึ้นได้ โดยปกติโครงสร้างคอนกรีตหลาจะต้องสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นได้ แต่มีมิติขนาดใหญ่ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในเฉลี่ยมีค่าต่ำกว่าในโครงสร้างทั่วไปจึงไม่มีความต้องการกำลังอัดที่สูงนัก อย่างไรก็ตามคอนกรีตจะต้องมีกำลังอัดที่เพียงพอต่อการใช้งาน

คอนกรีตหลาในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีสภาวะเหลวเป็นไปตามข้อกำหนดของคอนกรีตไหลเพื่อเพิ่มความสามารถทำงานได้ สามารถอัดแน่นตามความเหมาะสมกับการใช้งาน และอุณหภูมิสะสม หรืออุณหภูมิแตกต่างที่ผิวและกึ่งกลางโครงสร้างต้องมีค่าไม่เกิน 45 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการประกันได้ว่าหน่วยแรงดึงในคอนกรีตจะไม่ทำให้เกิดความกว้างของรอยแตกสูงเกินกว่าค่าที่ยอมให้ตามข้อกำหนดของ ACI 224[23] (โดยมีรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ข)

2.3 การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง

2.3.1 วัสดุผสม

โดยปกติแล้ววัสดุผสมสำหรับใช้ผลิตคอนกรีตดั้งเดิมสามารถนำมาใช้สำหรับผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงได้ แต่ต้องผ่านการคัดเลือกและตรวจสอบคุณภาพก่อนให้เป็นไปตามกรอบของการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงเสียก่อน ความเข้าใจถึงคุณสมบัติของวัสดุผสมประเภทต่าง ๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูงสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างมากจากคุณสมบัติวัสดุผสมที่เปลี่ยนแปลงไป

2.3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้จากการกระบวนการเผาวัตถุดิบจำพวกแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร่วมกับสารประกอบซิลิก้า (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และออกไซด์ของเหล็ก (Fe_2O_3) ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,450 องศาเซลเซียส ซึ่งคุณสมบัติของซีเมนต์ที่ได้ขึ้นอยู่กับสัดส่วนผสมของวัตถุดิบดังกล่าวในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งจะมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ การเลือกใช้ซีเมนต์ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งานของคอนกรีตนั้น ต้องเข้าใจถึงผลขององค์ประกอบทางเคมีที่มีต่อคุณสมบัติของซีเมนต์แต่ละประเภท โดยองค์ประกอบหลักทางเคมีของซีเมนต์ ได้แก่

ไตรคัลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$ หรือ C_3S) มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม สีเทาเข้ม หลังทำปฏิกริยากับน้ำสามารถก่อตัวได้ภายใน 2 ถึง 3 ชั่วโมง มีการพัฒนากำลังอัดในระยะต้นอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดปริมาณความร้อนปานกลาง (500 จูล/กรัม) เป็นองค์ประกอบในสัดส่วน 35 –55 % โดยประมาณ

ไดคัลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$ หรือ C_2S) นิยมเรียกว่า บีไลท์ มีรูปร่างกลมหลายลักษณะ การก่อตัวเป็นไปอย่างช้า ๆ ก่อให้เกิดความร้อนต่ำ (250 จูล/กรัม) เป็นองค์ประกอบในสัดส่วน 15 – 35% โดยประมาณ

ไตรคัลเซียมอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3$ หรือ C_3A) มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน ทำปฏิกริยากับน้ำในทันที เมื่อมีในสัดส่วนที่มากเกินไปอาจก่อให้เกิดการก่อตัวทันทีของซีเมนต์ ก่อให้เกิดความร้อนสูง (850 จูล/กรัม) กำลังอัดต่ำ เป็นองค์ประกอบในสัดส่วน 15 – 35% โดยประมาณ

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ หรือ C_4AF) หรือ ซีไลท์ มีสีเทาดำ ทำปฏิกริยารวดเร็ว ก่อให้เกิดความร้อนปานกลาง (420 จูล/กรัม) กำลังอัดต่ำ เป็นองค์ประกอบในสัดส่วน 5 – 10% โดยประมาณ

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติขององค์ประกอบหลักทั้ง 4 ในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และ รูปที่ 2.2 แสดงการพัฒนากำลังอัดขององค์ประกอบหลักในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตามระยะเวลา นอกจากนี้ยังมีสารประกอบรองที่มีความสำคัญต่อคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และต้องได้รับการควบคุมปริมาณ ได้แก่

ยิปซั่ม ($CaSO_4.2H_2O$) เป็นสารที่ใส่เข้าไปร่วมกับกระบวนการเผาไหม้ เนื่องจากในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประกอบไปด้วย C_3A ประมาณ 10% โดยน้ำหนักซึ่งมากพอที่จะก่อให้เกิดการก่อตัวผิดปกติได้ ยิปซั่มจะเข้าทำปฏิ

กริยากับ C_3A กลายเป็น ไฮ-ซัลเฟตแคลเซียม ซัลโฟอลูมิเนต หรือ เอททริไกท์ ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$) ซึ่งสามารถหน่วงการเกิดปฏิกริยาของ C_3A ได้ในระยะหนึ่ง ปริมาณของยิปซั่มที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับปริมาณของ C_3A ในซีเมนต์เป็นสำคัญ

แคลเซียมออกไซด์อิสระ (CaO) เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกริยาเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ สัดส่วนผสมของวัตถุดิบที่มีแคลเซียมออกไซด์ ปริมาณของ ฟอสฟอรัส เพนทอกไซด์ (P_2O_5) ที่มากเกินไป แคลเซียมออกไซด์อิสระประกอบด้วยผิวผลึกที่ไม่สามารถทำปฏิกริยากับน้ำได้ในระยะแรก แต่การเกิดปฏิกริยาของแคลเซียมออกไซด์อิสระในภายหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวแล้วจะก่อให้เกิดผลผลิตที่มีปริมาตรมากขึ้นซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์ได้ในภายหลัง อย่างไรก็ตามหากปริมาณของแคลเซียมออกไซด์อิสระที่เกิดขึ้นไม่มากเกินไป (โดยทั่วไปไม่เกิน 1% โดยน้ำหนัก)

แมกนีเซีย (MgO) เกิดขึ้นเนื่องจากแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ที่มีอยู่ในวัตถุดิบ เช่นเดียวกับแคลเซียมออกไซด์อิสระ ผลผลิตที่ได้จากปฏิกริยาระหว่างแมกนีเซียกับน้ำก่อให้เกิดสารประกอบที่มีปริมาตรมากขึ้น (แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์, $Mg(OH)_2$) โดยต้องควบคุมปริมาณของแมกนีเซียที่เกิดขึ้นไม่ให้เกิน 4% ตามมาตรฐานของ BS12-89 และ 6% ตามมาตรฐาน ASTM C150 เพื่อป้องกันการขยายตัวและความไม่เสถียรของซีมนต์เพสต์ในภายหลัง

ออกไซด์ของอัลคาไลด์ (K_2O, Na_2O) จะมีผลกับซีเมนต์เพสต์เมื่อนำมวลรวมที่มีส่วนประกอบของ ซิลิก้าที่ทำปฏิกริยาได้ (Active Silica) ซึ่งจะทำปฏิกริยากับอัลคาไลท์ในซีเมนเพสต์เกิดเป็นผลผลิตที่มีปริมาตรมากขึ้นจนสามารถดันเนื้อของซีเมนต์เพสต์ให้แตกออกได้ เรียกว่าปฏิกริยาอัลคาไลท์-ซิลิก้า ในบางกรณีเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นอาจจะมีความจำเป็นต้องใช้ซีเมนต์ที่มีปริมาณอัลคาไลท์ต่ำในการผสมคอนกรีต

เนื่องจากคุณสมบัติหลักของซีเมนต์ได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัว การพัฒนากำลังอัด ความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลักในซีเมนต์ มาตรฐาน ASTM C150 จึงได้แบ่งปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภท อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ของการใช้งานสามารถแยกประเภทของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่นอกเหนือจากปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา (OPC) ได้ดังนี้

ก. ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดแข็งตัวเร็ว (RHPC) หรือ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่สาม ตาม มาตรฐาน ASTM C150 - ผลิตได้โดยเพิ่มสัดส่วนของของ C_3S แทนที่ปริมาณของ C_2S ที่ลดลง และบดผงปูนให้มีความละเอียดสูงขึ้น การพัฒนากำลังอัด และ ความร้อนเนื่องจากปฏิกริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้นจะสูงกว่า OPC

ข. ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดความร้อนต่ำ (LHPC) หรือ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่สี่ ตามมาตรฐาน ASTM C150 - ผลิตได้โดยลดสัดส่วนของ C_3S และ C_3A ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ก่อให้เกิดความร้อนสูงลง การพัฒนากำลังอัดในระยะต้นเป็นไปได้ช้ากว่า OPC แต่ในระยะปลายมีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงกว่า OPC และ RHPC

ค. ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ต้านทานซัลเฟต (SRPC) หรือ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ห้า ตามมาตรฐาน ASTM C150 - ผลิตได้โดยลดสัดส่วนของ C_3A ซึ่งมีความไวต่อปฏิกริยากับซัลเฟตลง โดยการพัฒนากำลังอัดในระยะต้นต่ำกว่า OPC เล็กน้อย และในระยะปลายใกล้เคียงกับ LHPC

รูปที่ 2.3 และ 2.4 แสดงการพัฒนากำลังอัด และ ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ และในตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ทั้ง 5 ประเภทตามมาตรฐาน ASTM C150 นอกจากองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์แล้ว คุณสมบัติอื่น ๆ ที่มีความสำคัญต่อการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตและมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตได้แก่

ความถ่วงจำเพาะ เป็นค่าซึ่งเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก และ ปริมาตร มีความจำเป็นในการคำนวณออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์สามารถหาได้จากการทดสอบโดยวิธีของ ASTM C188 โดยทั่วไปสำหรับปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.15

ความละเอียด ค่าความละเอียดของซีเมนต์พิจารณาได้จากพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งได้จากการทดสอบการซึมผ่านของอากาศตามวิธีของ ASTM C204 โดยซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงกว่ามีแนวโน้มที่จะมีกำลังอัดในระยะต้นสูงกว่าเนื่องจากปฏิกริยาไฮเดรชั่นถูกควบคุมด้วยความละเอียดของอนุภาค แต่ในระยะปลายผลของความละเอียดที่มีต่อกำลังอัดจะลดลง เนื่องจากปฏิกริยาไฮเดรชั่นจะถูกควบคุมด้วยความสามารถในการแพร่กระจายของน้ำในเพสต์แทน ผลของความละเอียดของซีเมนต์ที่มีต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตแสดงในรูปที่ 2.5

2.3.1.2 มวลรวม

โดยทั่วไป ในคอนกรีตจะประกอบไปด้วยมวลรวมอยู่ประมาณ 60 ถึง 80% โดยปริมาตรของส่วนผสมทั้งหมด มวลรวมส่งผลต่อคุณสมบัติในด้านต่าง ๆ ของคอนกรีตเป็นอย่างมาก เช่น ความสามารถทำงานได้ คุณสมบัติเชิงกล และความทนทาน นอกจากนี้สัดส่วนคละของมวลรวมที่เหมาะสมยังทำให้สามารถประหยัดปริมาณซีเมนต์ลงได้มาก ในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงนั้นมวลรวมเป็นวัสดุผสมที่ต้องให้ความใส่ใจมากที่สุด

มีหลักเกณฑ์หลายอย่างที่ใช้ในการจำแนกมวลรวม หากพิจารณาจากแหล่งกำเนิดแล้วมวลรวมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดได้แก่ มวลรวมจากธรรมชาติ และมวลรวมที่ถูกทำขึ้นหรือได้จากกรรมวิธีในการผลิตโดยมนุษย์ หากจำแนกตามขนาดแล้วมวลรวลจะแบ่งเป็น มวลรวมหยาบ ได้แก่มวลรวมที่มีขนาดโตกว่าช่องเปิดมาตรฐานขนาด 4.75 มม. และมวลรวมละเอียด ซึ่งมีขนาดโตสุดตั้งแต่ช่องเปิดมาตรฐานขนาด 4.75 มม. ลงมา แต่ไม่เล็กว่าขนาด 0.075 มม. (ช่องเปิดขนาด 200) สำหรับมวลรวมละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. เรียกว่า ฝุ่น และอนุภาคของมวลรวมที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.02 ถึง 0.06 มม. เรียกว่า ดินเหนียว นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกมวลรวมได้จากความหนาแน่นซึ่งแบ่งได้เป็นมวลรวมเบา ได้แก่มวลรวมที่มีความหนาแน่นตั้งแต่ 30 –1,100 กก./ลบ.ม. มวลรวมหน่วยน้ำหนักปกติ ซึ่งมีความหนาแน่นตั้งแต่ 2,400 ถึง 3,000 กก./ลบ.ม. ซึ่งเป็นมวลรวมที่ใช้งานทั่วไปและใช้ได้กับคอนกรีตสมรรถนะสูง และมวลรวมหน่วยน้ำหนักสูง เป็นมวลรวมที่มีหน่วยน้ำหนักมากกว่า 4,000 กก./ลบ.ม. ขึ้นไป ในการเลือกใช้มวลรวมสำหรับผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงนั้น ต้องให้ความสนใจกับคุณสมบัติของมวลรวมเป็นพิเศษโดยคุณสมบัติสำคัญของมวลรวมที่ต้องคำนึงถึงได้แก่ รูปร่างและลักษณะผิว ขนาดคละ และคุณสมบัติเชิงกลของมวลรวม นอกจากนี้ในการคำนวณออกแบบส่วนผสมต้องทราบข้อมูลพื้นฐานของมวลรวมได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึม และความชื้นของมวลรวม

ก. รูปร่างและลักษณะผิว

รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมส่งผลต่อปริมาณเพสต์ที่ใช้เคลือบผิว และทำหน้าที่หล่อลื่นมวลรวมระหว่างขั้นตอนการผสมและการใช้งานคอนกรีต มวลรวมที่มีลักษณะกลมมนจะมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตร หรือพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่ามวลรวมที่เป็นเหลี่ยมมุม ทำให้ต้องการปริมาณเพสต์น้อยกว่า สำหรับมวลรวมรูปร่างแบนหรือยาว (Flatted or Elongated) มักจะก่อให้เกิดปัญหาการแยกตัวของส่วนผสมที่มีความข้นเหลวสูง เนื่องจากผลของแรงกระทำร่วมระหว่างอนุภาคเนื่องจากการขนกันของมวลรวมทำให้มวลรวมติดขัดและต้านทานการเคลื่อนที่ ทั้งในขณะทำการผสมและเทลงแบบ นอกจากนี้พบว่ามวลรวมลักษณะดังกล่าวมักมีต้นกำเนิดมาจากแหล่งหินแม่ที่มีระนาบอ่อนแอ ซึ่งไม่เหมาะกับการผลิตคอนกรีตกำลังสูง มาตรฐาน BS 812,882 ได้กำหนดวิธีการสำหรับทดสอบหาดัชนีความแบนของมวลรวม ซึ่งนิยามว่าคืออัตราส่วนระหว่างผลรวมของมวลรวมที่ผ่านเกจมาตรฐานต่อผลรวมน้ำหนักที่ค้างตามตะแกรงต่าง ๆ ที่มีน้ำหนักไม่น้อยกว่า 5% ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ โดยมวลรวมหยาบที่ใช้สำหรับงานคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่า 35 Mpa ต้องมีค่าดัชนีความแบนไม่เกิน 35 และสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดระหว่าง 20 ถึง 35 Mpa ยอมให้ใช้มวลรวมที่มีดัชนีความแบนเท่ากับ 50 และ 40 สำหรับมวลรวมหยาบที่ไม่ผ่านการย่อย และมวลรวมหยาบที่ผ่านการย่อย ตามลำดับ

นอกจากผลที่มีต่อความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตแล้ว รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมหยาบยังส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต โดยจะมีผลต่อการยึดหน่วงของมวลรวมกับมอร์ตาที่แข็งตัว มวลรวมที่มีความเป็นเหลี่ยมมุมและมีผิวหยาบจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับมอร์ตามากกว่า อย่างไรก็ตามหากมวลรวมเป็นเหลี่ยมมุมสูงจนเกินไปจะก่อให้เกิดหน่วยแรงเฉพาะที่สูงและเป็นเหตุให้มอร์ตาเกิดการวิบัติได้แม้มีหน่วยแรงโดยเฉลี่ยที่ต่ำ

ข. ขนาดคละ

ขนาดคละเป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกถึงลักษณะการกระจายอนุภาคขนาดต่าง ๆ ของมวลรวม โดยปกตินิยมแสดงเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของมวลรวมที่ผ่าน หรือค้างบนตะแกรงขนาดมาตรฐาน โดยทั่วไปขนาดคละของมวลรวมสามารถจำแนกได้เป็น ขนาดคละเดี่ยว ขนาดคละต่อเนื่อง ขนาดคละที่แทนมวลรวมขนาดเล็กด้วยมวลรวมขนาดใหญ่ ขนาดคละขาดตอน และขนาดคละที่ขาดส่วนละเอียด โดยขนาดคละของมวลรวมในลักษณะต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 ขนาดคละของมวลรวมมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติในสภาวะเหลวของคอนกรีต มวลรวมที่มีขนาดไล่เรียงอย่างเหมาะสมสามารถลดปริมาณช่องว่างที่เกิดขึ้นซึ่งจะทำให้ปริมาณเพสต์อิสระนอกเหนือจากปริมาณที่ใช้เติมเต็มในช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการจัดเรียงตัวเพิ่มมากขึ้น ขนาดคละของมวลรวมเป็นข้อพิจารณาที่สำคัญสำหรับการคัดเลือกหรือผสมมวลรวมเพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับส่วนผสมคอนกรีต

จากการศึกษาของ Powers พบว่าขนาดคละที่เหมาะสมไม่จำเป็นต้องเป็นขนาดคละที่ทำให้เกิดปริมาณช่องว่างที่ต่ำที่สุดเสมอไป หากพิจารณาจากหลักการของการอัดแน่นของอนุภาค [28] แล้ว จะพบว่าขนาดคละซึ่งทำให้เกิดดีกรีของการอัดแน่นมีค่าสูงสุด หรือเกิดปริมาณช่องว่างต่ำที่สุดนั้นมักจะเป็นขนาดคละที่ขาดส่วนละเอียด ซึ่งเมื่อนำมาผลิตคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตดังกล่าวมีความสามารถทำงานได้ต่ำและมีความหยาบมาก ดังจะพิสูจน์ได้จากเส้นโค้งขนาดคละจินตภาพในลักษณะพาราโบลาของ Fuller –Thomson [29] ซึ่งมิได้พิจารณาจากหลักการอัดแน่นของอนุภาคเพียงอย่างเดียว หากแต่มีการกำหนดปริมาณต่ำสุดของส่วนละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงขนาด 200 ไม่ให้ต่ำกว่าร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมด ทั้งนี้เพื่อมิให้คอนกรีตที่ได้มีความหยาบจนเกินไป อย่างไรก็ตามเส้น

โค้งขนาดคละจินตภาพที่เสนอขึ้นก็ไม่สามารถใช้งานได้ดีโดยเฉพาะเมื่อส่วนผสมของคอนกรีตต้องการความสามารถทำงานได้ที่สูงขึ้น

ในทางปฏิบัติแล้วขนาดคละที่เหมาะสมจะกำหนดได้จากการทดสอบการใช้งานมวลรวมในการผสมคอนกรีตในห้องปฏิบัติการและจากประสบการณ์ใช้งานในสนาม ซึ่งปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อขนาดคละที่เหมาะสมดังกล่าวได้แก่ ความสามารถในการหาได้ของมวลรวม ความข้นเหลวของคอนกรีต วิธีการเทคอนกรีต เป็นต้น มาตรฐาน มอก.566-2528 หรือ ASTM C33 ได้กำหนดขอบเขตขนาดคละสำหรับมวลรวมที่ใช้ในงานคอนกรีต นอกจากนี้ยังมีขอบเขตขนาดคละของมวลรวมที่เหมาะสมกับการใช้งานคอนกรีตแบบพิเศษ เช่น ข้อเสนอแนะของ ACI Committee 304[30] และ DIN 1045 ได้กำหนดของเขตขนาดคละที่เหมาะสมของมวลรวมสำหรับงานคอนกรีตปัมพ์ เป็นต้น ในการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงต้องควบคุมขนาดคละร่วมของมวลรวมให้มีความเหมาะสมเพื่อประกันความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตในสภาวะเหลว จากการศึกษาของ กิตติกร[6] และณรงค์ศักดิ์[7] ได้เสนอขอบเขตขนาดคละที่มีความเหมาะสมสำหรับการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง จากการพิจารณาเฉลี่ยข้อกำหนดขนาดคละตามมาตรฐานของ ASTM C33 สำหรับคอนกรีตปกติ ข้อแนะนำของ ACI 304 และ มาตรฐาน DIN 1045 สำหรับคอนกรีตปัมพ์ ซึ่งค่ากำหนดร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรงตามข้อกำหนดดังกล่าวแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

จากการพิจารณาค่าเบี่ยงเบนทางสถิติของการกระจายขนาดคละของมวลที่ช่องเปิดขนาดต่าง ๆ ในสัดส่วนเสียหายทางสถิติ (Proportion Defective) ในอัตราร้อยละ 15 สามารถกำหนดขอบเขตขนาดคละที่เหมาะสมของมวลรวมสำหรับคอนกรีตสมรรถนะสูงได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นกฎเกณฑ์สำคัญที่ใช้กับวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงในงานวิจัย

2.3.1.3 สารเคมีผสมเพิ่ม

โดยนิยามตามมาตรฐาน มอก.733-2530 หรือ ASTM C494 แล้ว สารเคมีผสมเพิ่ม หมายถึงวัสดุผสมเพิ่มนอกเหนือจากซีเมนต์ มวลรวม น้ำ และเส้นใยเสริมกำลัง ซึ่งใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตหรือมอร์ตา ทั้งก่อนหรือในขณะทำการผสมที่ทำหน้าที่ในการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต ซึ่งในความหมายนี้ไม่นับรวมถึงสารเติม ซึ่งเป็นสารที่ใช้เติมเพื่อวัตถุประสงค์บางอย่างในกระบวนการผลิตซีเมนต์ และสารปอซโซลาน โดยมาตรฐาน ASTM C494 ได้จำแนกสารเคมีผสมเพิ่มออกเป็น 7 ประเภท ตามตารางที่ 2.5 สารเคมีผสมเพิ่มอาจจะอยู่ในรูปของ ของสารละลาย หรือเป็นวัสดุผง ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงจะลดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลงให้มีค่าต่ำ หรือต้องการคอนกรีตที่มีความสามารถทำงานได้สูง และยืดระยะเวลาการทำงานได้ของคอนกรีต ซึ่งสารเคมีผสมเพิ่มที่มีคุณสมบัติสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ดังกล่าวได้แก่

ก. สารลดปริมาณน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C494 ประเภท A และ D

มีคุณสมบัติในการลดปริมาณน้ำในส่วนผสม เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้เท่าเดิมหรือทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น โดยมีประสิทธิภาพในการลดน้ำในส่วนผสมได้มากถึง 10% หรือใช้ในการเพิ่มความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตโดยไม่ต้องทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในส่วนผสม สารลดปริมาณน้ำที่นิยมใช้ในปัจจุบันสามารถจำแนกได้ตามองค์ประกอบหลักทางเคมี ได้แก่ ประเภทที่มีองค์ประกอบหลักเป็น ลิกโนซัลโฟเนต เกลือของกรดไฮดรอกซีคาร์บอกซิลิค และ โพลิเมอร์ของไฮดรอกไซเลท ซึ่งมีคุณลักษณะเฉพาะและผลต่อคุณสมบัติ

ของคอนกรีตที่แตกต่างกัน โดยสารที่มีส่วนประกอบของ ลิกโนซัลโฟเนต มักก่อให้เกิดฟองอากาศเพิ่มขึ้นในอัตรา 1 ถึง 2% โดยอีกสองประเภทหลังมักก่อให้เกิดการเยิ้มของคอนกรีต ซึ่งโดยทั่วไปอัตราการใช้งานที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.6% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ในส่วนผสม การใช้อัตราที่สูงเกินไปจะส่งผลต่อการยืดระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต และเพิ่มปริมาณอากาศในส่วนผสมซึ่งจะมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง ปัจจุบันนิยมใช้เพื่อลดน้ำในส่วนผสมสำหรับควบคุมค่ายุบตัวเริ่มต้น เพื่อเพิ่มความประหยัด โดยนิยมใช้สารหน่วงการก่อตัวร่วมด้วย

ข. สารหน่วงการก่อตัว ตามมาตรฐาน ASTM C494 ประเภท B

มีคุณสมบัติในการลดอัตราการเกิดปฏิกริยาของซีเมนต์กับน้ำ และส่งผลให้คอนกรีตมีระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามสารเคมีผสมเพิ่มประเภทนี้ไม่สามารถป้องกันการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตได้ ในปัจจุบันนิยมใช้ร่วมกับสารลดปริมาณน้ำทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น การใช้สารหน่วงการก่อตัวในปริมาณมากเกินไปจะทำให้คอนกรีตก่อตัวช้าผิดปกติ หรือในบางกรณีอาจจะไม่ก่อตัว

ค. สารลดปริมาณน้ำอย่างมาก ตามมาตรฐาน ASTM C494 ประเภท F, G

สารลดปริมาณน้ำอย่างมาก หรือนิยมเรียกว่า สารลดน้ำพิเศษ เป็นสารลดปริมาณน้ำที่มีประสิทธิภาพสูง มีความสามารถในการลดปริมาณน้ำในส่วนผสมและเพิ่มการไหลลื่นให้แก่คอนกรีตในสภาวะเหลว สารลดน้ำพิเศษที่มีการใช้งานสามารถจำแนกได้ตามประเภทขององค์ประกอบหลักทางเคมีได้แก่ ประเภทที่มีองค์ประกอบหลักเป็น ซัลโฟเนทเมลามีน ฟอร์มัลดีไฮด์ คอนเดนเซทส์ เป็นสารเคมีที่นำสารเมลามีน ($C_3H_6N_6$) มาเข้าทำปฏิกริยากับ ฟอร์มัลดีฮอด์ ได้สารประกอบของ ไตรเมทิรอล เมลามีน แล้วเข้าทำปฏิกริยากับโซเดียมไบซัลไฟต์ ($NaHSO_3$) ได้สารประกอบ แล้วทำการแปรสภาพด้วยวิธีโพลิเมอร์ (Polymerization) ได้สารประกอบของ เกลือซัลโฟเนทเมลามีน ฟอร์มัลดีไฮด์ คอนเดนเซท

ประเภทที่มีองค์ประกอบเป็น ซัลโฟเนทแนพธาลีน ฟอร์มัลดีไฮด์ คอนเดนเซทส์ เป็นสารเคมีที่นำสารแนพธาลีน ($C_{10}H_8$) ผ่านขบวนการซัลโฟเนท (Sulphonation) ด้วยกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ได้สารประกอบของเนพธาลีนกับกรดซัลโฟนิก (SO_3H) แล้วนำเข้าทำปฏิกริยากับ ฟอร์มัลดีไฮด์ (CH_2O) แล้วทำการแปรสภาพด้วยวิธีโพลิเมอร์ ได้สารประกอบที่มีสภาพเป็นกรด ทำให้เป็นกลาง (Neutralization) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ได้สารประกอบเกลือเรียกว่า ซัลโฟเนทแนพธาลีน ฟอร์มัลดีไฮด์ คอนเดนเซทส์ สำหรับวัตถุประสงค์หลักของการใช้งานสารลดน้ำพิเศษสามารถจำแนกได้ 2 ประเภท ได้แก่ ใช้สำหรับการผลิตคอนกรีตกำลังสูง กล่าวคือสารลดน้ำพิเศษจะลดความต้องการปริมาณน้ำของส่วนผสมลง ในขณะที่สามารถคงระดับความข้นเหลวของคอนกรีตไว้ได้ ทำให้สามารถลดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในส่วนผสมลงให้มีค่าต่ำได้ ในปัจจุบันสารลดน้ำพิเศษที่มีการใช้งานมีประสิทธิภาพในการลดน้ำได้ระหว่าง 30 ถึง 40% โดยอัตราการลดปริมาณน้ำขึ้นอยู่กับ ประเภท และอัตราส่วนของการใช้งาน นอกจากนี้สารลดน้ำพิเศษยังถูกนำมาใช้สำหรับการผลิตคอนกรีตไหล กล่าวคือสารลดน้ำพิเศษสามารถเพิ่มความข้นเหลวให้แก่คอนกรีตได้ ในขณะที่ปริมาณในส่วนผสมไม่เปลี่ยนแปลง ประกอบกับสารลดน้ำพิเศษสามารถเพิ่มความหนืดให้แก่ส่วนผสมคอนกรีต จึงทำให้สามารถผลิตคอนกรีตที่มีค่ายุบตัว หรือการไหลตัวที่สูง ในขณะที่คอนกรีตไม่เกิดการแยกตัว โดยทั่วไปอัตราการใช้ที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 2% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ อย่างไรก็ตามด้วยประสิทธิภาพของสารลดน้ำพิเศษในปัจจุบัน การใช้ในอัตราที่สูงจะกระทบต่ออัตราการก่อตัวของคอนกรีตน้อยมาก และไม่ส่งผลต่อกำลังอัด หรือความทนทานของคอนกรีตแต่อย่างไร อย่างไรก็ตามต้องได้รับการทดสอบเพื่อศึกษาถึงผลที่มีต่อคุณลมบัติของ

คอนกรีต ในการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง นิยมใช้สารลดปริมาณน้ำในการควบคุมค่ายุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีต ร่วมกับการใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตให้เป็นไปตามข้อกำหนดของคอนกรีตสมรรถนะสูง

2.3.1.4 แร่ธาตุผสมเพิ่ม

แร่ธาตุผสมเพิ่มเป็นสารซึ่งใช้เติม หรือทดแทนซีเมนต์บางส่วนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ หรือคอนกรีต แทนการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติหลักของซีเมนต์ที่ใช้ แร่ธาตุผสมเพิ่มสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

ก. แร่ธาตุผสมเพิ่มที่มีความไวต่อปฏิกริยาต่ำ

แร่ธาตุผสมเพิ่มประเภทนี้เป็นสารประกอบที่มีความเฉื่อยต่อปฏิกริยาเคมี ทำหน้าที่เป็นตัวแทรกเฉื่อยในการปรับปรุงให้เพสต์มีความแน่นมากขึ้นซึ่งจัดเป็นผลในเชิงกายภาพ ในบางกรณีถูกใช้เพื่อลดหรือหน่วงปฏิกริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้นจากซีเมนต์ ได้แก่ ผงหินปูน (Limestone Powder) เป็นต้น

ข. แร่ธาตุผสมเพิ่มประเภทปอซโซลาน

สารผสมเพิ่มประเภทนี้ประกอบด้วย SiO_2 หรือในบางกรณี Al_2O_3 ซึ่งสามารถทำปฏิกริยาในระดับทุติยภูมิกับ $Ca(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกริยาไฮเดรชั่นเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) หรือ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งเป็นสารประสานทำหน้าที่ลดความพรุนในซีเมนต์เพสต์ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น และมีความทนทาน สารปอซโซลานที่นิยมใช้ในการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง ได้แก่

ข..1 เถ้าลอย (Flyash)

เป็นวัสดุเม็ดละเอียดที่เหลือจากการเผาไหม้ของถ่านหินโดยส่วนใหญ่มาจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหิน มีลักษณะกลมมน องค์ประกอบทางเคมีไม่แน่นอนแล้วแต่ประเภทและแหล่งกำเนิดของถ่านหินที่นำมาใช้ อย่างไรก็ตาม มาตรฐาน ASTM C618 ได้จำแนกเถ้าลอยตามประเภทของถ่านหินที่นำมาใช้ ได้แก่ ชนิด C F และ N โดยเถ้าลอยชนิด F ผลิตได้จากการเผาไหม้ถ่านหิน แอนทราไซท์ หรือ บิทูมินัส มีปริมาณ CaO ต่ำกว่า 10% ในขณะที่เถ้าลอยชนิด C ผลิตได้จากถ่านหินลิกไนต์ หรือ ซับ-บิทูมินัส ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า มีปริมาณของ CaO มากกว่า 10% มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสานมากกว่า ส่วนเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินประเภทอื่น ๆ จัดเป็นเถ้าลอยชนิด N ตารางที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าลอยทั้ง 3 ชั้นคุณภาพ กับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยจากแหล่งแม่เมาะ

ปริมาณการใช้เถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับการผลิตคอนกรีตกำลังสูงอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 15 ถึง 35 โดยน้ำหนักซีเมนต์ ขึ้นอยู่กับชนิดของเถ้าลอยที่ใช้ โดยข้อแนะนำอัตราการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชนิด F และ C โดย ACI 211.4R [31] แสดงได้ดังตารางที่ 2.7 แต่สำหรับคอนกรีตหลาหรือคอนกรีตไหลสามารถใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ได้ในอัตราที่สูงกว่าเนื่องจากไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงกำลังอัดมากนัก

ข..2 ไมโครซิลิก้า หรือ ซิลิก้าฟูม

เป็นผลผลิตที่ได้จากกระบวนการผลิตโลหะซิลิกอน และ เฟอร์โรซิลิกอน อัลลอย เป็นสารประกอบที่มีความบริสุทธิ์มากประกอบด้วย SiO_2 84% ถึง 98% โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุที่มีความละเอียดสูงมีขนาดโดยประมาณเท่ากับ 0.1 ไมครอน (เล็กกว่าอนุภาคซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า) มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 20 ตารางเมตร/กรัม (ทดสอบโดยวิธี Nitrogen adsorption) เปรียบเทียบกับซีเมนต์ ซึ่งมีค่าประมาณ 0.31 ตร.ม./กรัม ด้วยขนาดที่เล็กและมีความละเอียดสูงร่วมกับมีองค์ประกอบทางเคมีเป็น SiO_2 ในปริมาณที่สูง ทำให้ไมโครซิลิก้าเป็นสารปอซโซลานที่มีความไวต่อปฏิกริยาสูง โดยสามารถแสดงทั้งผลทางกายภาพและผลทางเคมีที่มีต่อซีเมนต์เพสต์ได้อย่างชัดเจน กล่าวคือซิลิก้าฟูมทำหน้าที่เป็นตัวแทรกประสานระหว่างอนุภาคซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความพรุนลดลงอย่างมาก รูปที่ 2.8 แสดงภาพจำลองการแทรกตัวของซิลิก้าฟูมระหว่างอนุภาคซีเมนต์ และรูปที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างบริเวณสัมผัสร่วมของมอร์ตาร์และมวลรวมหยาบของคอนกรีตที่ผสมซิลิก้าฟูม และไม่ผสมซิลิก้าฟูม ตารางที่ 2.8 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของซิลิก้าฟูมเปรียบเทียบกับซีเมนต์และเถ้าลอย

ด้วยคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิก้าฟูมที่มีความละเอียดและมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงทำให้ซิลิก้าฟูมมีความต้องการน้ำในปริมาณที่สูงมากเป็นเหตุให้คอนกรีตมีความข้นเหลวลดลงและมีการยึดเกาะกันดีขึ้น ซึ่งทำให้ต้องมีการใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณที่สูงกว่าปกติเพื่อชดเชยความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตที่สูญเสียไป[10] นอกจากนี้จากรายงานของ ACI Committee 226[32] พบว่าในการใช้ซิลิก้าฟูมจะก่อให้เกิดปัญหาการแตกร้าวพลาสติก (Plastic shrinkage) ที่ผิวหน้าของคอนกรีต โดยเฉพาะในสภาวะที่คอนกรีตสูญเสียความชื้นที่ผิวหน้าอย่างรวดเร็ว ในการใช้งานต้องพยายามรักษาความชื้นที่ผิวหน้าของคอนกรีต โดยทั่วไปปริมาณซิลิก้าฟูมที่เหมาะสมกับการใช้งานอยู่ในช่วง 5 ถึง 10% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตมากนัก

2.3.2 วิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงประเภทคอนกรีตไหล และคอนกรีตหลา สามารถทำได้โดยวิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตแบบดั้งเดิม ร่วมกับการใช้สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต จำกัดปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม หรือทดแทนซีเมนต์บางส่วนเพื่อควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้น จากการศึกษาของ Blick el. Al.[33] พบว่าการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงโดยวิธีการดั้งเดิมของ ACI 211.1 ทำให้ส่วนผสมที่ได้ไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน เนื่องจากคอนกรีตกำลังสูงมีปริมาณซีเมนต์ในปริมาณสูง หากทำการออกแบบส่วนผสมโดยวิธีดั้งเดิมจะทำให้ส่วนผสมที่ได้มีความเหนียวและมีความยึดเกาะตัวสูงเกินไปทำให้ยากแก่การทำงาน นอกจากนี้ด้วยวิธีการดั้งเดิมยังขาดข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ในช่วงกำลังอัดสูง ด้วยเหตุนี้ ACI Committee 211[33] ได้ปรับปรุงข้อมูลการออกแบบตามวิธีของ ACI 211.1 เพื่อออกแบบส่วนผสมสำหรับคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งมีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 7,000 ถึง 12,000 psi (47.6 ถึง 81.6 Mpa) โดยใช้วัสดุผสมหลัก และวิธีการผสมคล้ายคลึงกับคอนกรีตแบบดั้งเดิม ร่วมกับการใช้สารลดน้ำพิเศษ และเถ้าลอย ขั้นตอนการออกแบบส่วนดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 และการกำหนดปริมาณวัสดุผสมของคอนกรีตกำลังสูงโดยวิธีของ ACI 211 มีหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้

ก. ปริมาณของมวลรวมหยาบ

วิธีการของ ACI 211.4R ได้แนะนำปริมาตรของมวลรวมหยาบในสภาวะแห้ง-อัดแน่น ที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูง ดังแสดงในตารางที่ 2.9 โดยมีความสัมพันธ์กับขนาดโตสุดของมวลรวมที่ใช้ และโม

แปรผันกับค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายที่ใช้ ซึ่งมีขอบเขตของค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายที่ใช้อยู่ในช่วงระหว่าง 2.5 ถึง 3.2 ปริมาณของมวลรวมหยาบสามารถคำนวณได้เมื่อทราบค่าหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งอัดแน่นของมวลรวม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบคอนกรีตแบบดั้งเดิมของ ACI 211.1 แล้วพบว่า ปริมาตรของมวลรวมหยาบที่เหมาะสมของคอนกรีตกำลังสูงจะมีค่าสูงกว่า เนื่องจาก ACI 211.4R ได้พิจารณาว่าส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงจะมีปริมาณซีเมนต์สูงทำให้ต้องลดสัดส่วนของมวลละเอียดลง และผลของขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่มีต่อความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตลดลงจนไม่จำเป็นต้องพิจารณาเป็นประเด็นสำคัญในการออกแบบ

ข. สัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

เนื่องจากส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงมักมีการใช้สารปอซโซลาน ซึ่งในที่นี้คือ เถ้าลอย ร่วมด้วย ดังนั้น ACI 211.4R จึงได้กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่มีความสอดคล้องกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตแทนการใช้สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังเช่นในวิธีการออกแบบของ ACI 211.1 ดังตารางที่ 2.10 โดยได้คำนึงถึงผลของการใช้สารลดน้ำพิเศษร่วมด้วย ซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงที่มีการใช้สารลดน้ำพิเศษจะมีกำลังอัดที่สูงกว่าในกรณีที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน โดย ACI 211.4R พิจารณาให้สารลดน้ำพิเศษทำหน้าที่ลดน้ำในส่วนผสมลงเมื่อคอนกรีตมีความสามารถทำงานได้เท่าเดิม

ค. ปริมาณน้ำในส่วนผสม

ในกรณีที่มีการใช้สารลดน้ำพิเศษ ปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงต้องเพียงพอที่จะทำให้คอนกรีตมีค่ายุบตัวเริ่มต้น และคอนกรีตจะต้องมีค่ายุบตัวตามต้องการในกรณีที่ไม่มีการใช้สารลดน้ำพิเศษ โดย ACI 211.4R ได้ให้ค่าประมาณของปริมาณน้ำที่มีความเหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 2.11 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ ค่ายุบตัว และขนาดโตสุดของมวลรวมที่ใช้ ซึ่งสามารถทำการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงให้มีค่าสูงสุดได้ 10 เซนติเมตร ในกรณีที่ไม่ใช้สารลดน้ำพิเศษ เมื่อได้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สัดส่วนการใช้เถ้าลอย และปริมาณน้ำในส่วนผสมแล้วจะสามารถทำการคำนวณปริมาณซีเมนต์ และเถ้าลอย ที่ต้องใช้ในส่วนผสมได้

ง. การปรับแต่งส่วนผสมด้วยสารเคมีผสมเพิ่ม

ACI 211.4R ได้ให้ข้อแนะนำว่า การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงให้มีค่ายุบตัวเริ่มต้นบ้างเล็กน้อยจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้สารลดน้ำพิเศษ กล่าวคือส่วนผสมควรจะมีน้ำที่เพียงพอสำหรับใช้ในการกระจายอนุภาคผงขณะผสมก่อนที่สารลดน้ำพิเศษจะเริ่มทำงานได้ สำหรับคอนกรีตกำลังสูงควรออกแบบให้มีค่ายุบตัวเริ่มต้นอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 5.0 เซนติเมตร และกำหนดอัตราการใช้งานสารลดน้ำพิเศษได้จากการทดลองผสม

จ. การทดลองผสม

แม้ว่าวิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงที่เสนอโดย ACI 211.4R จะสามารถใช้เป็นแนวทางที่ดีในการออกแบบ แต่ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของคุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ และวิธีการออกแบบที่เป็นวิธีทางเอมไพริกัลซึ่งได้จากผลการทดสอบ นอกจากนี้ยังถูกทำให้ง่ายโดยขาดการคำนึงถึงตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตบางประการ โดยเฉพาะคุณสมบัติในสภาวะเหลวซึ่งมีความสัมพันธ์กับมวลรวมที่ใช้เป็นอย่างมาก ดังนั้นในการออกแบบด้วยวิธีของ ACI 211.4R จึงมักต้องทำการปรับแต่งส่วนผสมโดยการทดลองผสมร่วมด้วยเสมอ

CEB-FIP[17] ได้ให้ข้อแนะนำกว้าง ๆ เกี่ยวกับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยมุ่งเน้นที่คุณสมบัติของวัสดุผสมที่ใช้งาน และสัดส่วนผสมที่พอเหมาะ เพื่อให้คอนกรีตสมรรถนะสูงที่ได้มีคุณสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์กำหนด ทั้งในด้านของการไหลตัว กำลังอัด และการควบคุมฉุณหภูมิ ดังนี้

ก. ขนาดคละของมวลรวม และคุณสมบัติของมวลรวม

มวลรวมที่ใช้สำหรับผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงควรเป็นมวลรวมหน่วยน้ำหนักปกติ มีขนาดโตสุดไม่เกิน 22 มิลลิเมตร หรือในบางกรณีอาจต่ำถึง 10 มิลลิเมตร โดยมวลรวมต้องมีความแข็งแรงเพียงพอ ซึ่งโดยทั่วไปมวลรวมควรมีกำลังบดอัดอยู่ระหว่าง 120 – 140 นิวตัน/ตร.มม. และรูปร่างของมวลรวมยังส่งผลต่อกำลังของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ซึ่งมวลรวมที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมจะเพิ่มความสามารถยึดเกาะต่อซีเมนต์เพสต์ซึ่งจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น อย่างไรก็ตามมวลรวมที่ทำให้คอนกรีตมีพฤติกรรมการไหลตัวที่ดีจะต้องมีรูปร่างลักษณะที่กลมมน ต้องการปริมาณน้ำน้อย โดยจะต้องควบคุมขนาดคละให้มีการกระจายอย่างต่อเนื่องเพื่อลดความเสี่ยงต่อการแยกตัวของส่วนผสมขณะเทลงแบบ

ข. สัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

CEB-FIP เสนอให้ใช้สมการของ Feret ในการกำหนดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์จากกำลังอัดของคอนกรีต โดยสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงโดยทั่วไปควรมีค่าระหว่าง 0.22 ถึง 0.40 ซึ่งจะทำให้ได้คอนกรีตสมรรถนะสูงที่มีกำลังอัดอยู่ที่อายุ 28 วัน อยู่ระหว่าง 60 ถึง 130 นิวตัน/ตร.มม. เมื่อใช้มวลรวมหน่วยน้ำหนักปกติ นอกจากนี้สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมยังต้องพิจารณาถึงผลของการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำจะมีการพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่า

ค. สัดส่วนผสมของมวลรวม

เนื่องจากส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงประกอบด้วยส่วนละเอียดสูงมีการยึดเกาะตัวที่ดี จึงแนะนำให้ส่วนผสมมีส่วนละเอียดต่ำ เพื่อมิให้ส่วนผสมมีความเหนียวหนืด โดยจะต้องรักษาส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 25 มิลลิเมตรให้มีค่าต่ำที่สุด

ง. การควบคุมฉุณหภูมิเพิ่ม

เพื่อควบคุมฉุณหภูมิเพิ่มที่เกิดขึ้น CEB-FIP แนะนำให้จำกัดปริมาณซีเมนต์มิให้สูงเกินไป โดยต้องใช้แร่ธาตุผสมเพิ่มประเภทซิลิก้าฟูม เพื่อรักษากำลังอัดของคอนกรีตไว้ให้เป็นไปตามเกณฑ์กำหนด โดยปริมาณซิลิก้าฟูมที่ใช้ไม่ควรสูงเกินกว่า 15% เนื่องจากจะส่งผลต่อความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต

จ. การปรับแต่งด้วยสารเคมีผสมเพิ่ม

CEB-FIP แนะนำให้ปรับแต่งส่วนผสมด้วยสารลดน้ำพิเศษในปริมาณสูง เพื่อเพิ่มความสามารถไหลตัวของคอนกรีต โดยที่ไม่สูญเสียสภาพความความหนืดพลาสติกไป อย่างไรก็ตามเมื่อส่วนผสมที่ได้มีความหนืดสูงเกินไปจะทำงานได้ยาก และต้องใช้พลังงานในการผสมสูง สามารถปรับปรุงได้โดยการใช้สารกักฟองอากาศ โดยต้องให้ความระมัดระวัง เพราะจำทำให้กำลังอัดตกลงประมาณ 1% ถึง 5% ในช่วงการใช้งานปกติ โดยปริมาณการใช้งานที่เหมาะสมขึ้นกับความสามารถทำงานได้ สัดส่วนผสม ซึ่งอัตราใช้งานที่เหมาะสมหาได้จากการทดลองผสม

2.3.3 ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมในงานวิจัย

เพื่อสามารถที่จะประกันได้ถึงคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูงทั้งในเรื่องของ การไหล กำลังอัด และอุณหภูมิเพิ่มภายใน งานวิจัยได้เสนอวิธีการที่เป็นระบบและมีความเป็นหนึ่งเดียว ซึ่งเหมาะสมกับการโปรแกรมด้วยคอมพิวเตอร์ โดยมีขั้นตอนแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งรายละเอียดในขั้นตอนต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

2.3.3.1 การคัดเลือกวัสดุผสม

กระบวนการคัดเลือกวัสดุผสม มีความสำคัญต่อการผลิตคอนกรีตในทุกประเภท วัสดุผสมที่มีคุณสมบัติดีเป็นไปตามข้อกำหนด จะมีศักยภาพสำหรับใช้ผลิตคอนกรีตที่มีคุณสมบัติที่ดีตามต้องการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับคอนกรีตสมรรถนะสูงต้องใส่ใจกับคุณภาพของวัสดุผสมที่ใช้ทุกประเภทอย่างเข้มงวด

ก. มวลรวมหยาบ

โดยทั่วไปแล้วมวลรวมที่ใช้สำหรับผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงควรจะมีคุณสมบัติทั่วไปสอดคล้องกับมาตรฐาน มอก.566-2528 หรือ ASTM C33 เป็นอย่างน้อย มวลรวมหยาบที่ใช้ต้องมีความแข็งแรงพอเพียง ปราศจากรอยแตกร้าวหรือระนาบที่อ่อนแอ มีความทนทาน มีเสถียรภาพเชิงมิติ สะอาดและปราศจากสารเคลือบผิวที่มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวกับมอร์ตาในสภาวะแข็งตัว และต้องไม่ก่อให้เกิดปฏิกริยาใด ๆ อันเป็นผลเสียต่อคอนกรีต

ในการกำหนดขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบที่ใช้นั้น ACI 211.1 กำหนดให้ใช้ขนาดโตสุดของมวลรวมไม่เกิน 1 ใน 5 ของด้านแคบที่สุดของแบบหล่อ หรือ 1 ใน 3 ของความหนาของแผ่นพื้น หรือ 3 ใน 4 ของระยะห่างภายใน ของเหล็กเสริม กลุ่มของเหล็กเสริม หรือลวดอัดแรง นอกจากนี้สำหรับคอนกรีตกำลังสูงแล้ว การกำหนดขนาดโตสุดของมวลรวมที่ใช้ยังต้องมีความเหมาะสมกับกำลังอัดของคอนกรีตที่ต้องการ จากข้อแนะนำของ ACI 211.4R เสนอให้ใช้มวลรวมที่มีขนาดโตสุดระหว่าง 3 /4 ถึง 1 นิ้ว สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดไม่เกิน 612 กก./ตร.ซม. (9,000 psi) และให้ใช้ขนาดโตสุดของมวลรวมระหว่าง 3 /8 ถึง 1 /2 นิ้วสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่า 612 กก./ตร.ซม.

ข. มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดที่ใช้ต้องสะอาดปราศจากสารเจือปน โดยเฉพาะสารอินทรีย์ซึ่งจะส่งผลกระทบอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต ขนาดคละ และลักษณะรูปร่างของมวลรวมละเอียดจะส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติในสภาวะเหลวของคอนกรีต มวลรวมละเอียดที่ใช้ควรมีลักษณะกลมมนและมีผิวเรียบ ได้แก่ ทรายแม่น้ำ ในเรื่องของขนาดคละนั้น ACI Committee 363[34] แนะนำว่า เนื่องจากการผลิตคอนกรีตกำลังสูงนั้นต้องใช้ปริมาณซีเมนต์ที่สูง ดังนั้นควรลดส่วนละเอียดของมวลรวมละเอียดที่ใช้ลงโดยที่ปริมาณที่ผ่านตะแกรงหมายเลข 50 และ 100 ควรให้มีค่าต่ำ แต่ต้องมีขนาดคละอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของ ASTM C33 สำหรับการผลิตคอนกรีตกำลังสูงแล้ว ACI 211.4R แนะนำว่าควรจะควบคุมมวลรวมละเอียดที่ใช้ให้มีค่าโมดูลัสความละเอียด อยู่ในช่วงระหว่าง 2.5 ถึง 3.2 การใช้มวลรวมละเอียดที่มีค่าโมดูลัสความละอียดต่ำเกินไปจะทำให้ส่วนผสมที่ได้มีความเหนียวหนืด ยากแก่การทำงานและมีความต้องการน้ำสูง ในขณะเดียวกันมวลรวมที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดสูงจะทำให้ส่วนผสมที่ได้หยาบยากแก่การแต่งผิว และส่วนผสมที่ได้จะมีความเสี่ยงต่อการแยกตัว สูงกว่าโดยเฉพาะส่วนผสมมีความข้นเหลวสูง

ค. ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ใช้ควรมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของ มอก.15-2523 หรือ ASTM C150 การเลือกประเภทของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ใช้ต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ในการใช้งาน เนื่องจากปอร์ตแลนด์ซีเมนต์แต่ละชนิดต่างมีลักษณะเฉพาะตัวและส่งผลต่อคอนกรีตที่แตกต่างกัน ได้แก่ ผลต่อการพัฒนากำลังอัด ความสามารถทำงานได้ และความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกริยาไฮเดรชั่น โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์ที่ใช้ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี และความละเอียดของซีเมนต์

ง. น้ำผสมคอนกรีต

โดยทั่วไป น้ำที่มีคุณภาพเป็นไปตามข้อกำหนดของ มอก.213-2520 หรือ ASTM C94 สามารถใช้ผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงได้ ในกรณีที่มีข้อสงสัยเกี่ยวกับคุณภาพน้ำที่นำมาใช้ผสม สามารถทำการทดสอบได้โดยเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตามาตรฐานตามวิธีการทดสอบของ ASTM C109 ที่อายุ 7 และ 28 วัน หากกำลังอัดของมอร์ตาที่มีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของมอร์ตามาตรฐานที่ผสมด้วยน้ำกลั่นก็สามารถยอมรับให้ใช้น้ำนั้นผสมคอนกรีตได้

จ. สารเคมีผสมเพิ่ม

สารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ควรมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของ มอก.733-2530 หรือ ASTM C494 การคัดเลือกสารเคมีผสมเพิ่มต้องพิจารณาถึงประสิทธิภาพของสารเคมีผสมเพิ่มชนิดนั้น ๆ กล่าวคือ ต้องมีสมรรถนะในการทำงานที่ดี และมีค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม ในการใช้สารเคมีผสมเพิ่มยังต้องคำนึงถึงผลกระทบอื่น ๆ นอกเหนือจากหน้าที่หลักของสารผสมเพิ่มที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ซึ่งมักเกิดขึ้นในกรณีที่ใช้ในอัตราที่สูง หรือต่ำกว่าคำแนะนำโดยผู้ผลิต นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงความสอดคล้องระหว่างสารเคมีผสมเพิ่มและซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของสารเคมีผสมเพิ่ม

อัตราการใช้สารเคมีผสมเพิ่มมีความผันแปรอย่างมากต่อ คุณสมบัติของวัสดุผสม ส่วนผสม วิธีการผสม และสภาวะแวดล้อม ซึ่งควรทดสอบการใช้งานในสภาวะที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงเพื่อประเมินอัตราการใช้งานที่เหมาะสมต่อการปรับแต่งคุณสมบัติของคอนกรีต

ฉ. แร่ธาตุผสมเพิ่ม

เถ้าลอยที่ใช้ควรมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของ ASTM C 618 โดยปกติแล้วเถ้าลอยชนิดเดียวกันซึ่งมีแหล่งที่มาต่างกันหรือแม้แต่มาจากแหล่งเดียวกันจะมีความแปรผันขององค์ประกอบทางเคมีค่อนข้างมากซึ่งทำให้คุณสมบัติของเถ้าลอยมีความแปรผันสูงมาก ในการใช้งานต้องทำการทดสอบคุณสมบัติอย่างละเอียด รวมทั้งศึกษาถึงผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยเฉพาะการใช้เถ้าลอยทดแทนซีเมนต์บางส่วนต้องคำนึงถึงผลต่อการพัฒนากำลังอัดและความทนทานของคอนกรีต เพื่อกำหนดสัดส่วนการใช้งานที่เหมาะสม

โดยปกติแล้วเถ้าลอยจะช่วยปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตเนื่องจากรูปร่างที่มีความกลมมน อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าลอยที่มีการคัดขนาด ซึ่งมีความละเอียดสูงจึงมีความต้องการน้ำสูงกว่าซีเมนต์ ซึ่งจะลดความ

I18831461

สามารถทำงานได้ของคอนกรีตลง ดัชนีหนึ่งที่ใช้พิจารณาได้คือ ความละเอียด หรือค่าพื้นที่ผิวจำเพาะแบบเบลนน์ ซึ่งทดสอบได้ตามวิธีมาตรฐานของ ASTM C 204

ซิลิก้าฟูมที่ใช้ควรมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของ ASTM C1240 อย่างไรก็ตามเนื่องจากซิลิก้าฟูมมีองค์ประกอบที่บริสุทธิ์ทำให้องค์ประกอบและคุณสมบัติของซิลิก้าฟูมไม่แปรผันมากเหมือนเถ้าลอย โดยปกตินิยมการใช้ซิลิก้าฟูมเพื่อทดแทนซีเมนต์บางส่วนจะไม่ส่งผลกระทบต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมากนัก แต่เนื่องจากซิลิก้าฟูมมีความละเอียดสูงจึงต้องการน้ำสูงกว่าซีเมนต์มาก การใช้ซิลิก้าฟูมผสมในปริมาณสูงจะลดความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตลง ซึ่งทำให้ต้องเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้เพื่อรักษาความสามารถทำงานได้

2.3.3.2 การผสมมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด

มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดต้องถูกผสมในสัดส่วนที่พอเหมาะ ซึ่งทำให้ขนาดคละร่วมอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง การคำนวณสัดส่วนผสมดังกล่าวสามารถทำได้โดยวิธีการ Least square ซึ่งจะทำให้ขนาดคละร่วมของมวลรวมใกล้เคียงกับค่ากลางของข้อกำหนดมากที่สุด อย่างไรก็ตามในกรณีที่ต้องใช้มวลรวมพิเศษเพื่อปรับปรุงขนาดคละของมวลรวมที่มีอยู่สามารถทำได้โดยวิธีการ Simplex ซึ่งจะได้ขนาดคละมวลรวมที่อยู่ภายใต้ข้อกำหนด และยังได้คำนึงถึงปัจจัยทางเศรษฐศาสตร์ร่วมด้วย ภาพรวมของกระบวนการคำนวณแสดงได้ดังรูปที่ 2.12

2.3.3.3 การกำหนดปริมาณซีเมนต์ และสัดส่วนการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลาน

ปริมาณซีเมนต์มีผลต่อความทนทาน กำลังอัด และอุณหภูมิเพิ่มของคอนกรีต อย่างไรก็ตามการกำหนดปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมไม่สามารถทำได้โดยตรง เนื่องจากยังมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในส่วนผสม ซึ่งต้องควบคุมให้มีเพียงพอต่อการขุบตัวเริ่มต้น การออกแบบจะกำหนดปริมาณซีเมนต์เริ่มต้น ซึ่งมีค่าไม่ต่ำกว่าข้อกำหนดของความทนทาน และไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มที่เกิดขึ้นสูงเกินกว่าเกณฑ์กำหนด ในกรณีที่ต้องการลดอุณหภูมิเพิ่มของส่วนผสมให้มีค่าต่ำเพื่อใช้ในงานคอนกรีตหลา จะต้องใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ โดยสัดส่วนการแทนที่ ๆ เหมาะสมมีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิเพิ่ม และกำลังอัดของคอนกรีตตามอายุ นอกจากนี้ในการผลิตคอนกรีตที่กำลังอัดสูงมากจำเป็นต้องใช้ซิลิก้าฟูมแทนที่ซีเมนต์บางส่วน ซึ่งสัดส่วนการแทนที่ ๆ เหมาะสมกำหนดได้จากกำลังอัดตามอายุของคอนกรีต

2.3.3.4 คำนวณสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์หรือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้

สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ของส่วนผสมจะถูกกำหนดให้สอดคล้องกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ต้องการ และอยู่ภายใต้ของกำหนดของความทนทาน ในกรณีที่มีการใช้สารปอซโซลานเพื่อทดแทนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสม จะต้องพิจารณาถึงคุณลักษณะของสารปอซโซลานที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีต ในการออกแบบจะถือว่าสารปอซโซลานทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานเทียบเท่าซีเมนต์ แต่เนื่องจากประสิทธิภาพในการพัฒนากำลังอัดของสารปอซโซลานแตกต่างจากซีเมนต์ตามประเภทและชนิดของสารปอซโซลานที่ใช้ จึงต้องพิจารณาถึงผลของสารปอซโซลานแต่ละชนิดที่มี

ต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยใช้ฟังก์ชั่นปรับแก้วัสดุประสาน ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่มีส่วนผสมของ เถ้าลอย หรือ ซิลิก้าฟูม เพื่อให้สามารถทำการคำนวณหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สอดคล้องกับกำลังอัด โดยไม่จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่างอัตส่วนน้ำต่อซีเมนต์และกำลังอัดที่มีอยู่เดิม ซึ่งจะเพิ่มความสะดวกในการคำนวณได้มาก

2.3.3.5 ตรวจสอบค่ายุบตัวเริ่มต้นของส่วนผสม

เพื่อให้คอนกรีตสมรรถนะสูงมีค่ายุบตัวเริ่มต้นเป็นไปตามความต้องการ ส่วนผสมต้องมีปริมาณน้ำที่เพียงพอ การพิจารณาปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในส่วนผสมทำได้โดยการใช้ค่าประมาณจากวิธีการออกแบบส่วนผสมแบบดั้งเดิม อย่างไรก็ตามสำหรับการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงนั้น คุณสมบัติและปริมาณของมวลรวมและวัสดุผงที่ใช้ในส่วนผสมจะส่งผลต่อความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตอย่างมาก การพิจารณาจากค่าประมาณที่กำหนดโดยวิธีการแบบดั้งเดิมนั้นจะก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้มาก

หลักการของน้ำอิสระ ได้ถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณปริมาณน้ำที่ส่วนผสมต้องการ แทนการประมาณโดยใช้ค่าทางเอมไพริกัลที่เสนอโดยวิธีการแบบดั้งเดิม ซึ่งในวิธีการนี้ได้พิจารณาถึงผลของ ขนาดคละ รูปร่าง และช่องว่างขณะอัดแน่นของมวลรวม ร่วมกับผลของการกักเก็บน้ำของวัสดุผง ผลที่ได้จึงมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น โดยโปรแกรมจะคำนวณค่าการยุบตัวจากส่วนผสมที่มีอยู่หากไม่เพียงพอจะไปเพิ่มปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมแล้วออกแบบส่วนผสมใหม่ จะทำเช่นนี้จนกระทั่งส่วนผสมมีน้ำเพียงพอที่จะเกิดค่ายุบตัวเริ่มต้นตามต้องการได้

2.3.3.6 ปรับแต่งส่วนผสมด้วยสารเคมีผสมเพิ่ม

ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ต้องเติมในส่วนผสมมีความสัมพันธ์กับค่ายุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีต คอนกรีตที่มีค่ายุบตัวเริ่มต้นสูงจะต้องการสารลดน้ำพิเศษในปริมาณที่ต่ำเพื่อเพิ่มความสามารถในการไหล ดังที่ ACI 211.4R ได้แนะนำว่า การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงให้มีค่ายุบตัวเริ่มต้นบ้างเล็กน้อยจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้สารลดน้ำพิเศษ กล่าวคือส่วนผสมควรจะมีน้ำที่เพียงพอสำหรับใช้ในการกระจายอนุภาคผงขณะผสมก่อนที่สารลดน้ำพิเศษจะเริ่มทำงานได้ สำหรับคอนกรีตกำลังสูงควรออกแบบให้มีค่ายุบตัวเริ่มต้นอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 5.0 เซนติเมตร ซึ่งการออกแบบส่วนผสมให้มีค่ายุบตัวเริ่มต้นมากเกินไปจะทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวในสภาวะแข็งตัวมีค่าสูง และเป็นการลดความทนทานของคอนกรีตลง

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงมากนั้น โดยปกติไม่นิยมให้ส่วนผสมมีค่ายุบตัวเริ่มต้นเนื่องจากต้องลดอัตส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ให้มีค่าต่ำมาก ซึ่งในกรณีนี้ทำให้ต้องใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณสูงกว่าปกติเพื่อเพิ่มความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตตามข้อกำหนดของการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง แต่สำหรับคอนกรีตไหล ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ซีเมนต์ในปริมาณที่สูง ประกอบกับคอนกรีตไม่ต้องการกำลังอัดมากนัก ดังนั้นเพื่อให้เกิดความประหยัดจึงนิยมทำการออกแบบให้ส่วนผสมมีค่ายุบตัวเริ่มต้นที่พอเหมาะ โดยสามารถใช้สารลดปริมาณน้ำแบบดั้งเดิมทดแทนการใช้สารลดน้ำพิเศษได้บางส่วน และเพื่อให้คอนกรีตคงความสามารถทำงานได้ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้สารหน่วงการก่อตัวร่วมด้วย อย่างไรก็ตามการใช้สารลดปริมาณน้ำแบบดั้งเดิมในอัตราที่สูงเกินไป (ค่าแนะนำให้ใช้อยู่

ระหว่าง 0.2 – 0.6% โดยน้ำหนักของซีเมนต์) มักจะก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ได้แก่ การหน่วงระยะเวลาการก่อตัว และฟองอากาศที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น

จากการวิเคราะห์ผลทดสอบคุณสมบัติในสภาวะเหลวของคอนกรีตสมรรถนะสูง สามารถสร้างสมการสำหรับใช้คำนวณปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ต้องใช้ปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่มีการยุบตัวเริ่มต้นต่าง ๆ กันได้ จะเป็นการลดภาระของผู้ออกแบบในการทดลองผสมลงได้มาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดคุณสมบัติคอนกรีตไหลตามมาตรฐานของ ASTM C1017

	Type I Plasticizing	Type II Plasticizing and Retarding
Time of setting, allowable deviation from Reference, h		
Initial: at least not more than	...	1 later
	1 earlier nor 1½ later	3½ later
Final: at least not more than	...	...
	1 earlier nor 1½ later	3½ later
Increase in slump, in., min	3.5	3.5
Compressive strength, min., % of reference		
3 days	90	90
7 days	90	90
28 days	90	90
6 months	90	90
1 year	90	90
Flexural strength, min., % of reference		
3 days	90	90
7 days	90	90
28 days	90	90
Length change after 14 days drying, max. shrinkage (alternative requirements):[B]		
% of reference	135	135
Increase over reference, in.	0.010	0.010
Relative durability factor, min.[C]	80	80

[A] The values in the table include allowance for normal variation in the test results. The object of the 90 % strength requirements is to require a level of performance comparable to that of the reference concrete.

[B] *Alternative Requirements*—Percent of reference limit applies when length change of reference is 0.030 % or greater; increase over reference limit applies when length change of reference is less than 0.030 %.

[C] The requirement is applicable only when the admixture is to be used in air-entrained concrete which may be exposed to freezing and thawing while wet.

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของส่วนประกอบหลักในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

	Alite	*Belite*	*Aluminate Phase*	*Celite*
Approximate chemical composition	Tricalcium silicate $3CaO.SiO_2$ (C_3S)	Dicalcium silicate $2CaO.SiO_2$ (C_2S)	Tricalcium aluminate $3CaO.Al_2O_3$ (C_3A)	Tetracalcium aluminoferrite $4CaO.Fe_2O_3.Al_2O_3$ (C_4AF)
Setting	Rapid (hours)	Slow (days)	Instantaneous	Very rapid (minutes)
Strength development	Rapid (days)	Slow (weeks)	Very rapid (1 day)	Very rapid (1 day)
Ultimate strength	High: 10s of MPa	Probably high: 10s of MPa	Low: a few MPa	Low: a few MPa
Heat of hydration	Medium: ~500 J/g	Low: ~250 J/g	Very high: ~850 J/g	Medium: ~420 J/g
Remarks	Characteristic constituent of Portland cements		Unstable in water, vulnerable to sulphate attack	Imparts to the cement its characteristic grey colour

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบหลักทางเคมีของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ ตาม ASTM C150

ASTM type	*Tricalcium silicate (C_3S) (%)*	*Dicalcium silicate (C_2S) (%)*	*Tricalcium aluminate (C_3A) (%)*	*Tetracalcium aluminoferrite (C_4AF)[b] (%)*	*Air permeability specific surface area (m^2/kg)*
I	42–65	10–30	0–17	6–18	300–400
II	35–60	15–35	0–8	6–18	280–380
III	45–70	10–30	0–15	6–18	450–600
IV	20–30	50–55	3–6	8–15	260–320
V	40–60	15–40	0–5	10–18	290–350

ตารางที่ 2.4 ขอบเขตขนาดคละของมวลรวมสำหรับการปั๊มพ์คอนกรีต [6.7]

ขนาดตะแกรง	มาตรฐานขนาดคละมวลรวม			
	ACI 304		DIN 1045	ASTM C 33
	MSA = 3/4	MSA = 1"	MSA = 16 มม.	S/A = 0.40
1"		100		100
3/4"	100	80-88	100	94-100
1/2"	75-83	64-75		
3/8"	62-74	55-70	70-91	52-73
# 4	39-56	39-56	43-77	38-46
# 8	28-47	28-47	25-65	32-43
# 16	18-35	18-35	14-52	20-34
# 30	12-25	12-25	8-37	10-24
# 50	7-15	7-15	4-21	4-12
# 100	3-8	3-8	1-5	0.8-4

ตารางที่ 2.5 การจำแนกประเภทของสารเคมีผสมเพิ่มตามมาตรฐาน มอก.733-2530 หรือ ASTM C494

ประเภท	รายละเอียด
A	สารลดปริมาณน้ำ (Water - Reducing)
B	สารยืดเวลาการก่อตัว (Retarding)
C	สารเร่งเวลาการก่อตัวและแข็งตัว (Accelerating)
D	สารลดปริมาณน้ำและยืดเวลาการก่อตัว (Water - Reducing and Retarding)
E	สารลดปริมาณน้ำและเร่งเวลาการก่อตัว(Water - Reducing and Accelerating)
F	สารลดปริมาณน้ำพิเศษ (Water - Reducing and High Range)
G	สารลดปริมาณน้ำพิเศษและยืดเวลาการก่อตัว (Water - Reducing , High Range)

ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 กับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา

Component Property	Class N	Class F	Class C	OPC	Mae-Moh Fly Ash [9]
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$, min%	70.0	70.0	50.0	29.80	67.12
SO_3, max %	4.0	5.0	5.0	2.31	3.64
CaO %		<10%	>10%	67.33	22.62
Moisture Content, max %	3.0	3.0	3.0		0.25
Loss of Ignition, max %	10.0	6.0-12.0	6.0	0.58	0.20

ตารางที่ 2.7 อัตราการใช้เถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ตามคำแนะนำของ ACI 211.4R [31]

Fly ash	Recommended replacement (percent by weight)
Class F	15 to 25
Class C	20 to 35

ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และซิลิก้าฟูม

Chemical Composition	Cement (%)	Fly Ash (%)	Silica Fume (%)
SiO_2 Silica	21.3	49.0	92-98
Al_2O_3	4.5	24.6	0.5
Fe_2O_3	4.0	7.3	2.1
MgO	2.4	1.6	0.3
CaO	63.1	9.1	0.8
Na_2O	0.1	0.2	0.1
K_2O	1.2	0.6	1.0
SO_3	2.2	0.4	0.2

ตารางที่ 2.9 ปริมาตรของมวลรวมหยาบที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตกำลังสูงโดยวิธีของ ACI 211.4R [31]

Optimum coarse aggregate contents for nominal maximum sizes of aggregates to be used with sand with fineness modulus of 2.5 to 3.2				
Nominal maximum size, in.	⅜	½	¾	1
Fractional volume* of oven-dry rodded coarse aggregate	0.65	0.68	0.72	0.75

* Volumes are based on aggregates in oven-dry rodded condition as described in ASTM C 29 for unit weight of aggregates.

ตารางที่ 2.10 (ก) อัตส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสำหรับคอนกรีตไม่ผสมสารลดน้ำพิเศษ [31]

Field strength f'_{cr}, psi		w/c + p			
		Maximum-size coarse aggregate, in.			
		⅜	½	¾	1
7000	28-day	0.42	0.41	0.40	0.39
	56-day	0.46	0.45	0.44	0.43
8000	28-day	0.35	0.34	0.33	0.33
	56-day	0.38	0.37	0.36	0.35
9000	28-day	0.30	0.29	0.29	0.28
	56-day	0.33	0.32	0.31	0.30
10,000	28-day	0.26	0.26	0.25	0.25
	56-day	0.29	0.28	0.27	0.26

ตารางที่ 2.10 (ข) อัตส่วนน้ำต่อวัสดุประสานหรับคอนกรีตผสมสารลดน้ำพิเศษ [31]

Field strength f_{cr}'*, psi		w/c + p			
		Maximum-size coarse aggregate, in.			
		⅜	½	¾	1
7000	28-day	0.50	0.48	0.45	0.43
	56-day	0.55	0.52	0.48	0.46
8000	28-day	0.44	0.42	0.40	0.38
	56-day	0.48	0.45	0.42	0.40
9000	28-day	0.38	0.36	0.35	0.34
	56-day	0.42	0.39	0.37	0.36
10,000	28-day	0.33	0.32	0.31	0.30
	56-day	0.37	0.35	0.33	0.32
11,000	28-day	0.30	0.29	0.27	0.27
	56-day	0.33	0.31	0.29	0.29
12,000	28-day	0.27	0.26	0.25	0.25
	56-day	0.30	0.28	0.27	0.26

ตารางที่ 2.11 ปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้สารลดน้ำพิเศษ เทียบส่วนจากปริมาณช่องว่างของมวลรวมละเอียดร้อยละ 35[31]

Slump, in.	Mixing water, lb/yd³			
	Maximum-size coarse aggregate, in.			
	⅜	½	¾	1
1 to 2	310	295	285	280
2 to 3	320	310	295	290
3 to 4	330	320	305	300
Entrapped air content*	3 (2.5)†	2.5 (2.0)	2 (1.5)	1.5 (1.0)

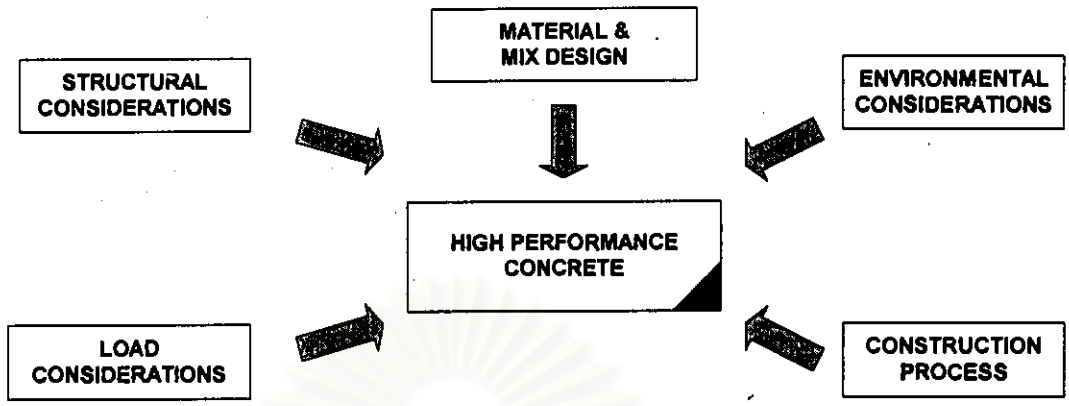
* Values given must be adjusted for sands with voids other than 35 percent using Eq. 4-3.

† Mixtures made using HRWR.

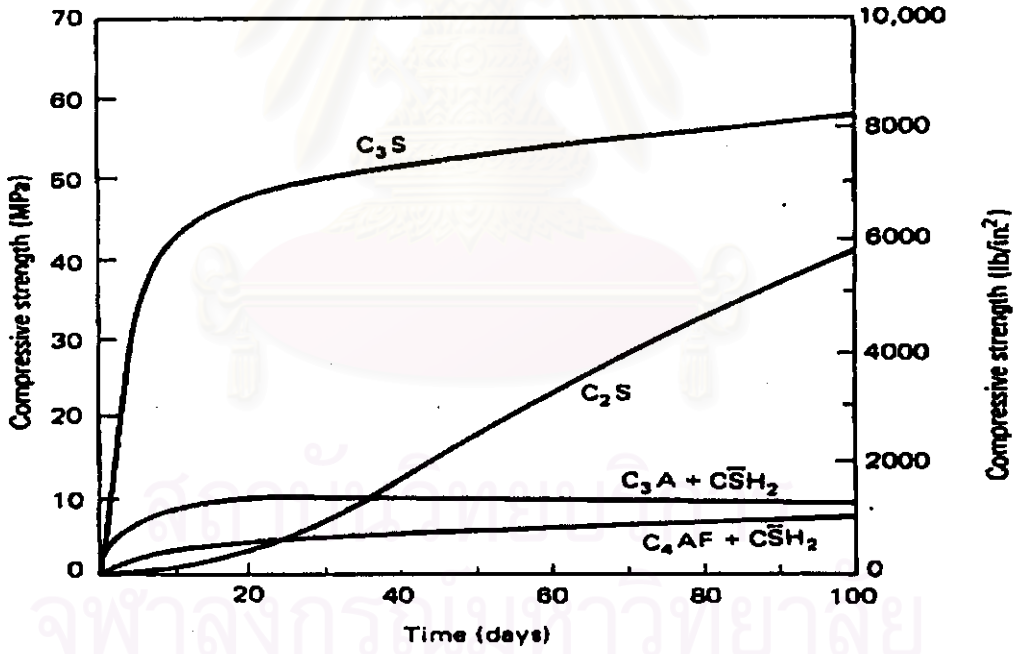
ตารางที่ 2.12 ขอบเขตขนาดคละมวลรวมสำหรับการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง (วิธีร่อนตะแกรง)[6,7]

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	ขีดจำกัดล่าง	ขีดจำกัดบน	ค่าเฉลี่ย
3 /4 นิ้ว (20 มม.)	98.16	100.00	99.1
3 /8 นิ้ว (10 มม.)	60.49	75.51	68
เบอร์ 4 (4.75 มม.)	45.44	50.56	48
เบอร์ 8 (2.36 มม.)	33.23	40.77	37
เบอร์ 16 (1.18 มม.)	19.10	32.90	26
เบอร์ 30 (600 ไมครอน)	9.34	22.66	16
เบอร์ 50 (300 ไมครอน)	4.91	11.09	8
เบอร์ 100 (150 ไมครอน)	1.34	4.66	3

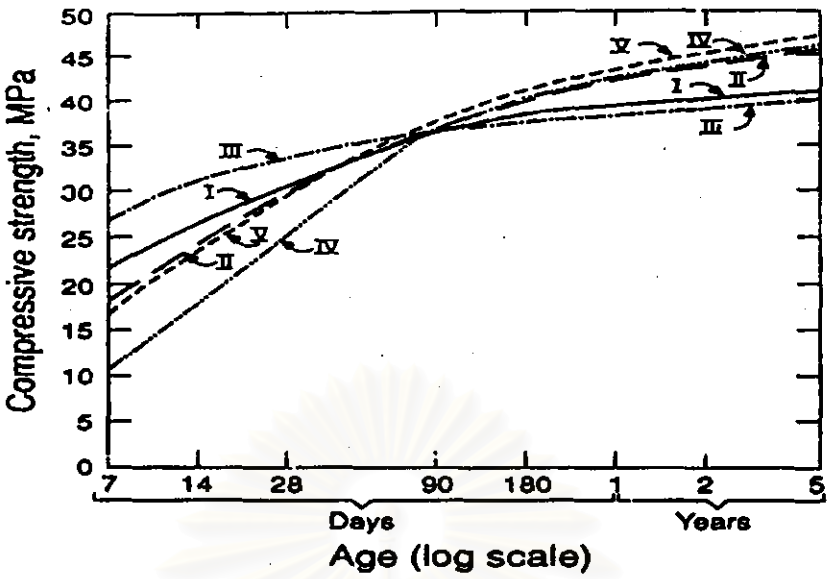
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



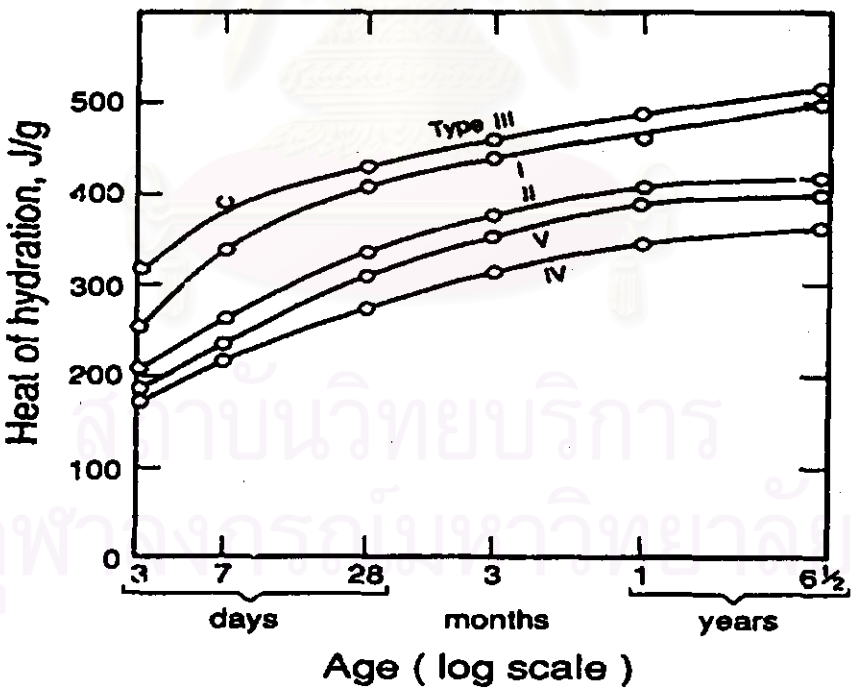
รูปที่ 2.1 การพิจารณาคุณสมบัติการใช้งานของคอนกรีตสมรรถนะสูงตาม FHWA [19]



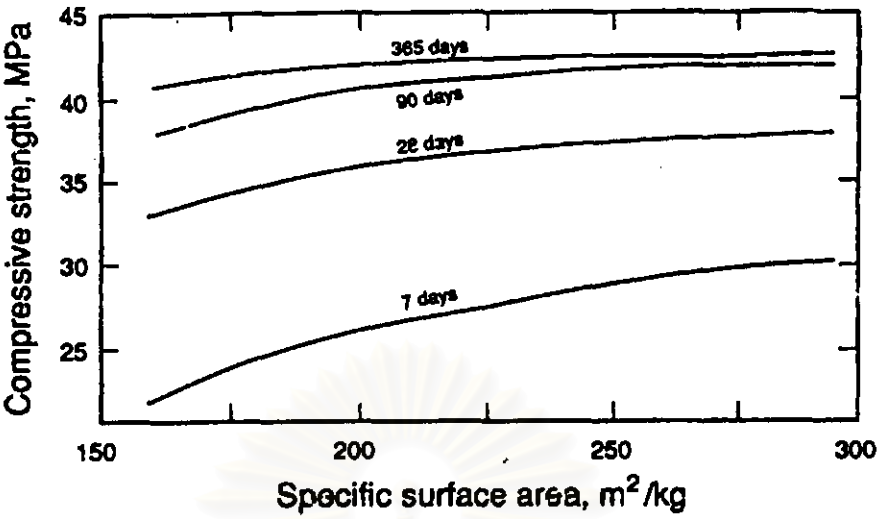
รูปที่ 2.2 การพัฒนากำลังอัดขององค์ประกอบหลักในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [24]



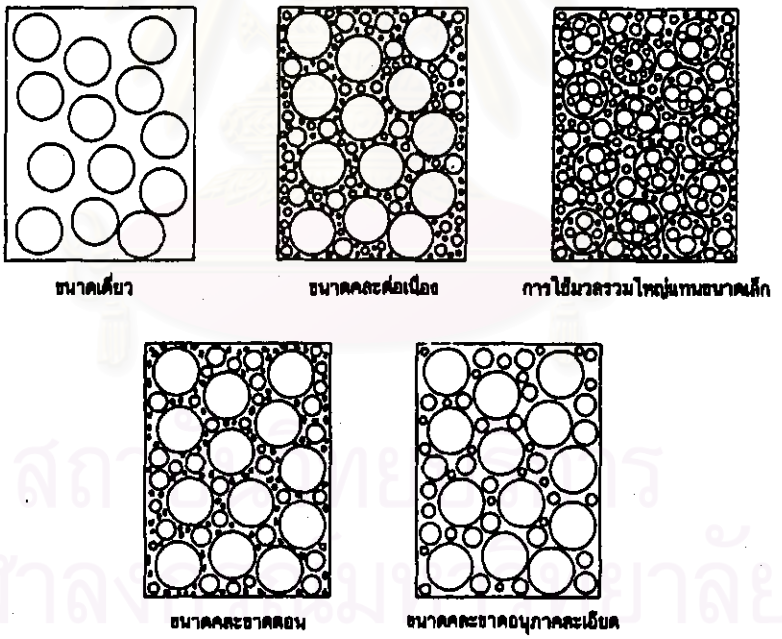
รูปที่ 2.3 การพัฒนากำลังอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ [25]



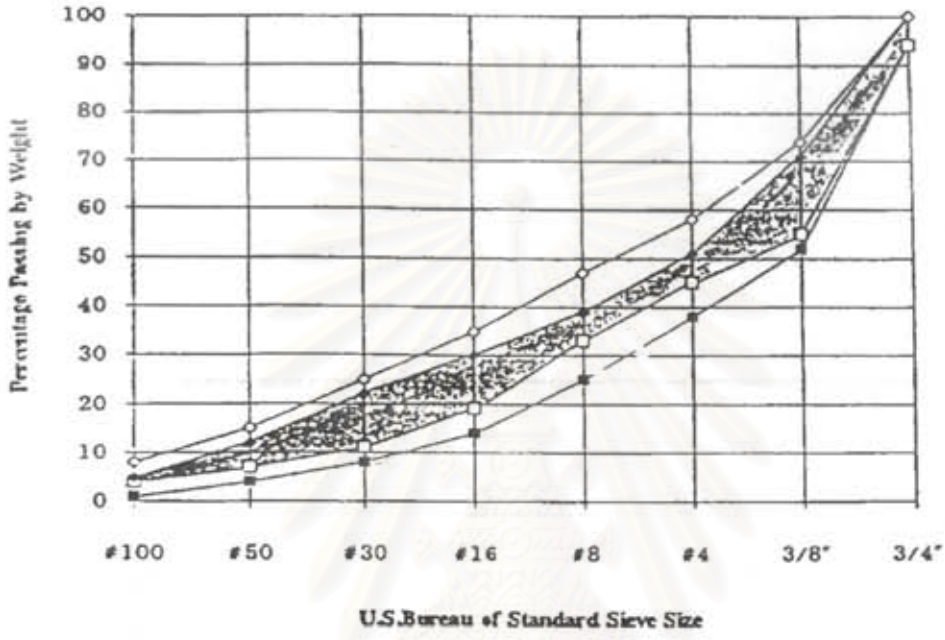
รูปที่ 2.4 การพัฒนาความร้อนจากปฏิกริยาไฮเดรชั่นของปูนปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ [26]



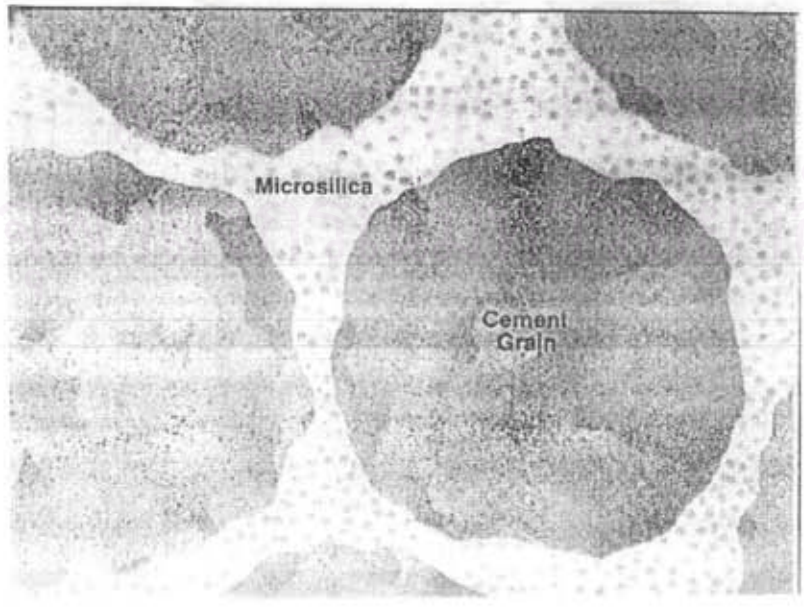
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะกับการพัฒนากำลังของปูนปอร์ตแลนด์ในคอนกรีต [27]



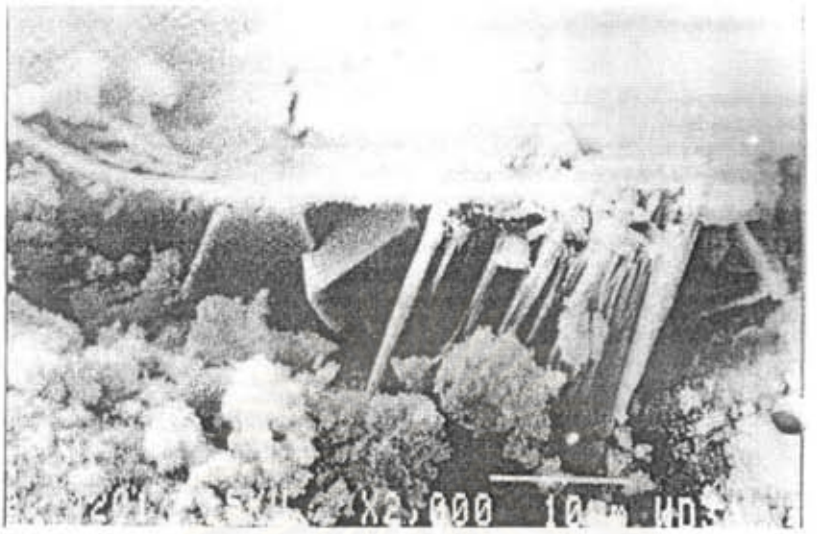
รูปที่ 2.6 ลักษณะการจัดเรียงตัว ของขนาดคละมวลรวม



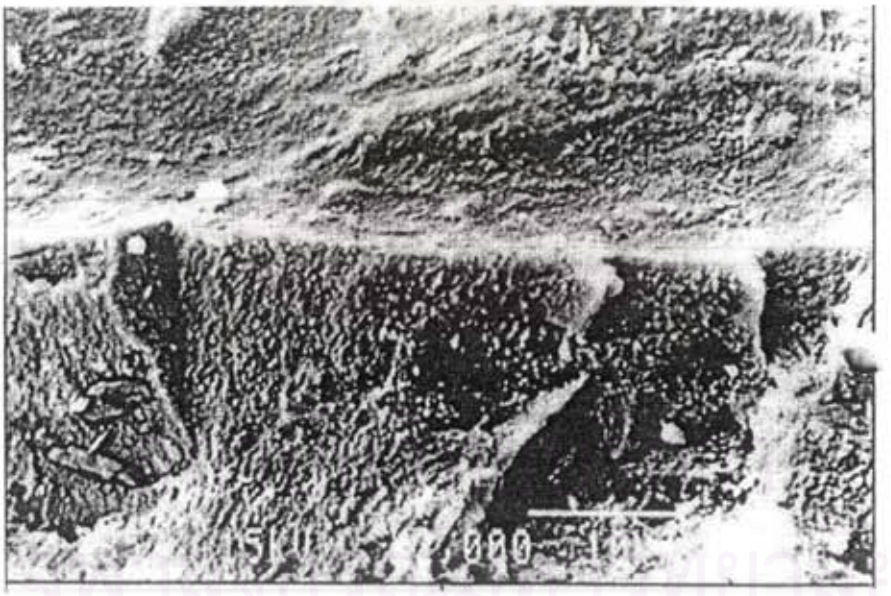
รูปที่ 2.7 ขอบเขตขนาดคละที่เหมาะสมของมวลรวมสำหรับผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง [6,7]



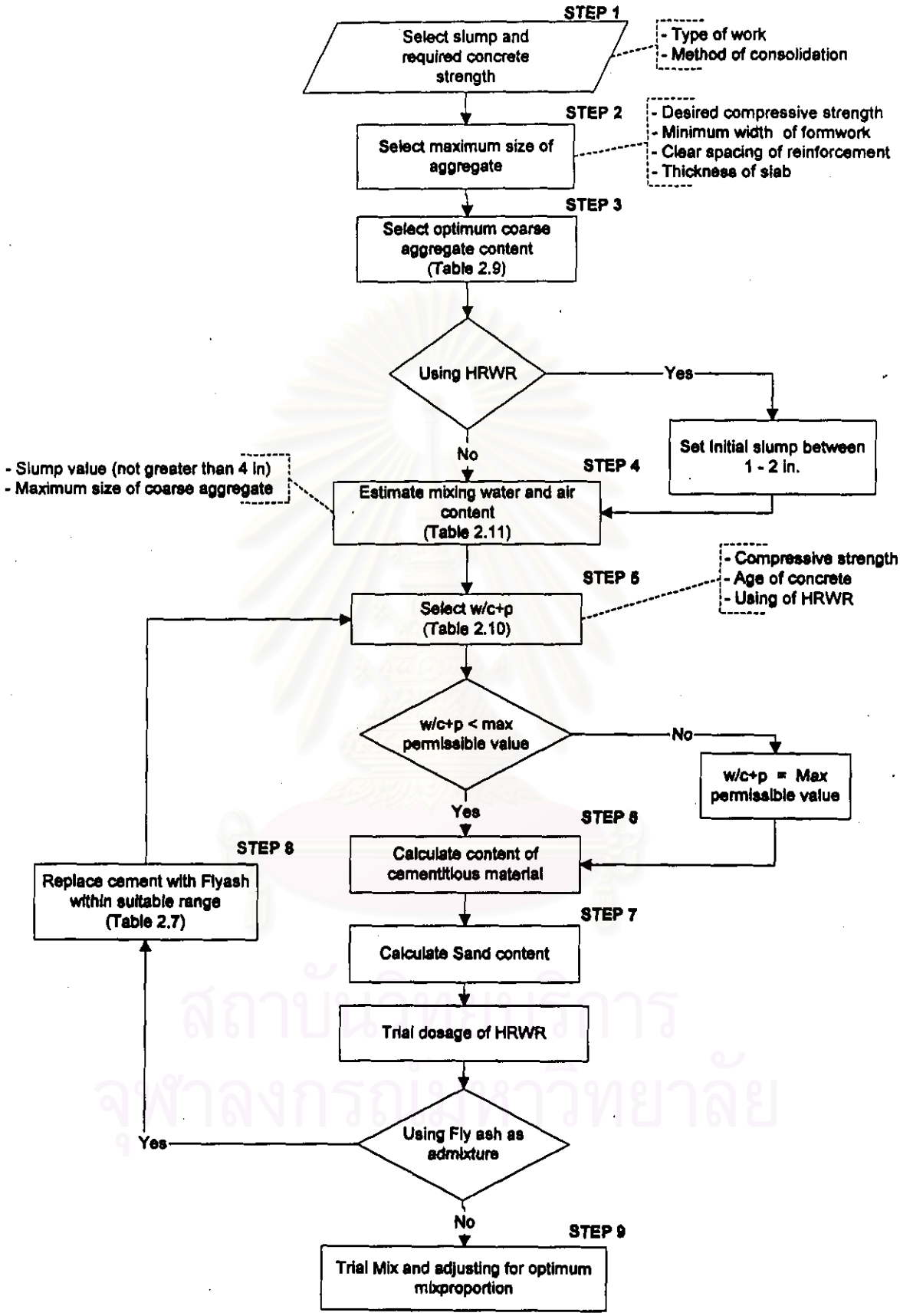
รูปที่ 2.8 การแทรกตัวของซิลิก้าฟูมระหว่างอนุภาคซีเมนต์



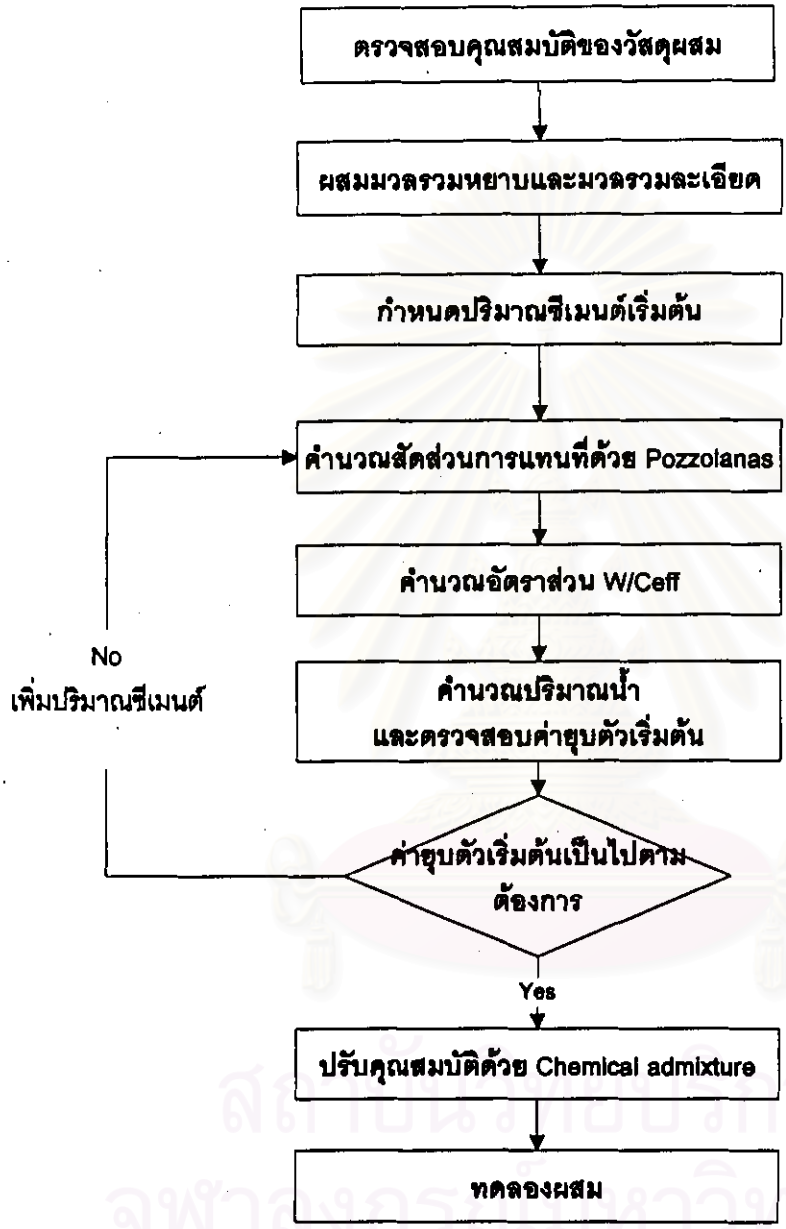
รูปที่ 2.9 (ก) ส่วนสัมผัสร่วมของคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิก้าฟูม



รูปที่ 2.9 (ข) ส่วนสัมผัสร่วมของคอนกรีตที่ผสมซิลิก้าฟูม

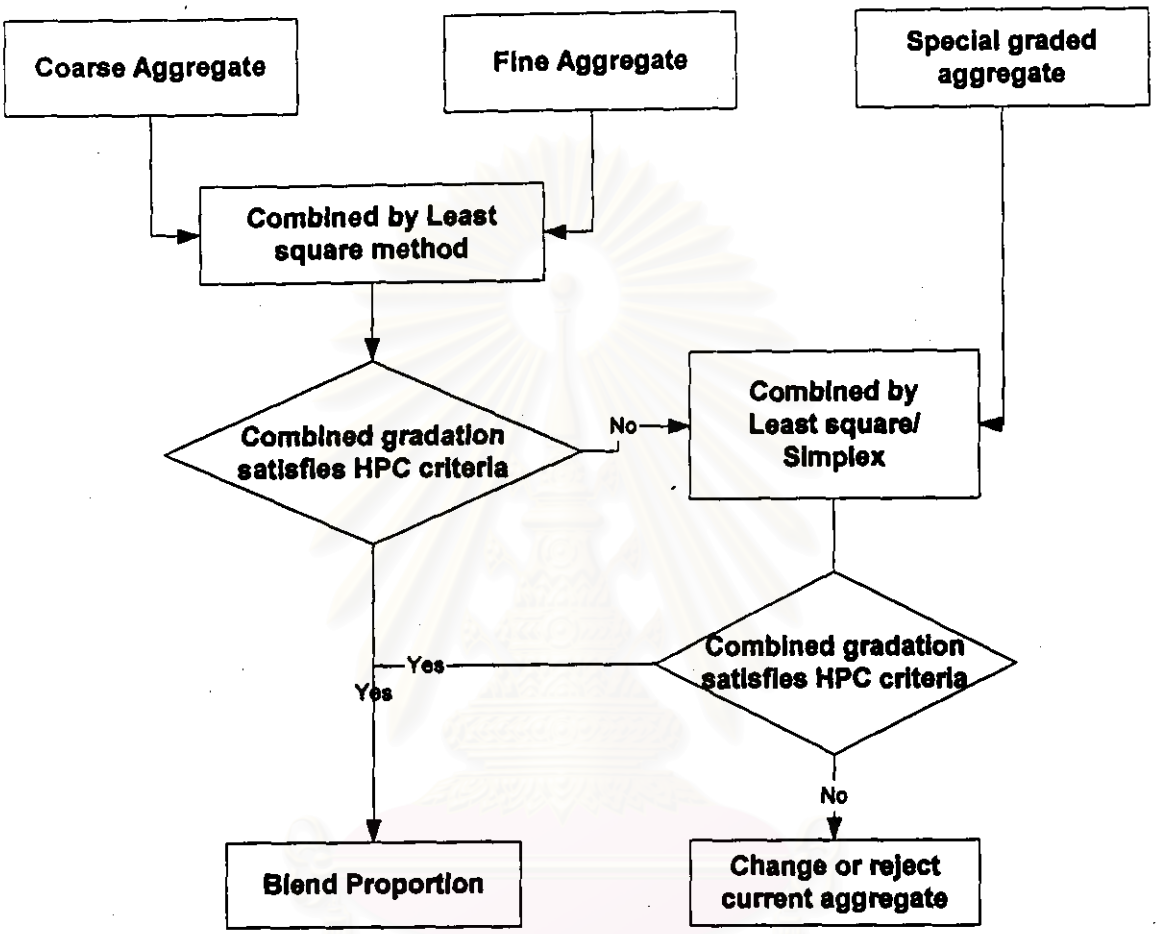


รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงโดยวิธีของ ACI 211.4 R



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงในงานวิจัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการผสมมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดด้วยโปรแกรม