



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การพัฒนา Reactive Powder Concrete

โดย รองศาสตราจารย์ ดร. บุรฉัตร จัตรวีระ และคณะ

สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

มิถุนายน 2554

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนา Reactive Powder Concrete

คณะผู้วิจัย สังกัด

- | | |
|--|-----------------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร. บุรฉัตร ฉัตรวีระ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 2. ร้อยเอก เอกพล บุญมาเลิศ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |

ชุดโครงการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย
สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

คำนำ

รายงานฉบับสมบูรณ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอสรุปผลการศึกษาดังแต่ (1 ตุลาคม พ.ศ. 2552 ถึง 30 กันยายน พ.ศ. 2553) ของโครงการ “การพัฒนา Reactive Powder Concrete” ตามสัญญาเลขที่ RDG5350003 ซึ่งได้รับการสนับสนุนทุนในการทำวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ในชุดโครงการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรมและบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) โดยมีร้อยเอก เอกพล บุญมาเลิศ นักศึกษาผู้ปฏิบัติการวิจัย

หนึ่งในรายงานฉบับนี้ประกอบด้วย 4 ส่วนหลักคือ ข้อมูลของโครงการ กระบวนการวิจัย สรุปผลการวิจัย และสรุปผลการวิจัยของโครงการ

บรรณัตร ฉัตรวีระ

มีนาคม 2554

Executive Summary

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโครงสร้าง คอนกรีตเป็นวัสดุที่ผสมขึ้นจากมวลรวมที่มีขนาดคละต่างกันและมีปูนซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน เมื่อปูนซีเมนต์ผสมน้ำด้วยสัดส่วนของมวลรวมที่เหมาะสมคอนกรีตจะอยู่ในสภาพของเหลวที่สามารถขึ้นรูปได้ตามความต้องการ อีกทั้งเมื่อคอนกรีตแข็งตัวมีคุณสมบัติทางกลในการรับกำลังอัดได้เป็นอย่างดีแต่สามารถรับกำลังดึงได้ต่ำมาก จึงได้มีการนำเหล็กมาช่วยเสริมกำลังต่างๆ ในโครงสร้างคอนกรีต แต่กระนั้นเหล็กก็เป็นวัสดุที่มีราคาสูงคอนกรีตจึงเป็นวัสดุหลักในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตยังมีความแตกต่างจากคุณสมบัติทางกลของเหล็กมากจึงทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากกว่าโครงสร้างเหล็ก จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนากำลังของคอนกรีตชนิดพิเศษขึ้นอย่างต่อเนื่อง

Reactive Powder Concrete คือ คอนกรีตที่มีซีเมนต์เป็นตัวประสานมวลรวมต่างๆจัดอยู่ในกลุ่มของ Ultra High Strength Concrete ที่มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 1,500 ถึง 2,000 กก./ซม.² โดยใช้อองค์ความรู้ทางด้านโครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตร่วมกับความรู้ทางด้านเคมีของปูนซีเมนต์และคอนกรีตโดยหลักการของ RPC คือทำให้คอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุดโดยไม่ใช้มวลรวมหยาบปรับปรุงความหนาแน่นอัดแน่นโดยการจัดสัดส่วนผสมให้แน่นที่สุดโดยใช้วิธีการออกแบบคอนกรีตแบบใหม่ ปรับปรุงโครงสร้างระดับจุลภาคเพื่อเพิ่มความคงทนในระยะยาว โดยการให้ความร้อนหลังการก่อตัวซึ่งช่วยทำให้การหดตัวน้อยลงและปรับปรุงความเหนียวให้ดีขึ้นโดยการผสมเส้นใยเหล็กขนาดเล็ก

โดยยึดแนวทางการออกแบบและพัฒนา Reactive Powder Concrete ตามแนวคิดของผู้ที่คิดค้นวัสดุนี้โดยการใช้วัสดุที่สามารถหาได้ภายในประเทศให้มากที่สุดเพื่อเป็นฐานความรู้ในการค้นคว้าวิจัยต่อไป และศึกษาถึงคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของ Reactive Powder Concrete ที่พัฒนาขึ้น เช่น กำลังอัด ดึง ดัด โมดูลัสยืดหยุ่น เป็นต้น เพื่อสามารถนำคุณสมบัติต่างๆ มาพิจารณาประกอบการใช้งาน Reactive Powder Concrete ตามความเหมาะสมต่อไป

จากการศึกษาสรุปได้ว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.23 สารลดน้ำร้อยละ 2.5 และซิลิกาฟูมร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ มอร์ตาร์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของมวลรวมละเอียดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน คือ 1,248 กก./ซม.² มีอัตราการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 116 ในขณะที่กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเส้นใยเหล็ก โดยเฉพาะที่ปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 4.0 โดยปริมาตร สามารถพัฒนากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน ได้ถึง 1,601 กก./ซม.²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยเหล็กและมวลรวมละเอียดที่มีต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์กำลังอัดสูง โดยเริ่มต้นจากการหาสัดส่วนซีเมนต์เฟสท์ที่เหมาะสมและพัฒนาไปใช้เป็น มอร์ตาร์กำลังสูงซึ่งควบคุมค่าการไหลแผ่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5 ตัวแปรที่ใช้คือ ปริมาณเส้นใยเหล็ก (ร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 4.0) โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียด (ทรายคัดขนาด 0.15 - 0.60 มม.) ที่ 1: 0.2 , 1: 0.4 , 1: 0.6 , 1: 0.8 , 1: 1.0 และ 1:1.2 โดยปริมาตรปูนซีเมนต์

จากผลการทดสอบ พบว่าสัดส่วนของซีเมนต์เฟสท์ที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.23 สารลดน้ำร้อยละ 2.5 และซิลิกาฟูมร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ มอร์ตาร์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของมวลรวมละเอียดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน คือ 1,248 กก./ซม.² มีอัตราการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 116 ในขณะที่กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเส้นใยเหล็ก โดยเฉพาะที่ปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 4.0 โดยปริมาตร สามารถพัฒนากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน ได้ถึง 1,601 กก./ซม.²

Abstract

The objective of this research was to investigate the influences of steel fiber and fine aggregate content upon the compressive strength of high strength mortar. Starting from the mix proportion of cement paste was optimized and developed using as a proportion of mortar which was controlled the specific flow value at $110\% \pm 5\%$. The studied parametric were steel fiber contents (0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%, 3.0%, 3.5% and 4.0%) by volume of Type I Portland cement and the binder materials-to-fine aggregate (graded river sand ratio in the range of 0.15 to 0.60 mm) ratio 1:0.2, 1:0.4, 1:0.6, 1:0.8, 1:1.0, 1:1.2 by volume.

From the test results, it was found that the optimal mix proportion of the paste of binder materials (w/c) 0.23, superplasticizer 2.5% by weight of Portland cement and condensed silica fume 5% by weight of Portland cement. The compressive strengths of mortars increased as increased graded river sand content and highest strength at 28 days of mortar with having a binder materials-to-fine aggregate of 1 : 0.8 by volume was 1248 kg/cm^2 , and specific flow value at 116% .Whereas the compressive strength mortar was also increased as increased steel fiber content. In particular, at the steel fiber content of 4 % by volume of Portland cement and the binding materials-to-fine aggregate of 1:0.8 by volume, the mortar can develop the compressive strength at the age of 28 days up to 1601 kg/cm^2 .

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทนำ.....	(1)
Executive Summary	(2)
บทคัดย่อ.....	(3)
Abstract	(4)
สารบัญ.....	(5)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญภาพประกอบ.....	(9)
ส่วนที่ 1 ข้อมูลของโครงการ.....	(11)
ส่วนที่ 2 รายงานกระบวนการทำวิจัย.....	(12)
ส่วนที่ 3 สรุปผลการวิจัยและเปรียบเทียบผลที่ได้รับ.....	(13)
 บทที่ 1 บทนำ.....	 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการศึกษา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	4
1.4 สมมุติฐานของการศึกษา.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการศึกษา.....	5
 บทที่ 2 ทฤษฎีและผลงานที่เกี่ยวข้อง.....	 6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1.1 สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
2.1.2 ปฏิกริยาไฮเดรชัน.....	6
2.1.3 ขั้นตอนการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชัน.....	8
2.1.4 ซิลิกาฟูม.....	10
2.1.5 ปฏิกริยาปอซโซลานิก.....	11
2.1.6 สารลดน้ำพิเศษ.....	11
2.1.7 กระบวนการอัดแน่น.....	12
2.1.8 การบ่ม.....	13
2.1.9 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น.....	14
2.1.10 ค่าอัตราส่วนปัวซอง.....	15
2.1.11 การหดตัวแบบออโตจีเนียส.....	15

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
2.1.12 การหัดตัวแบบแห้ง	16
2.1.13 กลไกการกัดกร่อนโดยโซเดียมซัลเฟต	17
2.1.14 กลไกการกัดกร่อนโดยแมกนีเซียมซัลเฟต	17
2.2 ผลงานที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	24
3.1 ทั่วไป	24
3.2 วิธีการจัดเก็บและรวบรวมข้อมูล	24
3.2.1 แนวทางการศึกษาและทดลอง	25
3.2.2 การแบ่งกลุ่มการทดลองและสัญลักษณ์ของส่วนผสม	29
3.2.3 ส่วนผสมและจำนวนตัวอย่างการทดสอบ	29
3.3 วิธีการทดสอบ	44
3.3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีและ ทดสอบสมบัติวัสดุที่ใช้	44
3.3.2 การหาระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์โดยเข็มไวกัด ASTM C191	45
3.3.3 การทดสอบหาความต้านทานแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ ASTM C109	46
3.3.4 การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตโดยวิธี (Splitting Tensile Test) ASTM C496	48
3.3.5 การทดลองกำลังดัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ ASTM C78	48
3.3.6 การทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซอง ASTM C469	50
3.3.7 การทดสอบโมดูลัสความเหนียว	53
3.3.8 การทดสอบการหัดตัวแบบแห้ง	55
3.3.9 การทดสอบการหัดตัวแบบอบไค้เนียส	56
3.3.10 การทดสอบความทนทานต่อซัลเฟต	56
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	60
4.1 ทั่วไป	60

สารบัญ

เรื่อง

หน้า

4.2 องค์ประกอบพื้นฐานของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	
ซิลิกาฟูม และสารลดน้ำ.....	60
4.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	60
4.2.2 ซิลิกาฟูม.....	62
4.2.3 สารลดน้ำ.....	63
4.2.4 ทรายละเอียด	64
4.3 สมบัติของซีเมนต์เพสต์.....	65
4.3.1 ระยะเวลาการก่อตัว	67
4.3.2 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์.....	68
4.4 สมบัติของ UHPC	71
4.4.1 กำลังอัดของ UHPC.....	71
4.4.2 ปริมาณของทรายละเอียดมีผลต่อการไหลแผ่.....	73
4.4.3 อิทธิพลร่วมของปริมาณเส้นใยเหล็กที่มีผลต่อกำลังอัดของ มอร์ตาร์.....	75
4.5 สมบัติของ Reactive powder concrete (RPC).....	78
4.5.1 กำลังอัด.....	78
4.5.2 กำลังดึง.....	79
4.5.3 กำลังตัด.....	80
4.5.4 โมดูลัสยืดหยุ่น.....	81
4.5.5 โมดูลัสความเหนียว.....	82
4.5.6 การหดตัวแบบแห้ง.....	83
4.5.7 การหดตัวแบบออโตจีเนียส.....	84
4.5.8 ความต้านทานต่อซัลเฟต.....	86
4.5.8.1 การขยายตัวในสารละลายซัลเฟต.....	86
4.5.8.2 การสูญเสียกำลังอัดและน้ำหนัก.....	87
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	91
บรรณานุกรม.....	93

สารบัญ

เรื่อง

หน้า

บทความ: การพัฒนา Ultra High Strength Mortar: อิทธิพลของปริมาณ

เส้นใยเหล็กและมวลรวมละเอียด

คอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 6 95

สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
1.1 การแบ่งประเภทของคอนกรีตตามความสามารถในการรับกำลังอัด.....	1
1.2 ส่วนผสมของ Reactive Powder Concrete	2
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูมที่ผ่านมาตรฐาน ASTM C1240	11
3.1 แนวทางการศึกษาและทดลอง	26
3.2 ส่วนผสมและจำนวนการทดสอบซีเมนต์เพสต์	30
3.3 แหล่งที่มาและการทดสอบวัสดุ.....	44
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	61
4.2 สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	62
4.3 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูม	64
4.4 อัตราส่วนผสมซีเมนต์เพสต์	66
4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ ตามสมการที่ (1)	77

สารบัญญภาพประกอบ

เรื่อง	หน้า
1.1 หน้าตัดของคาน RPC อัดแรงเทียบกับคานเหล็กที่มีกำลังดัดเท่าๆ กัน	3
1.2 สะพานที่ใช้ส่วนผสมของ RPC ที่เมือง Sherbrooke ประเทศแคนาดา	3
2.1 ปฏิกริยาของแคลเซียมซิลิเกต	7
2.2 การเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	9
2.3 การเกิดผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน	10
2.4 การใช้อนุภาคหลายขนาดเพื่อให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น	13
2.5 โครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตที่บ่มที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง	14
2.6 โครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง	14
3.1 ลำดับขั้นตอนการศึกษาและทดลอง	24
3.2 แผนผังแสดงรายละเอียดและขั้นตอนการทดลอง	27
3.3 การวางก้อนตัวอย่างในแนวนอนใต้หัวกดสำหรับทดสอบแรงดึง	48
3.4 การทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น	52
3.5 การทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสความเหนียว	54
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโก่งตัวสำหรับการใช้ในการหาค่าดัชนีความเหนียว	55
3.7 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่างซึ่งบ่มในสารละลายซัลเฟต	58
3.8 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟต	58
4.1 ระยะเวลาก่อตัวต่อปริมาณซิลิกาฟูมร้อยละ 0, 5, 15 และ 25 โดยน้ำหนัก	63
4.2 ระยะเวลาก่อตัวต่อปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 0, 0.5, 1.5 และ 2.5	63
4.3 ขนาดคลองของมวลรวมละเอียดที่ใช้	65
4.4 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.20 โดยส่วนผสมมีค่า 0.0 คือส่วนผสมที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้	68
4.5 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.23 โดยส่วนผสมมีค่า 0.0 คือส่วนผสมที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้	69
4.6 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.26 โดยส่วนผสมมีค่า 0.0 คือส่วนผสมที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้	70
4.7 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.29 โดยส่วนผสมมีค่า 0.0 คือส่วนผสมที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้	71
4.8 กำลังอัดของ UHPC ที่อายุ 7 และ 28 วัน ในส่วนผสม 1-232505	72
4.9 กำลังอัดของ UHPC ที่อายุ 7 และ 28 วัน ในส่วนผสม 1-232015	72

สารบัญภาพประกอบ

เรื่อง	หน้า
4.10 กำลังอัดของ UHPC ที่อายุ 7 และ 28 วัน ในอัตราส่วน 1-291005	73
4.11 อัตราไหลแผ่นของ UHPC ส่วนผสม 1-232505 โดยผสมกับทรายละเอียด ในอัตราส่วน 0.00, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00 และ 1.20 ตามลำดับ	74
4.12 อัตราไหลแผ่นของ UHPC ส่วนผสม 1-232015 โดยผสมกับทรายละเอียด ในอัตราส่วน 0.00, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00 และ 1.20 ตามลำดับ	74
4.13 อัตราไหลแผ่นของ UHPC ส่วนผสม 1-291005 โดยผสมกับทรายละเอียด ในอัตราส่วน 0.00, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00 และ 1.20 ตามลำดับ	75
4.14 กำลังอัดของ RPC ผสมเส้นใยเหล็กที่อายุ 7 และ 28 วัน	76
4.15 กำลังอัดของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคล์ฟ	78
4.16 กำลังดึงของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคล์ฟ	79
4.17 กำลังดัดของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคล์ฟ	80
4.18 โมดูลัสยืดหยุ่นของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคล์ฟ	81
4.19 โมดูลัสความเหนียวของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคล์ฟที่อายุ 28 วัน	82
4.20 การหดตัวแบบแห้งของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคล์ฟ	83
4.21 การหดตัวแบบออโตจีเนียสของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคล์ฟ	85
4.22 การขยายตัวของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคล์ฟเมื่อแช่ใน สารละลายซัลเฟต	86
4.23 การพัฒนากำลังอัดของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคล์ฟเมื่อแช่ใน สารละลายซัลเฟต	88
4.24 การสูญเสียน้ำหนักของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคล์ฟเมื่อแช่ใน สารละลายซัลเฟต	89
4.25 การสูญเสียกำลังอัดจากสารละลายซัลเฟต	89
4.26 การสูญเสียน้ำหนักจากสารละลายซัลเฟต	90

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการศึกษา

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง คอนกรีตเป็นวัสดุที่ผสมจากมวลรวมที่มีขนาดคละต่างกันและมีปูนซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน เมื่อปูนซีเมนต์ผสมน้ำด้วยสัดส่วนของมวลรวมที่เหมาะสมคอนกรีตจะอยู่ในสภาพของเหลวสามารถทำการขนส่งหรือขึ้นรูปได้ตามความต้อง อีกทั้งเมื่อคอนกรีตแข็งตัวจะมีคุณสมบัติทางกลในการรับกำลังอัดได้ดีแต่รับกำลังดึงได้ต่ำมาก จึงได้มีการนำเหล็กมาช่วยเสริมกำลังต่างๆ ในโครงสร้างคอนกรีต เนื่องจากเหล็กเป็นวัสดุที่มีราคาสูงคอนกรีตจึงเป็นวัสดุหลักในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตยังมีความแตกต่างจากคุณสมบัติทางกลของเหล็กมากจึงทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากกว่าโครงสร้างเหล็ก จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนากำลังของคอนกรีตชนิดพิเศษอย่างต่อเนื่อง

คอนกรีตมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กมากที่สุดและมีการปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนให้สูงขึ้น การพัฒนาให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้นจะช่วยลดขนาดและน้ำหนักของโครงสร้างคอนกรีตลงให้ใกล้เคียงกับโครงสร้างเหล็กและช่วยทำให้คอนกรีตมีความคงทนสูงขึ้น จากการที่คอนกรีตได้มีการพัฒนากำลังให้สูงขึ้นจึงได้มีการแบ่งประเภทกำลังอัดของคอนกรีตตามตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1

การแบ่งประเภทของคอนกรีตตามความสามารถในการรับกำลังอัด

ประเภท	กำลังอัด (กก./ซม. ²)
1. Normal High Strength Concrete (HSC)	500 - 1,000
2. Very High Strength Concrete (VHSC)	1,000 - 1,500
3. Ultra High Strength Concrete (UHSC or UHPC)	1,500 - 2,000
4. Super High Strength Concrete (SHSC)	>2,000

Richard และ Cherezy (1995) ได้เผยแพร่ผลงานการคิดค้นเกี่ยวกับ Reactive Powder Concrete (RPC) เป็นครั้งแรกทำให้เกิดการตื่นตัวและเริ่มมีการศึกษาถึงเทคนิคและวิธีการผลิต Reactive Powder Concrete ขึ้นในหลายประเทศ ในแคนาดา Reactive Powder Concrete ถูกนำมาผลิตเป็นโครงสร้างสะพานสำหรับคนเดินข้ามแม่น้ำแบบอัดแรงภายนอก บริษัทผู้คิดค้น RPC ได้นำ

RPC มาผลิตเป็นท่อระบายน้ำเสียเพื่อจำหน่ายในประเทศสหรัฐอเมริกา วิศวกรของจีนได้ศึกษาเพื่อนำไปใช้แทนโครงสร้างเหล็กในพื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมรุนแรงซึ่งมีความแตกต่างของอุณหภูมิในฤดูกาลต่างๆ ค่อนข้างสูง

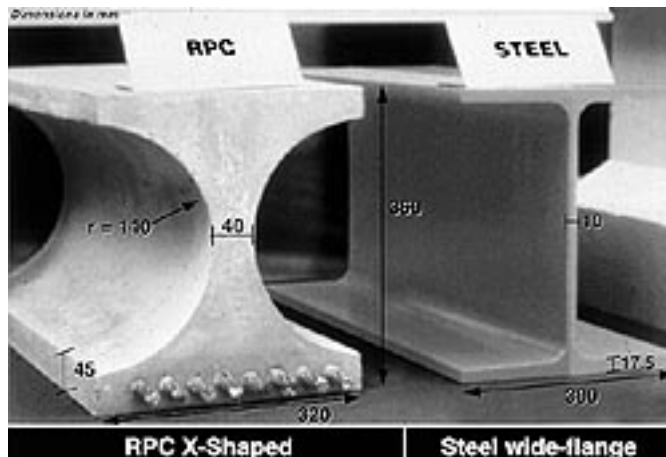
ตารางที่ 1.2

ส่วนผสมของ Reactive Powder Concrete

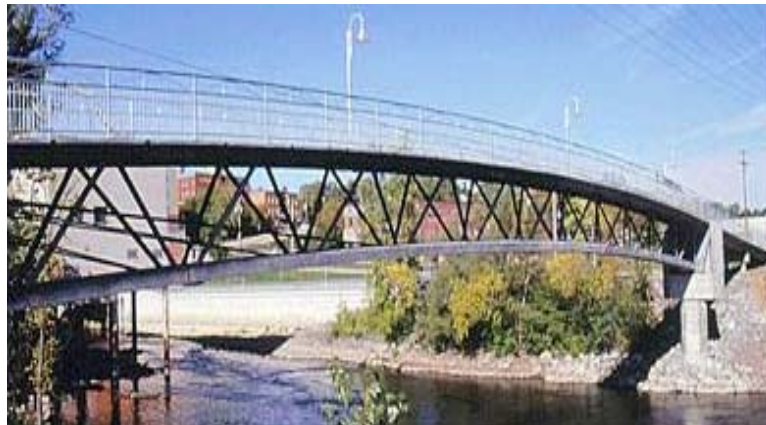
	RPC 200				RPC 800	
	Non fibered		Fibered		Silica aggregates	Steel aggregates
Portland Cement	1	1	1	1	1	1
Silica fume	0.25	0.23	0.25	0.23	0.23	0.23
Sand 150 - 600 μm	1.1	1.1	1.1	1.1	0.5	-
Crushed quartz $d_{50}=10\mu\text{m}$	-	0.39	-	0.39	0.39	0.39
Superplasticizer (Polyacrylate)	0.016	0.019	0.016	0.019	0.019	0.019
Steel fiber L=12 mm	-	-	0.175	0.175	-	-
Steel fiber L=3 mm	-	-	-	-	0.63	0.63
Steel aggregates <800 μm	-	-	-	-	-	1.49
Water	0.15	0.17	0.17	0.19	0.19	0.19
Compacting pressure	-	-	-	-	50 MPa	50 MPa
Heat treatment temperature	20°C	90°C	20°C	90°C	250-400°C	250-400°C

RPC 200 มีกำลังรับแรงอัดสูงถึง 1,700 – 2,300 กก./ซม.² กำลังดัดอยู่ระหว่าง 300-600 กก./ซม.² ในขณะที่ RPC 800 ที่ใช้ทราายเป็นส่วนผสมมีกำลังอัดสูงอยู่ระหว่าง 4,900-6,800 กก./ซม.² ส่วน RPC 800 ที่ใช้เส้นใยเหล็กเป็นส่วนผสมมีกำลังอัดสูงถึง 6,500 – 8,100 กก./ซม.² RPC 800 มีกำลังดัดอยู่ระหว่าง 450 – 1,410 กก./ซม.²

New-Technologies.Org, On Line, 2004 ได้แสดงถึงโครงสร้างจริงที่ได้ใช้ Reactive Powder Concrete (RPC) เป็นครั้งแรกคือสะพานสำหรับคนเดินและจักรยานที่เมือง Sherbrooke ประเทศแคนาดา โดยมีลักษณะเป็นสะพานน้ำหนักเบาแบบโครงข้อหมุน 3 มิติ ความยาวช่วงสะพาน 60 เมตร แบ่งชั้นงานเป็น 6 ชั้นและทำการอัดแรงภายหลัง โดยมีพื้นทางเดินเป็น Top Chord ซึ่งมีความหนาเพียง 1" ส่วนของ Web เป็นการใส่โครงสร้างประกอบคือใช้ RPC เทลงไปในท่อสแตนเลสบาง โดยไม่มีการเสริมเหล็กในส่วน of โครงสร้าง Superstructure ของสะพานทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 1.2



ภาพที่ 1.1 หน้าตัดของคาน RPC อัดแรงเทียบกับคานเหล็กที่มีกำลังดัดเท่าๆ กัน



ภาพที่ 1.2 สะพานที่ใช้ส่วนผสมของ RPC ที่เมือง Sherbrooke ประเทศแคนาดา

Reactive Powder Concrete คือ วัสดุที่มีซีเมนต์เป็นตัวประสานมวลรวมต่างๆ จัดอยู่ในกลุ่มของ Ultra High Strength Concrete ที่มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 1,500 ถึง 2,000 กก./ซม.² โดยใช้องค์ความรู้ทางด้านโครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตร่วมกับความรู้ทางด้านเคมีของปูนซีเมนต์และคอนกรีตโดยหลักการของ RPC คือทำให้คอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุดโดยไม่ใช้มวลรวมหยาบ, ปรับปรุงความหนาแน่นอัดแน่นโดยการจัดสัดส่วนผสมให้แน่นที่สุดโดยใช้วิธีการออกแบบคอนกรีตแบบใหม่ ปรับปรุงโครงสร้างระดับจุลภาคเพื่อเพิ่มความคงทนในระยะยาว โดยการให้ความร้อนหลังการก่อตัวซึ่งช่วยทำให้การหดตัวน้อยลงและปรับปรุงความเหนียวให้ดีขึ้นโดยการผสมเส้นใยเหล็กขนาดเล็ก

การศึกษาการพัฒนา Reactive Powder Concrete จะช่วยสร้างองค์ความรู้เพื่อนำไปใช้ในการผลิต Reactive Powder Concrete ในภาคอุตสาหกรรมจริง และเป็นฐานความรู้เพื่อใช้ศึกษาและพัฒนาต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจถึงแนวคิดและการพัฒนาคอนกรีตชนิดพิเศษที่วัสดุผงมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้สูง (Reactive Powder Concrete) ตามแนวคิดของผู้ที่คิดค้นวัสดุชนิดนี้ เพื่อเป็นฐานความรู้ในการค้นคว้าวิจัยในเรื่องนี้ต่อไปในอนาคต

1.2.2 เพื่อพัฒนาแนวคิด เทคนิค กระบวนการออกแบบ และขั้นตอนการพัฒนาจนได้จุดที่เหมาะสมของคอนกรีตชนิดพิเศษที่มีความสามารถทำปฏิกิริยาได้สูงให้มีความเหมาะสมกับประเทศไทย โดยมีหลักการอยู่ที่การใช้วัสดุที่สามารถหาได้ภายในประเทศให้มากที่สุด และสามารถนำไปใช้งานได้จริงภายใต้สภาวะแวดล้อมของประเทศไทย

1.2.3 ศึกษาและสร้างความเข้าใจในสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกล และความทนทานของคอนกรีตชนิดพิเศษที่มีความสามารถทำปฏิกิริยาได้สูงที่พัฒนาขึ้น เช่น ระยะเวลาการก่อตัว การพัฒนา กำลังอัด กำลังดึง กำลังดัด โมดูลัสยืดหยุ่น การหดตัวแบบบอโตจีเนียสและแบบแห้ง และความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อนทนทานต่อซัลเฟตเพื่อที่จะนำคุณสมบัติต่างๆ มาพิจารณาใช้งาน Reactive Powder Concrete ตามความเหมาะสมต่อไป

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษา ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่ใช้โดยทั่วไป

1.3.2 มวลรวม เป็นทรายละเอียดคัดขนาดที่มีขนาดระหว่าง 0.15-0.6 มิลลิเมตร โดยทำการร่อนคัดขนาดทรายก่อนการใช้งานโดยจะใช้ทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้างบนตะแกรงเบอร์ 100 เท่านั้นซึ่งทรายที่ได้จะมีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 150-600 ไมครอน

1.3.3 ซิลิกาฟูม ใช้ซิลิกาฟูมที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1240

1.3.4 น้ำยาผสมเพิ่มใช้น้ำยาลดน้ำยิ่งยวด Superplasticizer (Polycarboxylate)

1.3.5 เส้นใยเหล็กใช้เส้นใยเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16 มิลลิเมตร ยาว 13 มิลลิเมตร มีกำลังดึงสูงประมาณ 20,000 กก/ซม²

1.3.6 สมบัติทางกายภาพของ Reactive Powder Concrete ประกอบด้วย อัตราการไหลแผ่ และระยะเวลาการก่อตัว

1.3.7 สมบัติเชิงกลของ Reactive Powder Concrete ประกอบด้วย กำลังอัด กำลังดึง กำลังดัด และโมดูลัสยืดหยุ่น

1.3.8 สมบัติทางด้านความทนทานประกอบด้วย การหดตัวแบบบอโตจีเนียสและแบบแห้ง และความทนทานต่อการกัดกร่อนทนทานต่อซัลเฟต

1.4 สมมุติฐานของการศึกษา

การใช้วัสดุที่มีปูนซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานมวลรวมที่มีระดับจุลภาค เช่น ทรายละเอียดที่มีขนาด 150-600 ไมครอน ซิลิกาฟูมที่มีขนาดเพียง 1 ใน 100 ส่วนของปูนซีเมนต์ โดยทำการพิจารณาสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการอัดแน่นโดยให้อุณหภูมิของปูนซีเมนต์กับมวลรวมเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุดสามารถช่วยลดการเกิดช่องว่างและรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นสูงมากกว่าคอนกรีตธรรมดาส่งผลให้สามารถรับกำลังได้ดีขึ้นและความซึมผ่านได้ต่ำ อีกทั้งการผสมเส้นใยเหล็กขนาดเล็กทำให้คอนกรีตมีความเหนียวดีขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

1.5.1 ประโยชน์ในเชิงความรู้พื้นฐาน

1. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้เพื่อเป็นฐานความรู้เพื่อการพัฒนาคอนกรีตชนิดพิเศษที่เป็นเอกลักษณ์กับสภาพการใช้งานของประเทศไทย
2. ขยายกรอบความคิดและการพัฒนาแนวคิดเพิ่มเติมในการศึกษาคอนกรีตชนิดพิเศษความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้สูง (Reactive Powder Concrete)
3. สามารถนำความรู้ใหม่ที่ได้ไปเขียนบทความระดับนานาชาติอันเป็นการสื่อสารระหว่างนักวิจัยไทยและต่างประเทศที่ทำวิจัยในศาสตร์สาขานี้

1.5.2 ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์

1. เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาเรื่องนี้อย่างจริงจัง ดังนั้นความรู้ใหม่ที่ได้จากการศึกษามีแนวโน้มที่จะสามารถนำไปจดสิทธิบัตรเพื่อรักษาความรู้ของคนไทยและเพิ่มมูลค่าในการจัดการความรู้
2. สามารถนำความรู้ในเรื่องของการผลิต Reactive Powder Concrete ไปใช้งานได้จริงและเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มของงานวิจัยอย่างเป็นรูปธรรม
3. สามารถทำให้ผู้ใช้จริงที่เกี่ยวข้องกับงานคอนกรีตชนิดพิเศษมีศักยภาพที่เพิ่มขึ้นและสามารถแข่งขันได้ต่างประเทศ

1.5.3 ประโยชน์ในเชิงสังคมและประเทศชาติ

1. ผลจากการพัฒนาดังกล่าวย่อมมีประเด็นที่กระตุ้นเตือนให้ผู้ใช้งานที่จริงที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตตระหนักถึงการเปลี่ยนแปลงในทิศทาง อันจะนำไปสู่การออกเป็นมาตรฐานหรือทางเลือกใหม่ที่ดีกว่าเดิม ซึ่งหมายถึงสังคมและประเทศได้รับประโยชน์
2. กระตุ้นให้สังคมที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นมีความร่วมมือกันผ่านผลประโยชน์ที่ต่างฝ่ายต่างจะได้รับในวงกว้างต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและผลงานที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) เป็นสารประกอบหลักที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์มากที่สุดประมาณร้อยละ 45 ถึง 55 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมสี่เท่าแก่ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำทำให้เกิดความร้อนปานกลางประมาณ 500 จูล/กรัม ความร้อนที่คายออกมาเรียกว่า ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration) โดยจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัว และให้กำลังค่อนข้างดีในช่วง 7 วันแรก

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 15 ถึง 35 ซึ่ง C_2S มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบ คือ α - C_2S เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิเริ่มลดลงจะแปลงสภาพเป็น α' - C_2S และเปลี่ยนเป็น β - C_2S จนอุณหภูมิปกติจะอยู่ในรูปของ C_2S มีลักษณะเป็นเม็ดกลมและแสดงลักษณะทวินนิ่ง (Twinning) เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันค่อนข้างต่ำ มีค่าประมาณ 250 จูล/กรัม และการพัฒนากำลังของ C_2S ค่อนข้างช้าและช้ากว่า C_3S มาก คือ จะเริ่มให้กำลังหลังจาก 4 สัปดาห์ขึ้นไป

3. ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 7 ถึง 15 ลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยม สี่เท่าอ่อน ทำปฏิกิริยากับน้ำรุนแรงมากและทำให้เฟสต์ก่อตัวทันที ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันค่อนข้างสูงมาก มีค่าประมาณ 880 จูล/กรัม สามารถพัฒนากำลังได้ภายในวันเดียว แต่กำลังที่ได้จะมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับ C_3S หรือ C_2S

4. เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 5 ถึง 10 และอยู่ในสภาพสารละลายแข็ง เมื่อผสมกับน้ำจะทำให้เฟสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าปานกลางประมาณ 420 จูล/กรัม มีการพัฒนากำลังได้เร็วมากเช่นเดียวกับ C_3A แต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำและต่ำกว่า C_3A เล็กน้อย

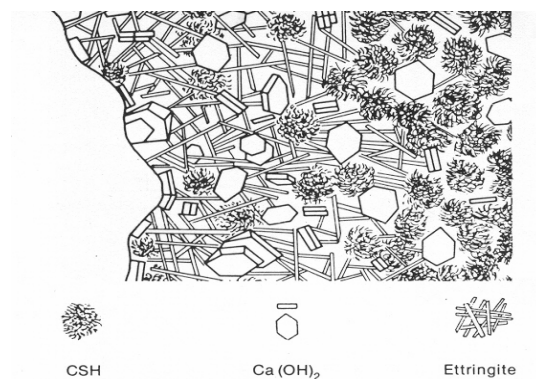
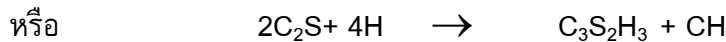
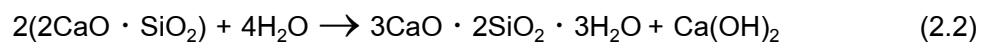
2.1.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การก่อตัวและแข็งตัวของปูนซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของปูนซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะคือ อาศัยสารละลาย ปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำก่อให้เกิดไอออน (Ions) ในสารละลายและไอออนนี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น และการเกิดปฏิกิริยา

ระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “Solid State Reaction”

ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้ อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไปทำให้แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้จะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์แต่ละประเภท

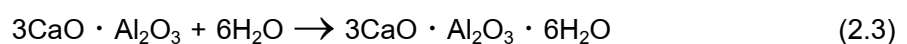
1. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S) แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานดังสมการ

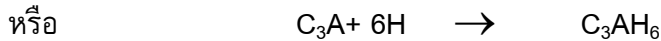


ภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต

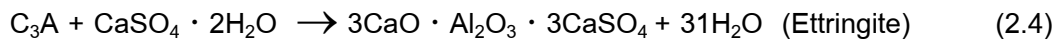
จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะเกิดเจลซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ C-S-H นี้ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ในที่นี้จะใช้ตัวย่อ C-S-H แทน Calcium Silicate Hydrate ที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะมีองค์ประกอบและโครงสร้างจะเป็นอย่างไร $Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมาก คือมี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้เป็นอย่างดี

2. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดขึ้นที่ทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ



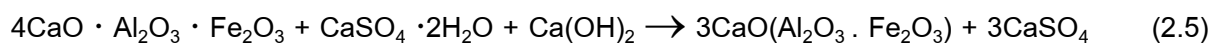


เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยาน้อย่างรวดเร็วจึงใส่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดปูนซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการ



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_2S เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิด Ettringite ขึ้นใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate

3. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียม อะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF คล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดขึ้นช้ากว่าและมีความร้อนจากปฏิกิริยาน้อยกว่า โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการ



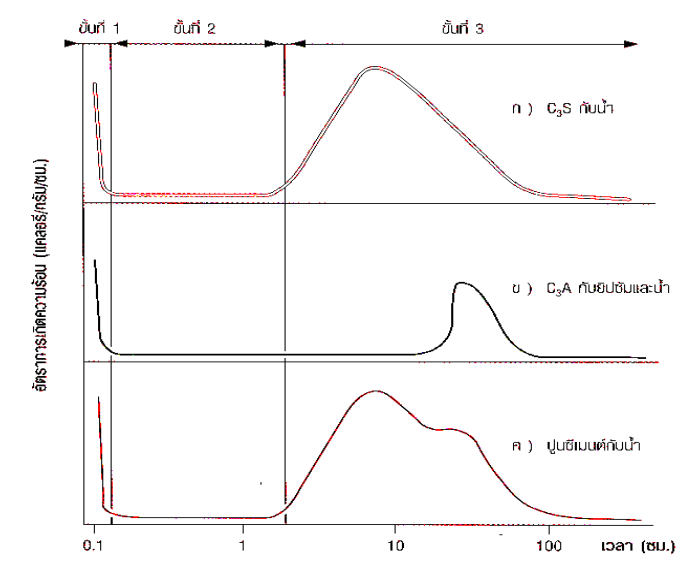
2.1.3 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

1. ขั้นตอนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่าง C_3S กับน้ำ สามารถแบ่งออกได้ 3 ขั้นตอน คือ ขั้นที่ 1 เมื่อผสม C_3S กับน้ำจะเกิดความร้อนอย่างรวดเร็วซึ่งอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นจะลดลงและหยุดในเวลา 15 นาทีแรก ติดตามด้วยขั้นที่ 2 ที่ไม่ค่อยมีปฏิกิริยารีกว่าระยะสงบ (Dormant Period) ระยะนี้เป็นระยะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อยู่ในช่วงพลาสติกเป็นเวลาหลายชั่วโมง หลังจากนั้น C_3S จะเริ่มทำปฏิกิริยาอีกครั้งหลังจาก 2 ถึง 3 ชั่วโมง และเข้าสู่ขั้นที่ 3 เป็นการก่อตัวระยะต้น (Initial Set) มีการคายความร้อนออกมาอย่างต่อเนื่องและอัตราการเกิดความร้อนจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดเมื่ออายุ 4 ถึง 8 ชั่วโมง และที่จุดนี้จะเกิดการก่อตัวสุดท้าย (Final Set) หลังจากนั้นซีเมนต์เพสต์จะเริ่มแข็งตัวและสามารถรับกำลังเพิ่มขึ้นตามอายุที่มากขึ้น

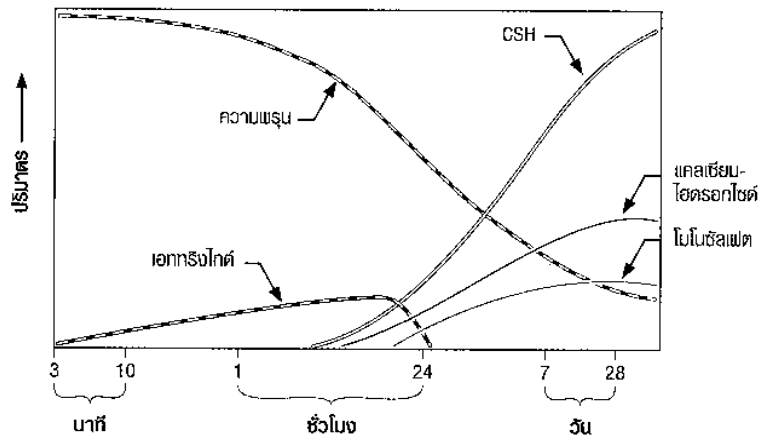
2. ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่าง C_2S กับ น้ำ จะทำปฏิกิริยาทำนองเดียวกันกับ C_3S แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะช้ากว่า เพราะ C_2S ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเท่ากับ C_3S ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาจาก C_2S จึงน้อยกว่า C_3S

3. ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่าง C_3A กับ น้ำ สามารถแบ่งได้สามขั้นตอนเช่นกัน ในขั้นที่ 1 ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดเอททริงไกต์ (Ettringite) มีลักษณะยาวคล้ายเข็มจะเกิดขึ้นเมื่อมีไอออนของซัลเฟตเพียงพอ การเกิดเอททริงไกต์เพิ่มมากขึ้นรอบ C_3A ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ยากและปฏิกิริยาดังกล่าวจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขั้นที่ 2 ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นค่อนข้างน้อยและใช้เวลาหลายชั่วโมง เมื่อไอออนของซัลเฟตทำปฏิกิริยาหมด C_3A จะทำปฏิกิริยากับเอททริงไกต์และเปลี่ยนเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรตที่มีซัลเฟตน้อยลงเป็น แคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนต (Calcium Monosulfaluminate) ซึ่งจะตรงกับการเกิดปฏิกิริยาในขั้นที่ 3 ปฏิกิริยานี้ จะเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 12 ถึง 36 ชั่วโมง แคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตสามารถจะแปลงกับเป็นเอททริงไกต์ได้เมื่อได้รับไอออนของซัลเฟตอีก ซึ่งเป็นเหตุผลหลักในการเกิดการกัดกร่อนของซัลเฟต เพราะเอททริงไกต์มีปริมาณมากกว่าแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตมากและถ้ามียิปซัมผสมอยู่น้อย C_3A จะยังคงมีอยู่หลังจากที่เอททริงไกต์ เปลี่ยนเป็นโมโนซัลเฟตแล้ว กรณีเช่นนี้จะเกิดสารละลายแข็ง (Solid Solution) ของ $C_4A\bar{S}_{12}$ และ C_4AH_{13}

4. การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่าง C_4AF จะมีขั้นตอนคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดขึ้นช้ากว่าและมีปฏิกิริยาน้อยกว่า สารประกอบเหล็กออกไซด์ (F) จะทำปฏิกิริยาคลายกับอะลูมิเนียมออกไซด์ (A) และสามารถแทนกันได้ ยิปซัมจะหน่วงปฏิกิริยาของ C_4AF มากกว่าการหน่วงปฏิกิริยาของ C_3A ปฏิกิริยาระหว่าง C_4AF กับยิปซัมทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรต์ ($C_6(A,F)\bar{S}_3H_{32}$) ผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะเหมือนเข็มคล้ายเอททริงไกต์ สามารถทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ที่มีซัลเฟตต่ำ



ภาพที่ 2.2 การเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน



ภาพที่ 2.3 การเกิดผลิตผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.1.4 ซิลิกาฟุ้ง

ซิลิกาฟุ้งเป็นสารที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต Silicon และ Ferro-silicon Alloy ซึ่งประกอบด้วยวัตถุดิบคือ หินควอร์ต ถ่านและเหล็กหลอมรวมกันด้วยความร้อนประมาณ 2,000 องศาเซลเซียส รูปแบบของซิลิกาฟุ้งมี 2 ประเภทคือ ซิลิกาฟุ้งอัดแน่น (Densified Silica Fume) และซิลิกาฟุ้งที่ไม่อัดแน่น (Undensified Silica Fume) ซึ่งประเภทที่มีจำหน่ายส่วนใหญ่จะเป็นซิลิกาฟุ้งอัดแน่นเนื่องจากมีขนาดใหญ่กว่าและไม่ฟุ้งกระจายไปในอากาศ ผงซิลิกานี้หากสูดดมเข้าไปและเกิดการสะสมขึ้นในปอดจะทำให้เกิดโรค Silicosis ได้เช่นเดียวกับฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการโม่หินปูน หรือกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ วัสดุประเภทนี้ไม่มีการผลิตในประเทศไทยแต่มีจำหน่ายในประเทศโดยบริษัท เคมีภัณฑ์ที่ใช้ในงานก่อสร้าง

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ้งคือ SiO_2 ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ คือพร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซิลิกาฟุ้งที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมักจะมี SiO_2 ที่สูงมากคือมักจะมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O และออกไซด์อื่นๆ ร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับของ SiO_2 ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป คุณภาพขั้นต่ำของซิลิกาฟุ้งควรจะผ่านมาตรฐานตาม ASTM C1240 ซึ่งกำหนดให้มีสัดส่วนของ SiO_2 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 ขึ้นไปดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1

องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟุ้งที่ผ่านมาตรฐาน ASTM C1240

องค์ประกอบเคมี	ซิลิกาฟุ้ง (ปริมาณเป็นร้อยละ)
SiO ₂	92-98
Al ₂ O ₃	0.5
Fe ₂ O ₃	2.1
MgO	0.3
CaO	0.8
Na ₂ O	0.1
K ₂ O	1.0
SO ₃	0.2

2.1.5 ปฏิกริยาปอซโซลานิค

ปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาขั้นที่ 2 โดยมีสารตั้งต้นคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากปฏิกริยาไฮเดรชันเข้าทำปฏิกริยากับซิลิกอนไดออกไซด์จากซิลิกาฟุ้ง เกิดเป็นตัวเชื่อมประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น โดยมีปฏิกริยาเกิดขึ้นดังนี้



โดยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เพิ่มขึ้นนอกเหนือจากปฏิกริยาไฮเดรชัน จะช่วยปรับปรุงโครงสร้างภายในของคอนกรีตให้แน่นทึบมากขึ้นทำให้มีความชื้นได้ดี และช่วยเพิ่มกำลังให้แก่คอนกรีต

2.1.6 สารลดน้ำพิเศษ

สารลดน้ำพิเศษ (High Range Water-Reducing Admixtures) หรือ Superplasticizer สารประเภทนี้สามารถลดปริมาณน้ำส่วนผสมได้ร้อยละ 15-30 หรือมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดการผลักระหว่างเม็ดเม็ดทรายมีแรงผลักระหว่างเม็ดทรายมากกว่าสารลดน้ำทั่วไป มีคุณสมบัติช่วยให้คอนกรีตถ่ายเทได้สูงมากขึ้น ในปัจจุบันสารประเภทนี้เข้ามามีบทบาทในงานคอนกรีตอย่างมาก เพราะการลดน้ำอย่างมากทำให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดในช่วงต้นที่สูงมาก รวมทั้งยังลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมได้ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย สารลดน้ำประเภทนี้โดยทั่วไปใช้กันอยู่ 3 ชนิด

ได้แก่ Sulphonated Napthalene Formaldehyd (SNF) , Sulfonate Melamine Formaldehyd (SMF) และ Polycarboxylate เป็นต้น

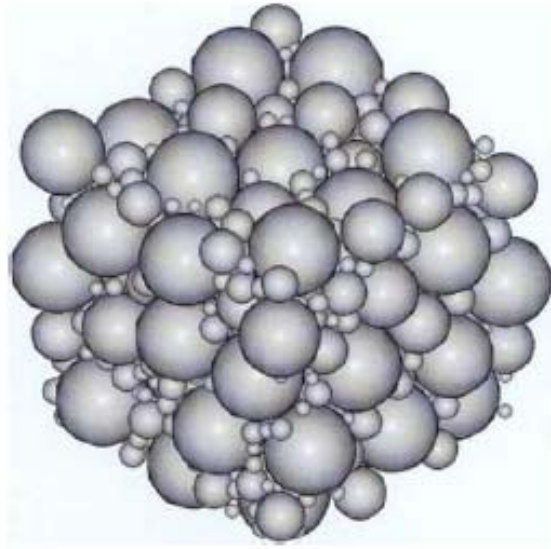
1. Sulphonated Napthalene Formaldehyd (SNF) ผลิตขึ้นจากแนฟทาลีนผสมกับ โอเลียม (Oleum หรือกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 99.98) เพื่อให้เกิดเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ซัลโฟเนชั่น ภายใต้เงื่อนไขจะเกิดเป็น β ซัลโฟเนต ต่อจากนั้นก็นำมาทำปฏิกิริยากับ ฟอर्मัลดีไฮด์ เพื่อที่จะให้เกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน และกรดซัลโฟนิก ซึ่งจะถูกละลายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือปูนขาว ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้นอกเหนือจากที่ต้องการ คือ โซเดียมซัลเฟต โดยได้จากการทำปฏิกิริยาสะเทินกับปริมาณซัลโฟเนตที่มากเกินไป แต่ก็สามารถลดปริมาณโซเดียมซัลเฟตได้โดยการนำไปตกตะกอนกับปูนขาวต่อไป

2. Sulfonate Melamine Formaldehyd (SMF) ถูกผลิตขึ้นจากกระบวนการรีซินนิฟิเคชั่นที่ปกติ ทั้งนี้ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะมีอิทธิพลต่อน้ำหนักโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ โดยวัตถุดิบนี้อาจนำมาผสมกับ SNF เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ หรือนำไปใช้โดยไม่ต้องนำไปผสมกับสารเคมีอื่นพบว่าสามารถลดปริมาณอากาศที่มากเกินไปในคอนกรีต หรือระยะเวลาในการก่อตัวลงได้

3. Polycarboxylate ถูกทำขึ้นจากมอนอเมอร์ที่เกี่ยวข้องโดยกลไกกลอนูมูลอิสระซึ่งใช้เปอร์ออกไซด์เป็นสารตั้งต้น

2.1.7 กระบวนการอัดแน่น

มวลรวมใน Reactive Powder Concrete มีเพียงมวลรวมละเอียดเท่านั้นซึ่งมีขนาดใหญ่สุดเพียง 600 ไมครอน และมีช่วงขนาดของอนุภาคระหว่าง 150-600 ไมครอน ส่วนปูนซีเมนต์มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมครอนถึงร้อยละ 90 ตามมาตรฐาน ASTM C430 ส่วนซิลิกาฟุ่มมีขนาดอนุภาคเพียง 1 ส่วน 100 ของขนาดปูนซีเมนต์เท่านั้น จะเห็นว่าขนาดของอนุภาคของมวลสารใน Reactive Powder Concrete มีการคละกันหลายขนาด ทั้งนี้เนื่องจากผู้พัฒนาได้นำแนวคิดทางด้าน กระบวนการอัดแน่นเข้ามาใช้เป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนา

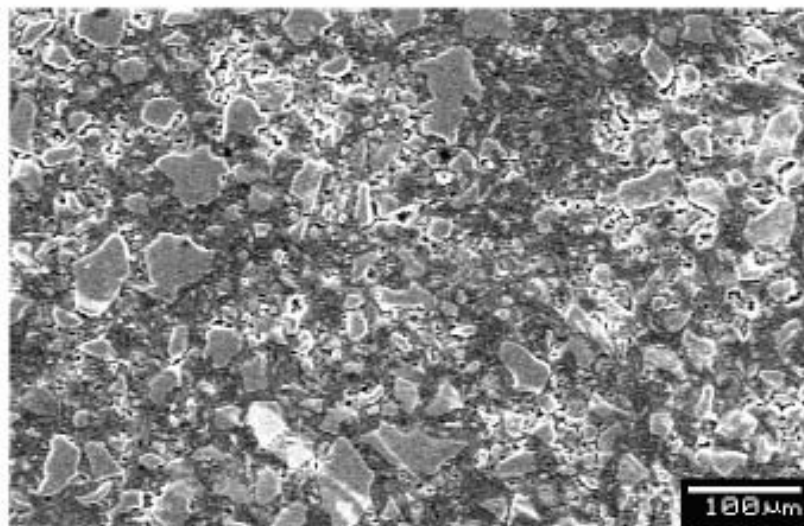


ภาพที่ 2.4 การใช้อนุภาคหลายขนาดเพื่อให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น

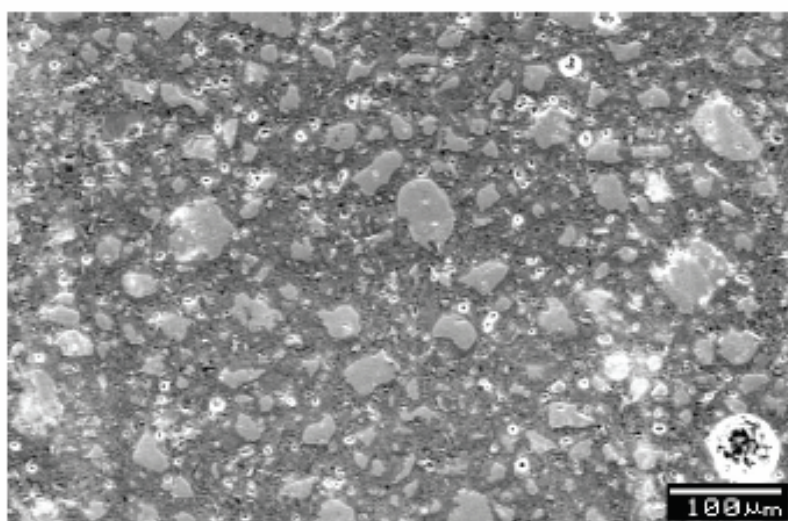
ผลจากการทำ Dense packing อย่างหนึ่งคือ Filler Effect เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ 100 เท่า เป็นผลให้อนุภาคซิลิกาฟุ่มสามารถแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ได้ ดังนั้นโครงสร้างของคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ่มเป็นส่วนประกอบจึงมีความทึบแน่นสูงมากกว่าคอนกรีตธรรมดาส่งผลได้สามารถรับกำลังได้ดีขึ้นและความพรุนน้อยลงทำให้มีความซึมได้ต่ำ (Low Permeability)

2.1.8 การบ่ม

การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่แน่นกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำมีผลทำให้ความคงทนเพิ่มมากขึ้นและการหดตัวลดน้อยลง ดังแสดงด้วยภาพที่ 2.5 และ 2.6 ซึ่ง Hill และคณะ (2002) ได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตที่บ่มที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หรือ 3 วัน เทียบกับตัวอย่างของคอนกรีตที่บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าคอนกรีตที่บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีความพรุนน้อยกว่าคอนกรีตที่บ่มที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มาก



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตที่ปรมที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตที่ปรมด้วยอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

2.1.9 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

เมื่อใส่แรงลงในคอนกรีตจะเกิดหน่วยแรงการหดตัว ซึ่งพบว่าคอนกรีตไม่ได้แสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นอย่างแท้จริงเหมือนกับมวลรวมหรือซีเมนต์เพสต์ คือ เมื่อถูกหน่วยแรงกระทำจะเกิดหน่วยแรง (Stress) ซึ่งแปรผันโดยตรงกับความเครียด (Strain) และกลับคืนสภาพเดิม

เมื่อนำแรงออก การที่คอนกรีตไม่ได้แสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุยืดหยุ่นอย่างแท้จริง เป็นผลมาจากกระบวนการแพร่กระจายของรอยร้าวในคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นภายใต้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

ปกติในเนื้อคอนกรีตมีรอยร้าวเล็กๆ (Micro Cracks) อยู่แล้ว โดยจำนวนและขนาดของรอยร้าวขึ้นอยู่กับการบีบ การบ่ม และความแข็งแรงของบริเวณรอยต่อ (Transition Zone) ระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมหยาบในช่วงที่คอนกรีตรับหน่วยแรงไม่เกินร้อยละ 30 ของหน่วยแรงสูงสุด รอยร้าวดังกล่าวจะยังไม่เพิ่มขึ้นและไม่ขยายตัวจึงทำให้กราฟในช่วงดังกล่าวยังเป็นเส้นตรง เมื่อคอนกรีตได้รับหน่วยแรงเกินร้อยละ 30 ของหน่วยแรงสูงสุด จำนวนความกว้างและความยาวของรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อ (Transition Zone) จะเริ่มเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนความเครียดต่อความเค้นเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้กราฟเริ่มเบี่ยงเบนไม่เป็นเส้นตรง ที่ระดับหน่วยแรงร้อยละ 50 ของหน่วยแรงสูงสุดรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อจะเริ่มคงที่และเมื่อหน่วยแรงเค้นอยู่ในช่วงร้อยละ 50-60 ของหน่วยแรงสูงสุดรอยแตกร้าวจะเริ่มเกิดขึ้นบริเวณซีเมนต์เพสต์ (Matrix Zone) ที่ระดับหน่วยแรงประมาณร้อยละ 75 ของหน่วยแรงสูงสุด รอยแตกร้าวบริเวณซีเมนต์เพสต์จะแพร่กระจายมากขึ้น อีกทั้งรอยร้าวบริเวณรอยต่อ (Transition Zone) เริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงนี้ทำให้กราฟเริ่มโค้งเข้าสู่แนวอนอนมากขึ้น ที่ระดับหน่วยแรงมากกว่าร้อยละ 75 ของหน่วยแรงสูงสุด รอยร้าวทั้งในบริเวณซีเมนต์เพสต์และบริเวณรอยต่อ เกิดมากขึ้นและมีความต่อเนื่องกันทำให้การเพิ่มหน่วยแรงเพียงเล็กน้อยและความเครียดเปลี่ยนแปลงไปมาก

2.1.10 ค่าอัตราส่วนปัวซอง

ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) คือ อัตราส่วนของหน่วยการหดตัวด้านข้าง (Lateral Strain) ต่อหน่วยการหดตัวในแนวแกนที่รับน้ำหนัก (Axial Strain) เมื่อมีการให้น้ำหนัก ซึ่งคอนกรีตปกติจะมีค่าประมาณ 0.15-0.20 จากการวิจัยยังไม่พบความสัมพันธ์ที่แน่ชัดระหว่างอัตราส่วนปัวซองกับคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ การบ่ม หรือขนาดผลของมวลรวม แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่าอัตราส่วนปัวซองจะมีค่าลดลงในคอนกรีตที่มีกำลังสูง คอนกรีตที่อิมตัวด้วยน้ำ และคอนกรีตที่รับหน่วยน้ำหนักไม่คงที่ (Dynamic Load) อัตราส่วนปัวซองนี้ไม่ค่อยมีการใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป แต่มีความสำคัญในการวิเคราะห์โครงสร้างของอุโมงค์ เขื่อน และโครงสร้างประเภท Indeterminate Structure

2.1.11 การหดตัวแบบออโตจีเนียส

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ยังคงมีต่อไปหลังจากการก่อตัว ในกรณีที่ไม่มี ความชื้นหรือไม่มีน้ำเข้าออกอาจทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการหดตัว การหดตัวในลักษณะนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการนำน้ำที่อยู่ในโพรงคาปิลารีมาใช้ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และในบางครั้งคอนกรีตอาจใช้น้ำจันแห้ง (Self Desiccation) การหดตัวด้วยตัวเองส่วนใหญ่เกิดขึ้นในแกนภายในของ

คอนกรีตขนาดใหญ่ และในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำกว่า 0.42 การหดตัวชนิดนี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการหดตัวแบบแห้ง แม้ว่าการหดตัวด้วยตัวเองจะเกิดขึ้นทั้งสามทิศทางแต่นิยมบอกค่าในรูปของหน่วยแรงเครียดเพื่อให้พิจารณาเกี่ยวกับการหดตัวแบบแห้งได้ คอนกรีตมีการหดตัวด้วยตัวเองประมาณ 100×10^{-6} ในขณะที่มอร์ตาร์มีค่าประมาณ 300×10^{-6} การหดตัวด้วยตัวเองมีแนวโน้มจะเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นและตามความละเอียดของปูนซีเมนต์ที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณของ C_3A และ C_4AF สูงมีแนวโน้มการหดตัวด้วยตัวเองสูง ในกรณีที่น้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำมาก เช่น 0.17 พบว่าการหดตัวด้วยตัวเองมีค่าสูง การหดตัวด้วยตัวเองมีความสำคัญที่จะต้องพิจารณาในกรณีที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ และในกรณีของงานคอนกรีตขนาดใหญ่มาก

2.1.12 การหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแห้งเกิดจากการที่น้ำในคอนกรีตระเหยออกมาทำให้คอนกรีตหดตัว การหดตัวแห้งในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเป็นการหดตัวที่สำคัญมากซึ่งอาจทำให้เกิดรอยแตกร้าวและการบิดตัวของคอนกรีตได้ซึ่งส่วนมากเกิดจากการยัดรีงของโครงสร้าง การหดตัวแห้งของคอนกรีตขึ้นอยู่กับ การหดตัวของซีเมนต์เพสต์เพราะมวลรวมมีการหดตัวต่ำมาก กลไกในการหดตัวสามารถแบ่งได้ดังนี้

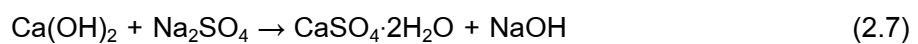
1. การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 การหดตัวในช่วงนี้เกิดจากสูญเสียน้ำในโพรงคาปิลารีเป็นหลัก โดยในช่วงแรกน้ำในโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่จะถูกขับออกมาตามด้วยน้ำในโพรงคาปิลารีที่มีขนาดเล็ก การสูญเสียน้ำทำให้น้ำในโพรงที่เหลืออยู่ในโพรงคาปิลารีเกิดเป็นผิวโค้ง (Meniscus) และเกิดแรงดึงผิวซึ่งมีขนาดสูงขึ้นเมื่อโพรงมีขนาดเล็กลงมีส่วนทำให้เกิดการหดตัวโดยพบว่าแผ่น C-S-H จะเคลื่อนเข้าหากันมากขึ้น แผ่น C-S-H จะยึดเกาะกันถาวรทำให้เกิดชั้นของแผ่น C-S-H ซึ่งการเคลื่อนตัวและยึดเกาะกันเป็นส่วนของการหดตัวถาวรซึ่งคืนกลับไม่ได้ (Irreversible Shrinkage)

2. การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 ถึง ร้อยละ 50 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ในช่วงนี้เกิดในอัตราที่ต่ำกว่าช่วงความชื้นสัมพัทธ์ที่เกินร้อยละ 50 ที่ความชื้นร้อยละ 40 ถึง 50 น้ำในโพรงคาปิลารีจะถูกขจัดออกไปและแรงดึงผิวจะหมดไป การหดตัวช่วงนี้เกิดจากการสูญเสียน้ำดูดซับ (Absorbed Water) ที่ผิวอนุภาคของเจลเป็นหลัก การหดตัวจากการสูญเสียน้ำอาจยังคงอยู่แต่ไม่มากนักเมื่อความชื้นลดลงจะเกิดการสูญเสียน้ำที่ดูดซับขั้นสุดท้าย และทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้น การหดตัวช่วงนี้เป็นการหดตัวแบบคืนกลับได้ (Reversible Shrinkage)

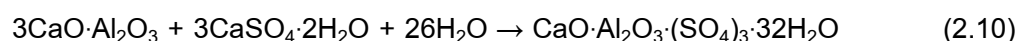
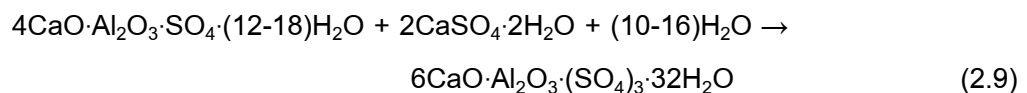
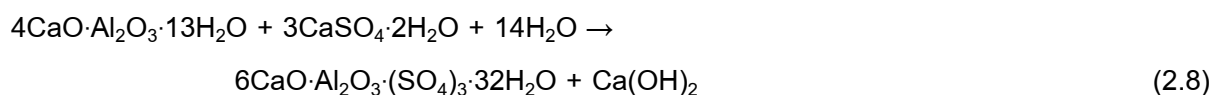
3. การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าร้อยละ 10 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ในช่วงนี้เกิดขึ้นในอัตราที่สูง การตากแห้งที่สภาวะนี้ทำให้น้ำระหว่างแผ่น C-S-H ถูกขจัดออกไปและทำให้แผ่น C-S-H เคลื่อนเข้าหากันการหดตัวจะเป็นแบบกลับคืนได้ แต่ถ้าวการตากแห้งรุนแรงและนานพอแผ่น C-S-H ที่เคลื่อนที่เข้าหากันจะสามารถยึดเกาะกันได้ซึ่งทำให้เกิดการหดตัวถาวร

2.1.13 กลไกการกัดกร่อนโดยโซเดียมซัลเฟต

การกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ขึ้นอยู่กับปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ในปูนซีเมนต์และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยกลไกความเสียหายเนื่องจากการกระทำซัลเฟตของคอนกรีตเริ่มจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ก่อให้เกิดยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังสมการที่ 2.7



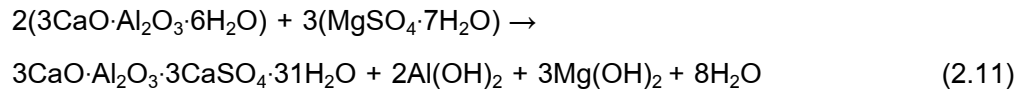
การทำปฏิกิริยากับสารประกอบของอะลูมิเนียม ($(4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O})$, $(4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot (12-18)\text{H}_2\text{O}$, $(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$) ทำให้เกิดเป็นสารประกอบของเอ็ทริงไกท์ ($6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) ที่มีปริมาตรและความไม่เสถียรเพิ่มขึ้น จึงทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว ดังแสดงในสมการที่ 2.8 ถึง 2.10



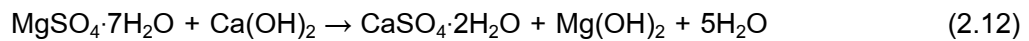
ยิปซัม และเอ็ทริงไกท์ที่เกิดขึ้นจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นกว่า 2 เท่า ทำให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์จนแตกร้าว

2.1.14 กลไกการกัดกร่อนโดยแมกนีเซียมซัลเฟต

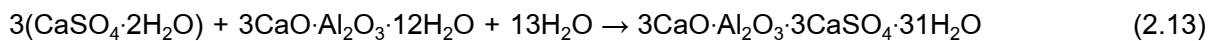
แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) จากน้ำทะเลทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต จากคอนกรีตได้เป็นแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) หรือเรียกอีกชื่อ หนึ่งว่า เอ็ทริงไกท์ (Ettringite) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) และน้ำ (H_2O) ดังสมการที่ 2.11



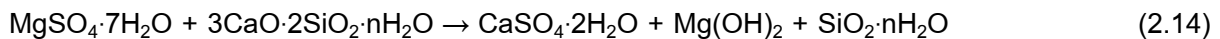
แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ได้เป็น แคลเซียมซัลเฟต หรือยิปซั่ม ($\text{CaSO}_4\cdot2\text{H}_2\text{O}$) ดังสมการที่ 2.12



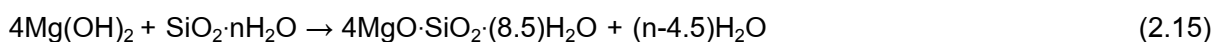
แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซั่มที่ได้สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตได้เป็น แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต หรือเอ็ททริงไกท์ (Ettringite) ดังสมการที่ 2.13



นอกจากนี้แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ยังทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ปฏิกิริยานี้เป็นการดึงแคลเซียม (Decalcification) จากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) และซิลิกาเจล ($\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$) ดังสมการที่ 2.14



แคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นในสมการที่ 2.14 สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot6\text{H}_2\text{O}$) ดังแสดงในสมการที่ 2.13 ได้อีก และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล เกิดเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ดังสมการที่ 2.15



ยิปซั่มที่เกิดตาม สมการที่ 2.12 และ 2.14 และเอ็ททริงไกท์ที่เกิดตาม สมการที่ 2.11 และ 2.13 มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าสารประกอบเดิม มีการขยายตัวทำให้มีปริมาตรมากขึ้น และเกิดแรงดันภายในคอนกรีต เป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าว ส่วนซิลิกาเจลและแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเกิดตามสมการที่ 2.14 และ 2.15 ซึ่งมีความสามารถในการเชื่อมประสานต่ำทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง

2.2 ผลงานที่เกี่ยวข้อง

Reactive Powder Concrete เริ่มขึ้นเมื่อวิศวกร Richard และ Cherezy (1995) ได้เผยแพร่ผลงานเกี่ยวกับคอนกรีตชนิดพิเศษที่มีความสามารถของวัสดุผงในการทำปฏิกิริยาได้สูง (Reactive Powder Concrete) เป็นครั้งแรก ทำให้เกิดการตื่นตัวและเริ่มมีศึกษาถึงแนวคิด เทคนิคและวิธีการผลิตคอนกรีตชนิดนี้ขึ้นในหลายประเทศ ดังเช่นในประเทศแคนาดา Reactive Powder Concrete ถูกนำมาผลิตเป็นโครงสร้างสะพานชนิดมีการอัดแรงภายนอก (Post-tensioned Concrete) สำหรับคนเดินข้ามแม่น้ำ บริษัทผู้คิดค้น Reactive Powder Concrete ได้นำ Reactive Powder Concrete มาผลิตเป็นท่อระบายเสียเพื่อจำหน่ายในประเทศสหรัฐอเมริกา วิศวกรของจีนได้ศึกษา Reactive Powder Concrete เพื่อนำไปใช้แทนโครงสร้างเหล็กในพื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมรุนแรงซึ่งมีความแตกต่างของอุณหภูมิในฤดูกาลต่างๆ ก่อนข้างสูง จากการศึกษาข้อมูลในอดีตพบว่า ยังไม่มีผู้ศึกษาวิจัยและการใช้งานในสภาวะจริงที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตชนิดพิเศษความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้สูง (Reactive Powder Concrete) ในประเทศไทย โดยในอดีตที่ผ่านมา มีเพียงการศึกษาเกี่ยวกับคอนกรีตกำลังสูงหรือคอนกรีตสมรรถนะสูงเท่านั้น

Richard และ Cherezy (1994) ได้รายงานผลการพัฒนา Reactive Powder Concrete โดยส่วนผสมที่ใช้ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1,000 กิโลกรัม ทรายละเอียดและควอทซ์บด 900-1,000 กิโลกรัม ซิลิกาฟูม 230 กิโลกรัม น้ำ 150-180 กิโลกรัม และเส้นใยเหล็กละเอียด 630 กิโลกรัม รวมกับน้ำยาลดน้ำอย่างยั้งยวด ตัวอย่างถูกอัดให้แน่นด้วยวิธีทางกลและบ่มที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงถึง 6,800 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และกำลังดัดสูงถึง 1,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 7.5×10^5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

Colleparidi และคณะ (1996) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของประเภทของปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูมที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของ RPC โดยทดลองกับปูนซีเมนต์ 3 ชนิดที่มีค่า C_3A และ Blaine Fineness ต่างๆ กัน และซิลิกาฟูม 3 ชนิดที่มีสีและองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน พบว่าปูนซีเมนต์ที่ให้ผลดีกับกำลังรับแรงอัดคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มี C_3A ต่ำ และมีค่า Blaine Fineness 340 ตารางเมตรต่อกิโลกรัม และซิลิกาฟูมที่ให้ผลดีกับกำลังรับแรงอัดคือ ซิลิกาฟูมสีขาวที่ไม่มีคาร์บอนและมีขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยที่ 0.7 ไมครอน สามารถพัฒนากำลังอัดของ RPC ได้ถึง 2,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์กับ 0.18 และบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และผลเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ระหว่างร้อยละ 45 ถึง 11 พบว่าทำให้อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงเหลือ 1,600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้วิธีการบ่มเช่นเดิม

Zenni, H. และคณะ (1996) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชันของ Reactive Powder Concrete และปฏิกิริยาปอซโซลานิกด้วยวิธี SI NMR ที่มีส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟุ่ม และควอทซ์บด โดยตัวอย่างมีการผ่านกระบวนการทางความร้อนระหว่างอุณหภูมิ 20 ถึง 25 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาอิทธิพลของปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิก จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการใช้ซิลิกาฟุ่มในปฏิกิริยาปอซโซลานิก และความยาวของสายแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) มีค่าเพิ่มขึ้นตามกระบวนการทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น

Colleparidi และคณะ (1997) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสารลดน้ำยิ่งยวดที่มีต่อสมรรถนะของ RPC พบว่าสารลดน้ำยิ่งยวดที่เป็นส่วนประกอบของอาคริลิกโพลีเมอร์ให้สมรรถนะที่ดีกว่าสารลดน้ำยิ่งยวดที่มีส่วนประกอบของแนฟธาซีนและเมลามีนโดยให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่ำกว่าและค่ากำลังรับแรงอัดที่คอนกรีตอายุ 3 วัน สูงกว่า โดยที่อายุ 1 วัน RPC ที่ใช้อาคริลิกโพลีเมอร์จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามากเมื่อใช้ร่วมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำและมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ ทั้งนี้เกิดจากผลของการหน่วงอย่างแรงเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ร่วมกับซิลิกาฟุ่มบางประเภท เมื่อใช้ร่วมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทอื่นแล้ว ไม่ปรากฏผลของการหน่วงของสารลดน้ำประเภทอาคริลิกนี้ ทำให้กำลังอัดที่ 1 วันมีค่าค่อนข้างสูง และที่อายุ 28 วัน เมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้องค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าขึ้นอยู่กับประเภทของปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟุ่ม และสารลดน้ำยิ่งยวด อย่างไรก็ตามผลการศึกษาที่ได้ให้ค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 1,600-1,800 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งต่ำกว่าที่ผู้คิดค้นได้รายงานไว้ซึ่งมีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 1,700-2,300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

Colleparidi และคณะ (1997) ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของ RPC ดัดแปลงโดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง RPC ตามสัดส่วนผสมดั้งเดิม กับ RPC ดัดแปลงที่ใช้หินธรรมชาติขนาดใหญ่สุด 8 มม. ในการแทนที่ทรายละเอียด และ/หรือแทนที่ส่วนของวัสดุประสานประเภทปูนซีเมนต์ โดยได้ทำการหล่อ RPC ตามสัดส่วนดั้งเดิมในระดับความหนืดที่เป็น Plastic-Fluid และเขย่าให้แน่นแล้วบ่มที่ ก) อุณหภูมิห้อง ข) บ่มด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ค) บ่มด้วยไอน้ำแรงดันสูงที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส การเพิ่มมวลรวมหยาบคัดขนาดไม่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ลดลง และไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ซึ่งให้ผลที่ตรงกันข้ามกับแนวคิดที่ไม่ใช้มวลรวมหยาบเพื่อให้ได้กำลังรับแรงอัดที่สูงถึง 2,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทั้ง RPC สูตรดั้งเดิมและสูตรดัดแปลงที่ใช้มวลรวมหยาบมีสมรรถนะที่ดีขึ้นในด้านกำลังรับแรงอัด การหดตัวจากการแห้งตัวและการคืบจากความเครียดมีค่าลดลง เมื่อใช้การบ่มด้วยไอน้ำ คุณสมบัติที่ดีขึ้นนี้มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างระดับจุลภาคที่แน่นขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งใน RPC ที่บ่มที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

Feylessoufi, A. และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาและพัฒนาเพื่อควบคุมการให้ความร้อนกับการผลิต Reactive Powder Concrete ซึ่งกระบวนการผลิตจะประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก คือ องค์ประกอบของวัสดุ กระบวนการผสมและกระบวนการให้ความร้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาใน

ประเด็นของการควบคุมอัตราดังกล่าวได้ข้อสรุปคือ การควบคุมอัตราการให้ความร้อนด้วยระบบที่ปรับเปลี่ยนได้รวมกับการคงอัตราน้ำต่อปูนซีเมนต์จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

Collepari และคณะ (2000) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการดัดแปลง RPC ด้วยมวลรวมเทียมที่ทำจากปูนซีเมนต์เม็ดบดหยาบที่มีขนาด 100-400 ไมครอน ซึ่งใช้แทนทรายและที่มีขนาด 0.1-8 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับ RPC ตามสูตรดั้งเดิมที่ใช้ทรายและหินตามขนาดข้างต้น โดยใช้แหล่งปูนซีเมนต์เม็ดบดหยาบแหล่งเดียวกับที่ผลิตพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ใช้ในการผสม ซึ่งแนวความคิดนี้เกิดขึ้นเพื่อที่จะปรับปรุงกำลังการยึดเกาะของซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ผิวของปูนเม็ด และบ่มตัวอย่างทั้งหมดที่ ก) อุนทุมมิห้อง ข) บ่มด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ค) บ่มด้วยไอน้ำแรงดันสูงที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และทดสอบกำลังรับแรงอัดตามอายุจาก 1 วันถึง 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า สามารถพัฒนากำลังอัดที่ 28 วันได้สูงถึง 2,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และไม่ว่าจะใช้อุนทุมมิในการบ่มเท่าใดพบว่าการใช้ปูนซีเมนต์เม็ดบดหยาบแทนมวลรวมที่ได้จากธรรมชาติมีผลทำให้พัฒนากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันได้สูงถึง 2,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างปูนซีเมนต์กับมวลรวมได้รับการปรับปรุงเมื่อใช้ปูนซีเมนต์เม็ดบดหยาบแทนมวลรวมที่ได้จากธรรมชาติ จากการสังเกตด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งขึ้นและบ่งชี้ว่าผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมธรรมชาติเป็นจุดที่อ่อนแอใน RPC

Jianxin Ma และ Holger Schneider (2002) ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของ Ultra High Performance Concrete (UHPC) ซึ่งเป็นคอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมใกล้เคียงกับ RPC แต่ไม่มีการใช้เส้นใยเสริมกำลังในคอนกรีตเท่านั้น โดยได้ดัดแปลง UHPC สูตรดั้งเดิมด้วยการใช้ผงควอทซ์ละเอียดแทนปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูมพบว่าสามารถผลิต UHPC ที่ไหลตัวได้ที่กำลังอัด 1,550 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยไม่จำเป็นต้องใช้วิธีการบ่มด้วยความร้อนหรือวิธีการพิเศษอื่นๆ และสามารถผลิต UHPC ที่มีกำลังอัดสูงถึง 2,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อสามารถควบคุมปริมาณฟองอากาศภายในคอนกรีตไว้ไม่ให้เกินร้อยละ 1 และพบว่า UHPC เกิดการหดตัวแบบออโตจีเนียส (Autogeneous) มากกว่าคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วัน

Feylessoufi, A และคณะ (2001) ได้วิเคราะห์กลไกการหดตัวแบบออโตจีเนียสในช่วงต้นของ Reactive Powder Concrete โดยใช้การวัดการกระจายของคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการวัดการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันผ่านคาลอริมิเตอร์ จากการวิเคราะห์ได้ผลคือ สามารถจะระบุช่วงการเกิดได้ 5 ช่วงคือ ช่วงการก่อตัวด้วยการสร้างพันธะระยะสั้น ช่วงการก่อตัวของมวลรวม การพัฒนาพันธะการเสริมความแข็งแรงด้วยการเชื่อมพันธะเข้าด้วยกัน และช่วงที่เชื่อมกันเรียบร้อยแล้ว

Collepari และคณะ (2003) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของประเภทของเส้นใยที่มีต่อสมรรถนะของ Reactive Powder Concrete โดยการศึกษาเกี่ยวกับ Reactive Powder Concrete ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ที่ไม่มี C_3A และใช้น้ำยาลดน้ำยั้งยวดประเภทอะคริลิก และซิลิกาฟูมแบบ Undensified ร่วมกับ quartz sand ที่มีขนาดใหญ่สุด 1 มม. และผิวนแปร Aspect Ratio ขนาด รูปร่างและการเตรียมผิวของเส้นใยโลหะที่ใช้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินถึงอิทธิพลของชนิดของเส้นใยที่มีต่อสมรรถนะในด้านกำลัง ความเหนียว และความคงทนในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง ผลการศึกษาพบว่า

1. รูปร่างของเส้นใยไม่มีผลกระทบต่อ Workability ของ Reactive Powder Concrete
2. เส้นใยที่ทำจากทองเหลืองให้สมรรถนะทางกลดีกว่า Reactive Powder Concrete ที่ผสมจากเส้นใยประเภทอื่นๆ
3. เส้นใยเหล็กมีอิทธิพลต่อสมรรถนะทางกลของ Reactive Powder Concrete โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลคือ ปริมาณของเส้นใยที่กระจายอยู่ใน Reactive Powder Concrete และแรงยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เมตริกซ์กับเส้นใย และยังพบว่าแรงยึดเกาะกับเส้นใยนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย (ขนาด รูปร่าง และการเตรียมผิว)
4. คลอไรด์ที่มาจากน้ำทะเลหรือสารละลาย $NaCl$ ที่เข้มข้นร้อยละ 10 แทบจะไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปใน Reactive Powder Concrete ได้ตลอดระยะเวลา 6 เดือน ของการทดลอง ซึ่งทำให้แทบไม่สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้
5. สมรรถนะทางกลของ Reactive Powder Concrete มีค่าคงที่แม้ว่าชิ้นตัวอย่างจะถูกเก็บอยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง สำหรับ Reactive Powder Concrete ที่ใช้เส้นใยที่ชุบกลวไนซ์พบว่าไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ผิว (ทราบจากการเกิดออกซิเดชัน)

Yazici, H. (2006) ได้ทำการศึกษาถึงการบ่ม Ultra High Strength Concrete (UHSC) ที่ใช้เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กแทนที่ในส่วนของปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ โดยนำแต่ละส่วนผสมผ่านกระบวนการบ่มด้วยวิธีมาตรฐาน การบ่มด้วยวิธีไอน้ำแรงดันสูง และบ่มด้วยไอน้ำในระยะเวลาที่ต่างกัน จากการศึกษาพบว่า UHSC ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 ผ่านการบ่มด้วยไอน้ำ ระยะเวลา 12 วัน ให้กำลังอัดประมาณ 160 เมกะปาสคาล ส่วนตะกรันเตาถลุงแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 ผ่านการบ่มด้วยไอน้ำแรงดันสูง 8 ชั่วโมง ให้กำลังอัดประมาณ 190 เมกะปาสคาล ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับค่าต่ำสุดของ Reactive Powder Concrete

Ming-Gin Lee และคณะ (2007) ได้ศึกษาถึงการให้ Reactive Powder Concrete เป็นวัสดุซ่อมแซมในงานคอนกรีต โดยได้ทำการศึกษาถึงความสามารถของ RPC ในด้านความคงทน กำลังอัด กำลังดัด และแรงยึดเหนี่ยวต่อเหล็กเสริม ซึ่งได้ทำการทดลองเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป และมอร์ตาร์กำลังสูง (High Strength Mortar, HSM) จากการทดสอบพบว่า RPC มีกำลังอัดกำลังดัด และแรงยึดเหนี่ยวที่ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาอย่างมาก และมีความคงทนต่อการขัดสีมากกว่ามอร์ตาร์กำลังสูงถึง 4 เท่า และมากกว่าคอนกรีตธรรมดาถึง 8 เท่า

An Ming – Zhe และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษานาฬิกาของตัวอย่างทดสอบและปริมาณเส้นใยเหล็กที่มีผลต่อการทดสอบกำลังอัดของ Reactive Powder Concrete โดยทำการทดสอบชิ้นตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ขนาด 50 , 70.7 และ 100 มิลลิเมตร ใช้ส่วนผสมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0, 1 และ 2 โดยปริมาตร เปรียบเทียบกำลังอัดที่ทดสอบกับทฤษฎี Bazant Size-effect Theory จากการศึกษพบว่า ชิ้นตัวอย่างที่ใช้ทดสอบขนาดใหญ่จะให้ค่ากำลังอัดน้อยกว่าชิ้นตัวอย่างทดสอบขนาดเล็ก ซึ่งจากการเปรียบเทียบตามสมการจากทฤษฎีดังกล่าวชิ้นตัวอย่างขนาด 100 มิลลิเมตร จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการคำนวณ โดยผลของตัวอย่างทดสอบจะให้ค่ากำลังอัดมากขึ้นเมื่อชิ้นตัวอย่างทดสอบมีขนาดเล็กกว่า 100 มิลลิเมตร

Yazici, H. และคณะ (2008) ได้เพิ่มทางเลือกใหม่ในการผลิต Reactive Powder Concrete ด้วยการใช้เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงแทนที่ในส่วนของปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูม ซึ่งสามารถลดราคาของส่วนผสมของ Reactive Powder Concrete ได้ จากผลการศึกษาพบว่า สามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูมด้วยเถ้าลอยหรือตะกรันเตาถลุง โดยสัดส่วนของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์(CaO/SiO_2) ที่ 1.30 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสม และกำลังอัดที่ประกอบด้วยสารเคมีผสมเพิ่มชนิดแร่ธาตุทั้งสองมีค่าถึง 281 เมกะปาสคาล เมื่อผ่านกระบวนการทางด้านความร้อนและความดันระหว่างก่อตัวและแข็งตัว นอกจากนั้นสามารถลดปริมาณการใช้ซิลิกาฟูมได้ร้อยละ 22 ถึง 23

ปัจจุบันได้มีการวิจัยเชิงประยุกต์ใช้ Reactive Powder Concrete ในงานก่อสร้างเป็นอย่างมาก เช่น การใช้ RPC ในการออกแบบ และก่อสร้างสะพาน SAKATA-MIRAI FOOTBRIDGE ที่ประเทศญี่ปุ่น ศึกษาการออกแบบโครงสร้างท่อระบายน้ำโดยใช้ RPC ที่ประเทศจีน และ การศึกษาถึงการนำ RPC เป็นวัสดุในการซ่อมแซมเป็นต้น จากการศึกษาข้อมูลในอดีตพบว่า ยังไม่มีผู้ศึกษาวิจัย Reactive Powder Concrete ในประเทศไทย โดยในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับคอนกรีตกำลังสูง หรือคอนกรีตสมรรถนะสูงเท่านั้น

บทที่ 3

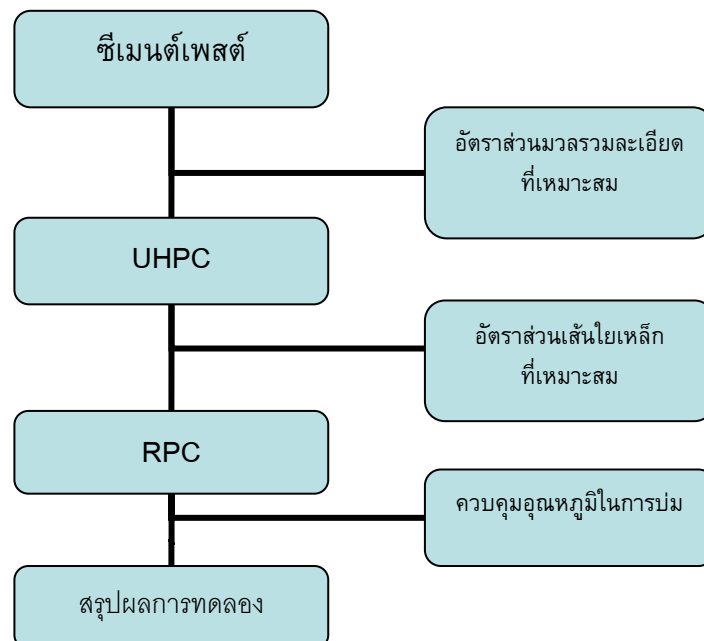
ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ทัวไป

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง (Experimental Research) ข้อมูลได้จากการวิเคราะห์สัดส่วนที่เหมาะสมของเส้นใยเหล็กที่ร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 , 3 , 3.5 และ 4.0 โดยปริมาตร ตามลำดับ และทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตที่ทดลองผสมเส้นใยเหล็กตามปริมาณดังกล่าว

3.2 วิธีการจัดเก็บและรวบรวมข้อมูล

ศึกษารวบรวมข้อมูลถึงสัดส่วนของซีเมนต์เฟสท์และ Ultra High Performance Concrete (UHPC) ที่เหมาะสมเพื่อนำสัดส่วนดังกล่าวมาพัฒนา Reactive Powder Concrete (RPC) และศึกษาถึงปริมาณเส้นใยเหล็กต่อสมรรถนะของ Reactive Powder Concrete โดยผสมปริมาณของเส้นใยเหล็กที่ใช้ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 0.50 - 4.00 โดยปริมาตร โดยทดสอบสมบัติเชิงกล และเชิงกายภาพ



ภาพที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนการศึกษาและทดลอง

3.2.1 แนวทางการศึกษาและทดลอง

1. ศึกษาและทดลองหาส่วนผสมของซีเมนต์เฟสท์ที่ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซีลีกาฟุม สารลดน้ำ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ โดยจะทำการศึกษาความเข้ากันได้ของส่วนผสมที่มีผลต่อการก่อตัวของซีเมนต์เฟสท์ โดยจะทำการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัด เมื่อตัวอย่างมีอายุที่ 7 และ 28 วัน ผ่านการบ่มด้วยการแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง นำส่วนผสมที่มีการก่อตัวปกติและให้ค่ากำลังอัดสูงสุดในแต่ละช่วงของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไปทำการหาส่วนผสมของ UHPC ต่อไป

2. ศึกษาและทดลองหาส่วนผสมของ UHPC ที่ประกอบด้วย ส่วนผสมซีเมนต์เฟสท์ และทรายละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 1 ถึง 2 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ โดยจะทำการศึกษาถึงส่วนผสมที่เหมาะสมของ UHPC โดยจะทำการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวปกติ การไหลแผ่ และทดสอบหาความต้านทานแรงอัด ขึ้นตัวอย่างมีอายุ 7 และ 28 วัน ผ่านการบ่มด้วยการแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง นำค่าส่วนผสมที่มีการก่อตัวปกติ มีการไหลแผ่ปกติและให้ค่ากำลังอัดสูงสุด, ส่วนผสมที่มีการก่อตัวปกติและให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ส่วนผสมที่มีการก่อตัวปกติ มีการไหลแผ่สูง ไปหาส่วนผสมของ RPC ต่อไป

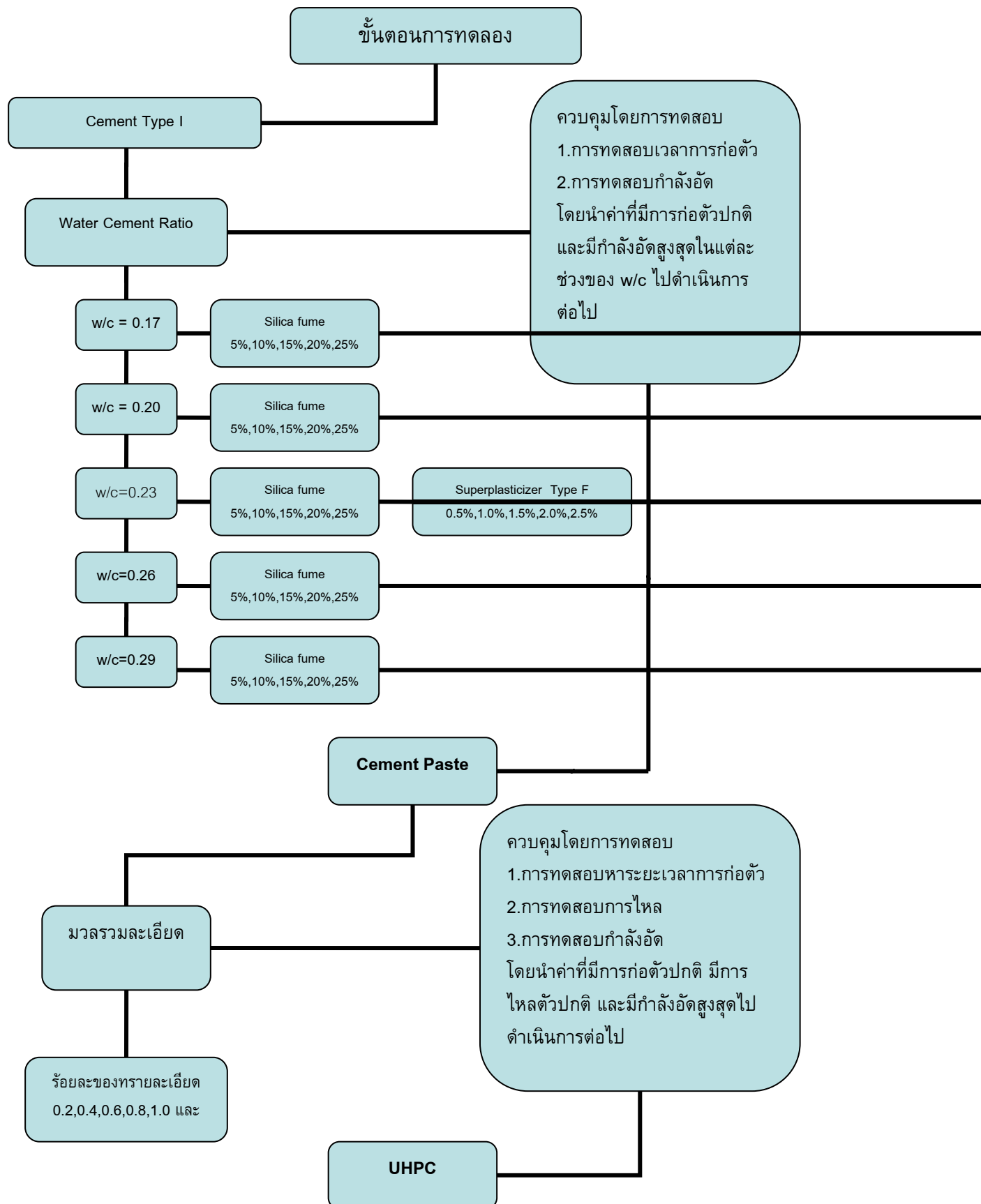
3. ศึกษาและทดลองหาส่วนผสมของ RPC ที่ประกอบด้วย ส่วนผสม UHPC และเส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ โดยจะทำการศึกษาถึงส่วนผสมที่เหมาะสมของ RPC โดยจะทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของ ประกอบด้วย ระยะเวลาในการก่อตัว อัตราการไหล ค่ากำลังอัด ค่ากำลังดึง ค่ากำลังดัด ที่อายุ 7 และ 28 วัน ผ่านการบ่มด้วยการแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องตามลำดับและทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ ประกอบด้วย การหดตัวแบบอโตจีเนียสและแบบแห้ง

4. ศึกษาและทดสอบสมบัติของ RPC ที่ผ่านการบ่มด้วยไอน้ำความดันสูง โดยเริ่มให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอจนได้ความดันประมาณ 2.0 เมกะปาสคาล และคงความร้อนที่ความดันดังกล่าวไว้ประมาณ 5 ถึง 8 ชั่วโมง และทำการลดอุณหภูมิลงภายในเวลา 30 นาที จนถึงอุณหภูมิปกติ และนำตัวอย่างทดสอบมาทำการบ่มโดยการแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนอายุครบ 7 และ 28 วัน นำไปทดสอบสมบัติ กำลังอัด ค่ากำลังดึง ค่ากำลังดัด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น การหดตัวแบบอโตจีเนียสและแบบแห้ง โดยนำค่าดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการบ่มด้วยการแช่น้ำ

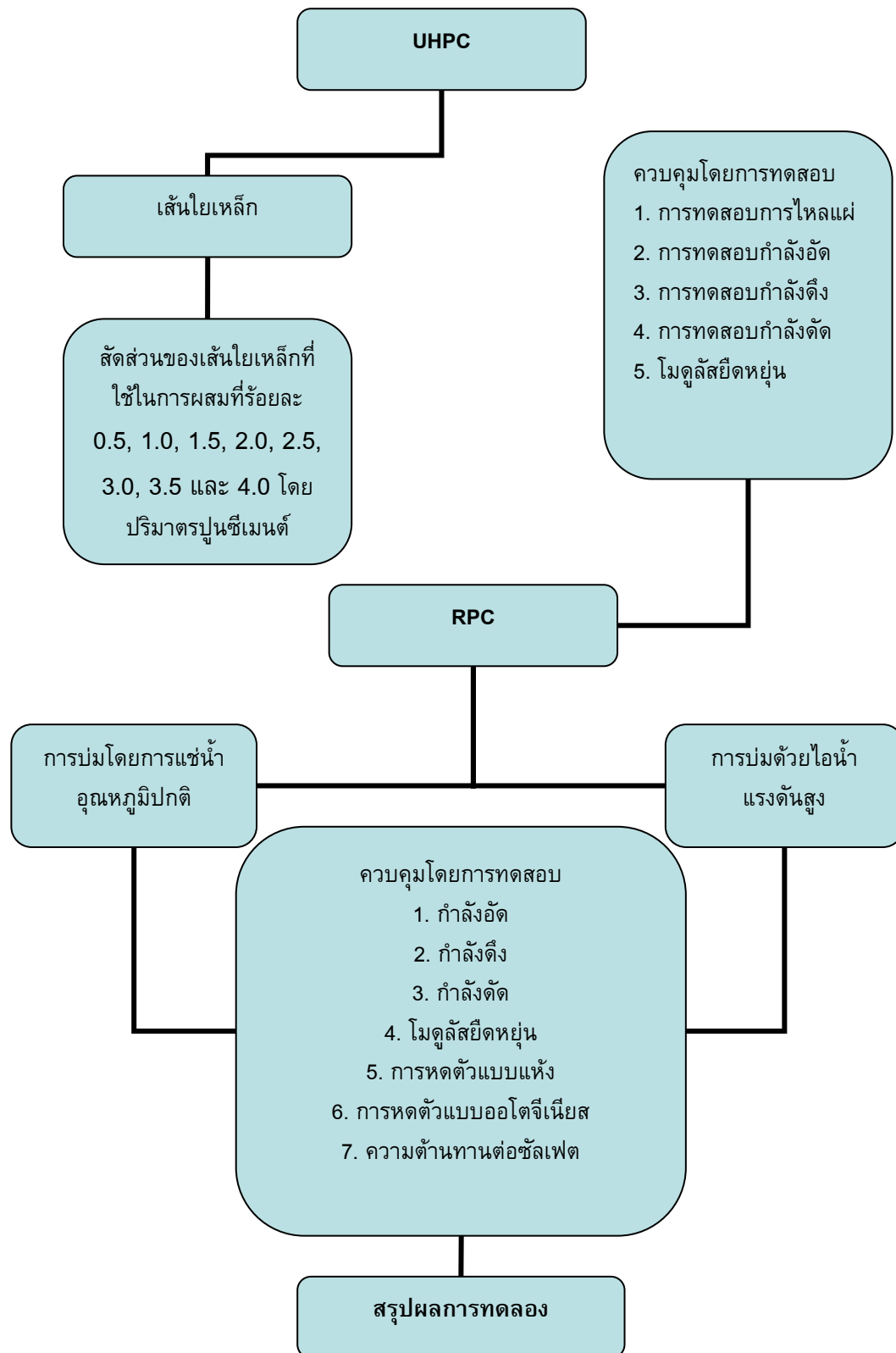
5. ศึกษาและทดสอบสมบัติของ RPC ทางด้านความทนทานต่อซัลเฟต โดยนำตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการบ่มโดยการแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเปรียบเทียบกับการบ่มด้วยไอน้ำแรงดันสูงแช่ในสารละลายสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งทดสอบสมบัติในด้านการสูญเสียกำลังอัด การสูญเสียน้ำหนัก และการเปลี่ยนแปลงความยาว

ตารางที่ 3.1
แนวทางการศึกษาและทดลอง

ลำดับ	เรื่องที่ศึกษา	ตัวแปรที่ศึกษา	ปัจจัยที่ควบคุม	ผลที่ได้จากการทดลอง
1	ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่เหมาะสม - ระยะเวลาการก่อตัว - กำลังอัดที่ 7 และ 28 วัน	อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.17, 0.20, 0.23, 0.26 และ 0.29 สัดส่วนซิลิกาฟูมร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 และสัดส่วนของสารลดน้ำร้อยละ 0, 0.5, 1.00, 1.50, 2.00 และ 2.50	สมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่มีความสามารถรับกำลังอัดสูงสุด และการก่อตัวปกติในแต่ละอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์	ทราบอัตราส่วนที่เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขการทดสอบจริง
2	ส่วนผสมของ UHPC ที่เหมาะสม - ระยะเวลาการก่อตัว - กำลังอัดที่ 7 และ 28 วัน - การไหลตัว	ปริมาณปูนซีเมนต์ 1 ส่วนต่อปริมาตรทรายละเอียดที่ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2	- ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่ได้จากข้อ 1 - ทำการบ่มด้วยการแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง	ทราบอัตราส่วนที่เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขการทดสอบจริง
3	ปริมาณเส้นใยเหล็กต่อสมรรถนะของ RPC - การไหลตัว - กำลังอัด 7 และ 28 วัน - กำลังดัด 7 และ 28 วัน - กำลังดึง 7 และ 28 วัน - การหดตัวจากการแห้ง - การหดตัวออโตจีเนียส	สัดส่วนของปริมาณเส้นใยที่ใช้ในการผสมที่ร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 โดยปริมาตรปูนซีเมนต์	- ส่วนผสมของ UHPC ที่ได้จากข้อ 2 - ทำการบ่มด้วยการแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง	สัดส่วนที่เหมาะสมของเส้นใยเหล็กที่ใช้ในการผลิต RPC
4	ผลของอุณหภูมิในการบ่มต่อสมรรถนะของ RPC - กำลังอัด - กำลังดัด - โมดูลัสยืดหยุ่น - การหดตัวจากการแห้ง - การทนต่อซัลเฟต	บ่มโดยการแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเทียบกับการบ่มด้วยไอน้ำแรงดันสูงที่ 2 เมกะปาสคาล โดยทำการทดสอบที่ 7 และ 28 วัน	สัดส่วนผสมของ RPC ที่ได้จากข้อ 3	ทราบถึงสมบัติของ RPC ที่ได้จากการบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ กัน



ภาพที่ 3.2 แผนผังแสดงรายละเอียดและขั้นตอนการทดลอง



ภาพที่ 3.2 แผนผังแสดงรายละเอียดและขั้นตอนการทดลอง (ต่อ)

3.2.2 การแบ่งกลุ่มการทดลองและสัญลักษณ์ของส่วนผสม

เพื่อให้เป็นที่เข้าใจในการทดลองและการอ่านค่าส่วนผสมของตัวอย่างได้กำหนดตัวอักษรย่อสำหรับชื่อส่วนผสมไว้ดังนี้

X-XXXXXXXX - XX

1-23456789 - 1011

1. หลักที่ 1 ใช้บอกประเภทของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ของบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)
 2. หลักที่ 2 และ 3 ใช้บอกสัดส่วนร้อยละของปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก (w/c) เช่น 29 หมายถึง ส่วนผสมนั้นมีค่า $w/c = 0.29$ ในงานวิจัยนี้ใช้ค่า w/c อยู่ในช่วง 0.17 ถึง 0.29
 3. หลักที่ 4 และ 5 ใช้บอกสัดส่วนร้อยละปริมาณสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าปริมาณสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 0.5 ถึง 2.5
 4. หลักที่ 6 และ 7 ใช้บอกสัดส่วนร้อยละของปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก เช่น 25 หมายถึง ส่วนผสมนั้นมีปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อน้ำหนักของปูนซีเมนต์อยู่ร้อยละ 25
 5. หลักที่ 8 และ 9 ใช้บอกสัดส่วนของทรายละเอียดต่อปูนซีเมนต์โดยปริมาตร เช่น 1.5 หมายถึง ปริมาณปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ต่อ ปริมาณทรายละเอียด 1.5 ส่วน โดยการวิจัยนี้จะมีสัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายละเอียดอยู่ในช่วง 1 ต่อ 0.2 ถึง 1 ต่อ 1.2
 6. หลักที่ 10 และ 11 ใช้บอกสัดส่วนร้อยละของเส้นใยเหล็กต่อปริมาตร เช่น 1.5 หมายถึง ส่วนผสมดังกล่าวมีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 1.5 ต่อปริมาตร
- ตัวอย่างชื่อส่วนผสม เช่น 1-29102500-00 หมายถึง ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.29 ร่วมกับสารลดน้ำร้อยละ 10 และซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 25 โดยที่ส่วนผสมดังกล่าวยังไม่ได้ผสมทรายละเอียดและเส้นใยเหล็ก

3.2.3 ส่วนผสมและจำนวนตัวอย่างการทดสอบ

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการหาส่วนผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เฟสค์ ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2

ส่วนผสมและจำนวนการทดสอบซีเมนต์เฟสค์

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาณสารลดน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณซิลิกาฟูมต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ซิลิกาฟูม (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ปริมาณ สารลดน้ำ (กรัม)
1-170505	0.17	0.5	5	1500	75	249.9	7.5
1-170510	0.17	0.5	10	1500	150	249.9	7.5
1-170515	0.17	0.5	15	1500	225	249.9	7.5
1-170520	0.17	0.5	20	1500	300	249.9	7.5
1-170525	0.17	0.5	25	1500	375	249.9	7.5
1-171005	0.17	1	5	1500	75	244.8	15
1-171010	0.17	1	10	1500	150	244.8	15
1-171015	0.17	1	15	1500	225	244.8	15
1-171020	0.17	1	20	1500	300	244.8	15
1-171025	0.17	1	25	1500	375	244.8	15
1-171505	0.17	1.5	5	1500	75	239.7	22.5
1-171510	0.17	1.5	10	1500	150	239.7	22.5
1-171515	0.17	1.5	15	1500	225	239.7	22.5
1-171520	0.17	1.5	20	1500	300	239.7	22.5
1-171525	0.17	1.5	25	1500	375	239.7	22.5
1-172005	0.17	2	5	1500	75	234.6	30

ตารางที่ 3.2

ส่วนผสมและจำนวนการทดสอบซีเมนต์เฟสค์

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาณสารลดน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณซิลิกาฟูมต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ซิลิกาฟูม (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ปริมาณ สารลดน้ำ (กรัม)
1-172010	0.17	2	10	1500	150	234.6	30
1-172015	0.17	2	15	1500	225	234.6	30
1-172020	0.17	2	20	1500	300	234.6	30
1-172025	0.17	2	25	1500	375	234.6	30
1-172505	0.17	2.5	5	1500	75	229.5	37.5
1-172510	0.17	2.5	10	1500	150	229.5	37.5
1-172515	0.17	2.5	15	1500	225	229.5	37.5
1-172520	0.17	2.5	20	1500	300	229.5	37.5
1-172525	0.17	2.5	25	1500	375	229.5	37.5

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ส่วนผสมและจำนวนการทดสอบซีเมนต์เฟสค์

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาณสารลดน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของปริมาณซิลิกาฟูม ต่อปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ซิลิกาฟูม (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ปริมาณ สารลดน้ำ (กรัม)
1-200505	0.20	0.5	5	1500	75	294.9	7.5
1-200510	0.20	0.5	10	1500	150	294.9	7.5
1-200515	0.20	0.5	15	1500	225	294.9	7.5
1-200520	0.20	0.5	20	1500	300	294.9	7.5
1-200525	0.20	0.5	25	1500	375	294.9	7.5
1-201005	0.20	1	5	1500	75	289.8	15
1-201010	0.20	1	10	1500	150	289.8	15
1-201015	0.20	1	15	1500	225	289.8	15
1-201020	0.20	1	20	1500	300	289.8	15
1-201025	0.20	1	25	1500	375	289.8	15
1-201505	0.20	1.5	5	1500	75	284.7	22.5
1-201510	0.20	1.5	10	1500	150	284.7	22.5
1-201515	0.20	1.5	15	1500	225	284.7	22.5
1-201520	0.20	1.5	20	1500	300	284.7	22.5
1-201525	0.20	1.5	25	1500	375	284.7	22.5

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ส่วนผสมและจำนวนการทดสอบซีเมนต์โพสต์

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาณสารลดน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของปริมาณซิลิกาฟูม ต่อปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ซิลิกาฟูม (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ปริมาณ สารลดน้ำ (กรัม)
1-202005	0.20	2	5	1500	75	279.6	30
1-202010	0.20	2	10	1500	150	279.6	30
1-202015	0.20	2	15	1500	225	279.6	30
1-202020	0.20	2	20	1500	300	279.6	30
1-202025	0.20	2	25	1500	375	279.6	30
1-202505	0.20	2.5	5	1500	375	274.5	37.5
1-202510	0.20	2.5	10	1500	75	274.5	37.5
1-202515	0.20	2.5	15	1500	150	274.5	37.5
1-202520	0.20	2.5	20	1500	225	274.5	37.5
1-202525	0.20	2.5	25	1500	300	274.5	37.5

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ส่วนผสมและจำนวนการทดสอบซีเมนต์เฟสค์

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาณสารลดน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของปริมาณซิลิกาฟูม ต่อปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ซิลิกาฟูม (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ปริมาณ สารลดน้ำ (กรัม)
1-230505	0.23	0.5	5	1500	75	339.9	7.5
1-230510	0.23	0.5	10	1500	150	339.9	7.5
1-230515	0.23	0.5	15	1500	225	339.9	7.5
1-230520	0.23	0.5	20	1500	300	339.9	7.5
1-230525	0.23	0.5	25	1500	375	339.9	7.5
1-231005	0.23	1	5	1500	75	334.8	15
1-231010	0.23	1	10	1500	150	334.8	15
1-231015	0.23	1	15	1500	225	334.8	15
1-231020	0.23	1	20	1500	300	334.8	15
1-231025	0.23	1	25	1500	375	334.8	15
1-231505	0.23	1.5	5	1500	75	329.7	22.5
1-231510	0.23	1.5	10	1500	150	329.7	22.5
1-231515	0.23	1.5	15	1500	225	329.7	22.5
1-231520	0.23	1.5	20	1500	300	329.7	22.5
1-231525	0.23	1.5	25	1500	375	329.7	22.5

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ส่วนผสมและจำนวนการทดสอบซีเมนต์เฟสค์

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาณสารลดน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของปริมาณซิลิกาฟูม ต่อปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ซิลิกาฟูม (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ปริมาณ สารลดน้ำ (กรัม)
1-232005	0.23	2	5	1500	75	324.6	30
1-232010	0.23	2	10	1500	150	324.6	30
1-232015	0.23	2	15	1500	225	324.6	30
1-232020	0.23	2	20	1500	300	324.6	30
1-232025	0.23	2	25	1500	375	324.6	30
1-232505	0.23	2.5	5	1500	375	319.5	37.5
1-232510	0.23	2.5	10	1500	75	319.5	37.5
1-232515	0.23	2.5	15	1500	150	319.5	37.5
1-232520	0.23	2.5	20	1500	225	319.5	37.5
1-232525	0.23	2.5	25	1500	300	319.5	37.5

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ส่วนผสมและจำนวนการทดสอบซีเมนต์เฟสค์

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาณสารลดน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของปริมาณซิลิกาฟูม ต่อปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ซิลิกาฟูม (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ปริมาณ สารลดน้ำ (กรัม)
1-260505	0.26	0.5	5	1500	75	384.9	7.5
1-260510	0.26	0.5	10	1500	150	384.9	7.5
1-260515	0.26	0.5	15	1500	225	384.9	7.5
1-260520	0.26	0.5	20	1500	300	384.9	7.5
1-260525	0.26	0.5	25	1500	375	384.9	7.5
1-261005	0.26	1	5	1500	75	379.8	15
1-261010	0.26	1	10	1500	150	379.8	15
1-261015	0.26	1	15	1500	225	379.8	15
1-261020	0.26	1	20	1500	300	379.8	15
1-261025	0.26	1	25	1500	375	379.8	15
1-261505	0.26	1.5	5	1500	75	374.7	22.5
1-261510	0.26	1.5	10	1500	150	374.7	22.5
1-261515	0.26	1.5	15	1500	225	374.7	22.5
1-261520	0.26	1.5	20	1500	300	374.7	22.5
1-261525	0.26	1.5	25	1500	375	374.7	22.5

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ส่วนผสมและจำนวนการทดสอบซีเมนต์เฟสค์

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาณสารลดน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของปริมาณซิลิกาฟูม ต่อปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ซิลิกาฟูม (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ปริมาณ สารลดน้ำ (กรัม)
1-262005	0.26	2	5	1500	75	369.6	30
1-262010	0.26	2	10	1500	150	369.6	30
1-262015	0.26	2	15	1500	225	369.6	30
1-262020	0.26	2	20	1500	300	369.6	30
1-262025	0.26	2	25	1500	375	369.6	30
1-262505	0.26	2.5	5	1500	375	364.5	37.5
1-262510	0.26	2.5	10	1500	75	364.5	37.5
1-262515	0.26	2.5	15	1500	150	364.5	37.5
1-262520	0.26	2.5	20	1500	225	364.5	37.5
1-262525	0.26	2.5	25	1500	300	364.5	37.5

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ส่วนผสมและจำนวนการทดสอบซีเมนต์เฟสค์

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาณสารลดน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของปริมาณซิลิกาฟูม ต่อปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ซิลิกาฟูม (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ปริมาณ สารลดน้ำ (กรัม)
1-290505	0.29	0.5	5	1500	75	429.9	7.5
1-290510	0.29	0.5	10	1500	150	429.9	7.5
1-290515	0.29	0.5	15	1500	225	429.9	7.5
1-290520	0.29	0.5	20	1500	300	429.9	7.5
1-290525	0.29	0.5	25	1500	375	429.9	7.5
1-291005	0.29	1	5	1500	75	424.8	15
1-291010	0.29	1	10	1500	150	424.8	15
1-291015	0.29	1	15	1500	225	424.8	15
1-291020	0.29	1	20	1500	300	424.8	15
1-291025	0.29	1	25	1500	375	424.8	15
1-291505	0.29	1.5	5	1500	75	419.7	22.5
1-291510	0.29	1.5	10	1500	150	419.7	22.5
1-291515	0.29	1.5	15	1500	225	419.7	22.5
1-291520	0.29	1.5	20	1500	300	419.7	22.5
1-291525	0.29	1.5	25	1500	375	419.7	22.5

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ส่วนผสมและจำนวนการทดสอบซีเมนต์เฟสค์

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาณสารลดน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของปริมาณซิลิกาฟูม ต่อปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ซิลิกาฟูม (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ปริมาณ สารลดน้ำ (กรัม)
1-292005	0.29	2	5	1500	75	414.60	30
1-292010	0.29	2	10	1500	150	414.60	30
1-292015	0.29	2	15	1500	225	414.60	30
1-292020	0.29	2	20	1500	300	414.60	30
1-292025	0.29	2	25	1500	375	414.60	30
1-292505	0.29	2.5	5	1500	375	409.5	37.5
1-292510	0.29	2.5	10	1500	75	409.5	37.5
1-292515	0.29	2.5	15	1500	150	409.5	37.5
1-292520	0.29	2.5	20	1500	225	409.5	37.5
1-292525	0.29	2.5	25	1500	300	409.5	37.5

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ส่วนผสมและจำนวนการทดสอบ UHPC

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาณสารลดน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	สัดส่วนทรายละเอียด ต่อปริมาตร ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ทรายละเอียด (กรัม)
1-232505-02	0.23	2.5	5	0.2	1500	375.4
1-232505-04	0.23	2.5	5	0.4	1500	750.8
1-232505-06	0.23	2.5	5	0.6	1500	1126.3
1-232505-08	0.23	2.5	5	0.8	1500	1501.7
1-232505-10	0.23	2.5	5	1.0	1500	1877.2
1-232505-12	0.23	2.5	5	1.2	1500	2252.6
1-232015-02	0.23	2.0	15	0.2	1500	375.4
1-232015-02	0.23	2.0	15	0.4	1500	750.8
1-232015-02	0.23	2.0	15	0.6	1500	1126.3
1-232015-02	0.23	2.0	15	0.8	1500	1501.7
1-232015-02	0.23	2.0	15	1.0	1500	1877.2
1-232015-02	0.23	2.0	15	1.2	1500	2252.6

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ส่วนผสมและจำนวนการทดสอบ UHPC

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาณสารลดน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของปริมาณซิลิกาฟูม ต่อปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	สัดส่วนทรายละเอียด ต่อปริมาตร ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ทรายละเอียด (กรัม)
1-291005-02	0.29	1.0	5	0.2	1500	375.4
1-291005-04	0.29	1.0	5	0.4	1500	750.8
1-291005-06	0.29	1.0	5	0.6	1500	1126.3
1-291005-08	0.29	1.0	5	0.8	1500	1501.7
1-291005-10	0.29	1.0	5	1.0	1500	1877.2
1-291005-12	0.29	1.0	5	1.2	1500	2252.6

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ส่วนผสมและจำนวนการทดสอบ RPC

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาณสารลดน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาตรเส้นใยเหล็กต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	เส้นใยเหล็ก (กรัม)
1-232505-0405	0.23	2.5	5	0.5	1500	48.4
1-232505-0410	0.23	2.5	5	1.0	1500	96.8
1-232505-0415	0.23	2.5	5	1.5	1500	145.2
1-232505-0420	0.23	2.5	5	2.0	1500	193.7
1-232505-0425	0.23	2.5	5	2.5	1500	242.1
1-232505-0430	0.23	2.5	5	3.0	1500	290.5
1-232505-0435	0.23	2.5	5	3.5	1500	338.9
1-232505-0440	0.23	2.5	5	4.0	1500	387.4
1-232505-0605	0.23	2.5	5	0.5	1500	48.4
1-232505-0610	0.23	2.5	5	1.0	1500	96.8
1-232505-0615	0.23	2.5	5	1.5	1500	145.2
1-232505-0620	0.23	2.5	5	2.0	1500	193.7
1-232505-0625	0.23	2.5	5	2.5	1500	242.1
1-232505-0630	0.23	2.5	5	3.0	1500	290.5
1-232505-0635	0.23	2.5	5	3.5	1500	338.9
1-232505-0640	0.23	2.5	5	4.0	1500	387.4

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ส่วนผสมและจำนวนการทดสอบ RPC

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาณสารลดน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาตรเส้นใยเหล็กต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	เส้นใยเหล็ก (กรัม)
1-232505-0805	0.23	2.5	5	0.5	1500	48.4
1-232505-0810	0.23	2.5	5	1.0	1500	96.8
1-232505-0815	0.23	2.5	5	1.5	1500	145.2
1-232505-0820	0.23	2.5	5	2.0	1500	193.7
1-232505-0825	0.23	2.5	5	2.5	1500	242.1
1-232505-0830	0.23	2.5	5	3.0	1500	290.5
1-232505-0835	0.23	2.5	5	3.5	1500	338.9
1-232505-0840	0.23	2.5	5	4.0	1500	387.4

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีและทดสอบสมบัติวัสดุที่ใช้

1. ปูนซีเมนต์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีจำหน่ายในประเทศได้รับมาตรฐาน สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 – 2547
2. ซีลิกาฟุ่ม ใช้ซีลิกาฟุ่มที่มีจำหน่ายภายในประเทศและมีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 1240
3. น้ำยาผสมเพิ่มใช้น้ำยาลดน้ำยิ่งยวด Superplasticizer (Polycarboxylate) ที่มีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C494
4. มวลรวมละเอียด ใช้ทรายละเอียดที่มีจำหน่ายในประเทศ โดยทำการคัดขนาดโดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 50 และเบอร์ 100 เท่านั้นซึ่งทรายที่ได้จะมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.15 ถึง 0.60 มิลลิเมตร
5. เส้นใยเหล็กใช้เส้นใยเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16 มิลลิเมตร ยาว 13 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงสูงประมาณ 2,000 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 3.3

แหล่งที่มาและการทดสอบวัสดุ

วัสดุ	แหล่ง	สมบัติที่ศึกษา
ปูนซีเมนต์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)	- องค์ประกอบทางเคมี - ความละเอียด, ความถ่วงจำเพาะ
ซีลิกาฟุ่ม	บริษัท ดับบลิว อาร์ เกรซ (ประเทศไทย) รุ่น Force 10,000D	- องค์ประกอบทางเคมี - ความละเอียด, ความถ่วงจำเพาะ
สารลดน้ำยิ่งยวด	บริษัท ดับบลิว อาร์ เกรซ (ประเทศไทย) รุ่น ADVA 207	- ความถ่วงจำเพาะ - ความสามารถในการลดน้ำ
มวลรวมละเอียด	- ทรายแม่น้ำคัดขนาด	- ขนาดคละ - ความสามารถในการดูดซึมน้ำ - ความถ่วงจำเพาะ
เส้นใยเหล็ก	- นำเข้าจากต่างประเทศ	- ความถ่วงจำเพาะ

3.3.2 ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์โดยเข็มไวแคต ASTM C191

1. วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ
 - 1.1 ส่วนผสมซีเมนต์เพสต์ที่จะทำการทดสอบ
 - 1.2 น้ำสะอาด
 - 1.3 เครื่องทดสอบแบบไวแคต
 - 1.4 เครื่องชั่ง สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.1 กรัม
 - 1.5 กระบอกตวง ขนาด 200 CC.
 - 1.6 เกรียงเหล็ก
 - 1.7 ถังมือยาง
2. วิธีการทดลอง
 - 2.1 ผสมส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่เตรียมไว้
 - 2.2 สวมถังมือยางนำซีเมนต์เพสต์ที่เตรียมไว้ไปนํ้าเป็นก้อนกลมโยนไปมา 6 ครั้ง
 - 2.3 วางกรวย (Mold) อัดก้อนปูนซีเมนต์ลงใน Mold
 - 2.4 วาง Mold ให้ปลายด้านใหญ่ลงบนกระจกแล้วใช้เกรียงเหล็กปาดปูนซีเมนต์ที่ล้นออกมาจากด้านเล็กให้เรียบ
 - 2.5 วาง Mold ที่บรรจุซีเมนต์เพสต์ไว้ได้เข็มขนาด 1 มม. เลื่อนให้เข็มเลื่อนปลายเข็มให้แตะผิวของซีเมนต์เพสต์และปรับเข็มชี้ให้อยู่ที่ขีดศูนย์
 - 2.6 ปลดเข็มไวแคตลงในซีเมนต์เพสต์ แล้วอ่านค่าระยะการจมของเข็มหลังจากปลดแล้ว 30 วินาที
 - 2.7 ทำซ้ำเช่นเดียวกันทุกๆ 15, 10 และ 5 นาที จนกว่าจะได้ระยะการจมของเข็มเท่ากับ 25 มิลลิเมตร
 - 2.8 การปลดเข็มแต่ละครั้ง ปลายเข็มจะต้องอยู่ห่างจากรอยเข็มเก่าไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร และห่างจากขอบ Mold ไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร
 - 2.9 ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่ทดลองที่เข็มไวแคตจมลงในซีเมนต์เพสต์ 25 มิลลิเมตร คือค่าการก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time)
 - 2.10 ทำการบันทึกค่าที่ทำการทดสอบและนำมาเขียนตารางกราฟแสดงระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

3.3.3 ความต้านทานแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ ASTM C109

1. วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

1.1 แบบหล่อตัวอย่างทดสอบแบบลูกบาศก์ (Cement Cube Mold) ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร ทำจากโลหะแข็งหล่อไม่ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์มอร์ตาร์ มุมที่ทำกับระนาบต้องเป็นมุมฉากทุกมุม

1.2 แท่นทดสอบการไหลและแบบหล่อ (Flow Table and Mold)

1.3 เครื่องผสม, อ่างผสม และใบพายเป็นแบบชนิดไฟฟ้า

1.4 เครื่องชั่งสามารถอ่านละเอียดได้ 0.1 กรัม และอ่านน้ำหนักได้ถึง 2,000 กรัม

1.5 กระบอกแก้วตวงขนาด 500 มิลลิลิตร

1.6 แท่งกระทุ้งยาว 120 ถึง 150 มิลลิเมตร และมีขนาดหน้าตัด 13 x 25 มิลลิเมตร

1.7 เกรียงทำจากแผ่นเหล็ก ถูมือยาง นาฬิกาจับเวลา เวอร์เนียคาลิปเปอร์

2. วิธีการทดสอบ

2.1 การเตรียมแบบหล่อ

2.1.1 ทาแบบหล่อด้วยน้ำมันแร่ให้ทั่วทั้งด้านนอกและด้านในแบบหล่อ
บางๆ

2.1.2 ทำการประกอบแบบหล่อทรงลูกบาศก์เมื่อประกอบเสร็จแล้วเช็ดน้ำมันในส่วนเกินที่ไหลเยิ้มบริเวณผิวด้านในและกันแบบหล่อ

2.1.3 ใช้ซีเมนต์หรือน้ำมันพาราฟิน 3 ส่วน ต่อน้ำมันสน 5 ส่วน โดยน้ำหนัก ทาอุดแนวรอยต่อด้านนอกของแบบหล่อให้ทั่วเพื่อป้องกันน้ำปูนไหลออกจากแบบหล่อ

2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

2.2.1 ทำการทดสอบการไหลตัว วางแบบหล่อทดสอบการไหลให้อยู่กึ่งกลางแท่นทดสอบที่ได้ทำให้ผิวหน้าสะอาดเรียบร้อยแล้ว ใส่ซีเมนต์มอร์ตาร์ลงในแบบหล่อหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร แล้วใช้แท่งเหล็กกระทุ้ง 20 ครั้ง เอาซีเมนต์มอร์ตาร์ใส่เพิ่มอีกจนล้นแบบ แล้วกระทุ้งอีก 20 ครั้ง ปาดส่วนที่เกินออกให้เรียบเสมอแบบหล่อ

2.2.2 เช็ดแท่นทดสอบการไหลให้สะอาดและแห้ง นับเวลาหลังผสมเสร็จแล้ว 1 นาที ให้ยกแบบหล่อขึ้นทันทีแล้วหมุนแท่นตกกระทบ ซึ่งตกกระทบในแนวตั้งสูง 12.7 มิลลิเมตร เป็นจำนวน 25 ครั้ง ในเวลา 15 วินาที แล้ววัดเส้นผ่านศูนย์กลางของมอร์ตาร์ที่ไหลผ่านแท่นอย่างน้อย 4 แห่ง ด้วยระยะห่างแต่ละแห่งเท่าๆกัน แล้วหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางและคำนวณการไหลแผ่

$$\text{ร้อยละการไหลแผ่} = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \times 100 \quad (3.5)$$

โดยที่ D_0 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฐานมอร์ตาร์

D_1 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่แผ่กระจายบนแท่น

2.2.3 เริ่มทำการหล่อก่อนทดสอบโดยนำมอร์ตาร์ใส่ลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ช่องละ 2 ชั้น ให้ชั้นแรกหนา 25 มิลลิเมตร และกระทุ้งช่องละ 32 ครั้ง ในเวลา 10 วินาที โดยกระทุ้งช่องละ 4 รอบ รอบละ 8 ครั้ง

2.2.4 ใส่มอร์ตาร์ที่เหลือในช่องแบบหล่อทุกช่องให้สูงสูงกว่าขอบ แล้วกระทุ้งเช่นเดียวกับชั้นแรก เมื่อกระทุ้งเสร็จแล้วมอร์ตาร์ควรสูงกว่าขอบเล็กน้อย

2.2.5 ใช้เกรียงเหล็กปาดมอร์ตาร์ที่ล้นติดขอบแบบลงมาในแบบแล้วปาดผิวให้เผยอเกรียงด้านหน้าเล็กน้อย ไปทางขวาของแบบหล่อแต่ละช่วงเพียงครั้งเดียว

2.2.6 เพื่อให้ผิวหน้าแบบหล่อเรียบดียิ่งขึ้นให้ใช้เกรียงปาดเบาๆ อีก 1 ครั้ง ตลอดความยาวของแบบหล่อ โดยใช้ขอบเกรียงวางทำมุมเล็กน้อย แล้วขยับเกรียงไปมาตลอดความยาวของแบบหล่อ

2.2.7 หลังจากหล่อขึ้นตัวอย่างทดสอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการบ่มก่อนตัวอย่างด้วยการแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง จนอายุครบตามที่ต้องการทดสอบ

2.2.8 นำตัวอย่างออกจากห้องบ่ม ให้ความสะอาดปัดเม็ดทราย และสะเก็ดที่ติดผิวออกให้หมดเช็ดผิวให้แห้งแล้วทดสอบกำลังอัดทันทีโดยทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักตัวอย่างแต่ละก้อน ห้ามใช้ด้านข้างของตัวอย่างรับแรงกด ถ้าด้านบนและด้านล่างก้อนตัวอย่างไม่เรียบให้ฝนให้เรียบและขนานกัน

2.2.9 วางก้อนตัวอย่างทดสอบไว้ในเครื่องกดจัดให้อยู่ใต้ศูนย์กลางของแท่นกด เริ่มทำการทดสอบโดยพยายามให้ตัวอย่างถึงจุดวิบัติไม่น้อยกว่า 20 วินาที และไม่มากกว่า 80 วินาที นับจากเริ่มให้น้ำหนักกด ทำการบันทึกค่าและคำนวณความต้านทานกำลังอัดจาก สมการที่ 3.6

$$F_a = \frac{P}{A} \quad (3.6)$$

โดยที่ F_a = ค่าความต้านทานหน่วยแรงอัดเฉลี่ย, N/mm^2

P = หน่วยแรงอัดเฉลี่ย, N

A = พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบ, mm^2

3.3.4 กำลังดึงของคอนกรีตโดยวิธี (Splitting Tensile Test) ASTM C496

1. วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

1.1 เครื่องทดสอบกำลังอัด

1.2 แผ่นไม้อัดขนาด 3 × 25 มม. 2 แผ่น

1.3 ตลับเมตร

1.4 ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.

2. วิธีการทดสอบ

2.1 วัดและบันทึกความสูงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างทดสอบ โดยวัด 2 แนว ที่ตั้งฉากกันให้ละเอียดถึงระดับ มม. แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

2.2 วางก้อนตัวอย่างในแนวนอนใต้หัวกด ดังแสดงในภาพที่ 3.3

2.3 เพิ่มแรงกดบนก้อนตัวอย่างอย่างต่อเนื่อง และสม่ำเสมอด้วยอัตรา 0.12-0.23 กก./ตร.ซม./วินาที จนก้อนตัวอย่างพัง ก้อนตัวอย่างจะแตกในแนวตั้งตามเส้นผ่านศูนย์กลาง

2.4 คำนวณหากำลังต้านทานแรงดึงได้จากสมการ

$$f_s = \frac{2P}{\pi dL} \quad (3.7)$$

โดยเมื่อ

f_s = Splitting Strength

P = น้ำหนักกดสูงสุด (กก.)

L = ความยาวของก้อนตัวอย่างทรงกระบอก (ซม.)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง (ซม.)



ภาพที่ 3.3 การวางก้อนตัวอย่างในแนวนอนใต้หัวกดสำหรับทดสอบแรงดึง

3.3.5 กำลังตัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ ASTM C78

1. วัสดุและอุปกรณ์ในการทดสอบ

1.1 ซีเมนต์มอร์ตาร์ตามส่วนผสมที่เตรียมไว้

1.2 เครื่องกดทดสอบ

1.3 อุปกรณ์การกดประกอบด้วย หัวกด 1 หัว และฐานรองรับคาน 2 ตัว ทั้ง 3 ชิ้นต้องมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับความยาวอย่างน้อยเท่ากับความกว้างของคาน

1.4 แบบหล่อตัวอย่างขนาด 0.5 x 3 x 12 นิ้ว

2. วิธีการทดสอบ

2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

2.1.1 เตรียมแบบหล่อพลาสติกใสขนาด 0.5 x 3 x 12 นิ้ว จำนวน 3 ชุด (ระยะห่างของฐานรองรับในการเตรียมการทดสอบเท่ากับ 9 นิ้ว)

2.1.2 ทำการผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ตามส่วนผสมที่จะทำการทดสอบ

2.1.3 นำส่วนผสมที่ทำการผสมแล้วใส่ลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้แบ่งเป็น 2 ชั้น ชั้นละเท่าๆ กัน ทำการเขย่าด้วยโต๊ะสั่น ชั้นละ 30 วินาที แล้วปาดผิวหน้าให้เรียบตลอดความยาวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ

2.1.4 ทิ้งไว้ให้แข็งตัวประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการแกะแบบหล่อออกแล้วทำการบ่มตามวิธีการบ่มที่ต้องการ

2.2 การทดสอบ

2.2.1 ทำการวัดความกว้าง ความยาว ความลึก เฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบ ที่กึ่งกลางให้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร

2.2.2 ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบให้ละเอียดถึง 1 กรัม

2.2.3 วางตัวอย่างทดสอบให้ได้ศูนย์กลางบนแท่นทดสอบของเครื่อง โดยให้ด้านเรียบอยู่ด้านล่าง

2.2.4 กดแท่นตัวอย่างช้าๆ ด้วยอัตราความเร็ว 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาทีจนตัวอย่างทดสอบแตกและแยกออกจากกัน

2.2.5 บันทึกค่าและเฉลี่ยค่าจากตัวอย่างการทดสอบที่ใช้ส่วนผสมเดียวกัน

2.3 การคำนวณหากำลังรับแรง (Modulus of Rupture) จากต่อไปนี้

2.3.1 สำหรับการกดจุดเดียวที่จุดกึ่งกลาง (Center point loading)

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.8)$$

R = กำลังรับแรงตัด เป็น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

P = แรงที่จุดวิบัติของคาน เป็น กิโลกรัม

L = ความยาวช่วงคาน เป็น เซนติเมตร

b = ความกว้างคานเฉลี่ยบริเวณรอยแตก เป็นเซนติเมตร

d = ความลึกคานเฉลี่ยบริเวณรอยแตก เป็นเซนติเมตร

2.3.2 สำหรับการทดสอบแบบ 2 จุด (Third Point Loading) เมื่อรอยขาดอยู่ในช่วงกลางคาน ตามสมการที่ 3.6 และเมื่อรอยขาดอยู่นอกกลางคาน แต่อยู่ห่างจากช่วงกลางไม่เกินร้อยละ 5 ของช่วงคาน ตามสมการที่ 3.7

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.9)$$

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (3.10)$$

เมื่อ a = ระยะเฉลี่ยจากรอยขาดด้านล่างคานถึงฐานรองคานด้านใกล้รอยขาด

3.3.6 โมดูลัสยืดหยุ่น

1. วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

1.1 เครื่องทดสอบกำลังอัด

1.2 ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.

ดังแสดงในภาพที่ 3.4(ก)

1.3 Data logger และ Stain Gauge ดังแสดงในภาพที่ 3.4(ข)

1.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก และตลับเมตร

2. วิธีทดสอบ

2.1 ชั่งน้ำหนักก่อนตัวอย่างและหาค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลาง แล้วทำการ Cap หัวก่อนตัวอย่างด้วยก้ามฉัน

2.2 ติดตั้ง Stain Gauge กับก่อนตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 3.4(ค) แล้วนำไปวางบนเครื่องทดสอบกำลังอัด

2.3 กดน้ำหนักก่อนตัวอย่าง โดยเพิ่มน้ำหนักขึ้นเรื่อยๆด้วยอัตราคงที่ประมาณ 2.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

2.4 กดก่อนตัวอย่างจนพัง แล้วบันทึกค่าน้ำหนักสูงสุด

2.5 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กดกับการหดตัว

2.6 กำลังอัดสูงสุด (Ultimate Strength)

$$\sigma_c = \frac{4P}{\pi d_{av}^2} \quad (3.11)$$

P = น้ำหนักสูงสุด

d = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่วัด 2 ทิศทางตั้งฉากกัน

2.7 กำลังอัดในช่วงยืดหยุ่น (Compressive Strength at Elastic Limit)

$$\sigma_e = 0.4(\sigma_c) \quad (3.12)$$

2.8 ค่าโมดูลัสสัมผัสเบื้องต้น (Initial Tangent Modulus, E_i)

2.9 ค่าโมดูลัสสัมผัส (Tangent Modulus, E_t) ที่ 40% ของกำลังสูงสุด

2.10 ค่าโมดูลัสเส้นเชื่อมจุดเริ่มต้นกับจุดบนส่วนโค้ง (Secant Modulus, E_s) ที่ร้อยละ 40 ของกำลังอัดสูงสุด

$$E_s = \frac{\sigma_e - \sigma_0}{\varepsilon_e - 0.000050} \quad (3.13)$$

σ_e = หน่วยแรงที่ร้อยละ 40 ของหน่วยแรงสูงสุด

σ_0 = หน่วยแรงที่หน่วยการหดตัวเท่ากับ 0.000050

ε_e = หน่วยการหดตัวตามแนวแกนที่หน่วยแรงเท่ากับร้อยละ 40

ของหน่วยแรงสูงสุด

2.11 ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio, μ)

$$\mu = \frac{\varepsilon_e^t - \varepsilon_o^t}{\varepsilon_e - 0.000050} \quad (3.14)$$

ε_e^t = หน่วยการขยายตัวด้านข้างที่หน่วยแรงต้านทานตามแนวแกน เท่ากับร้อยละ 40 ของหน่วยแรงสูงสุด

ε_o^t = หน่วยการขยายตัวด้านข้างที่หน่วยการหดตัวตามแนวแกนเท่ากับ 0.000050

ε_e = การหดตัวตามแนวแกนที่หน่วยแรงเท่ากับร้อยละ 40 ของหน่วยแรงสูงสุด



(ก) ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก



(ข) Stain Gauge และ Data logger



(ค) ติดตั้ง Stain Gauge กับก้อนตัวอย่าง

ภาพที่ 3.4 การทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

3.3.7 โมดูลัสความเหนียว (Modulus of Toughness)

วิธีการทดสอบหาค่าดัชนีความเหนียว ตามมาตรฐาน ASTM C1018-94b Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) ดังแสดงในภาพที่ 3.5 ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. หาจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Load) และการโก่งตัว (Deflection) ที่ไม่เป็นเชิงเส้นก่อนการวิบัติหรือที่เรียกว่า จุด First Crack ซึ่งเป็นเดียวกันกับจุด Proportional Limit ดังแสดงในภาพที่ 3.6

2. นำกราฟระหว่างแรงดัดและการโก่งตัวของคานที่ปรับแก้แล้ว โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ตามตำแหน่งของการโก่งที่ได้กำหนดดังนี้ โดยที่ δ คือการโก่งตัว ณ ตำแหน่งสิ้นสุดช่วงยืดของคาน และ 3δ , 5.5δ และ 10.5δ คือการโก่งตัวที่ระยะ 3, 5.5 และ 10.5 เท่าของ δ ตามลำดับ

3. จากนั้นคำนวณหา Toughness จากพื้นที่ใต้กราฟตั้งแต่จุดเริ่มต้นที่ยังไม่มีการปล่อยน้ำหนักกระทำจนถึงตำแหน่งของการโก่งตัวที่จุด 3δ , 5.5δ และ 10.5δ ตามลำดับ

พื้นที่ OAB เป็นค่า Toughness ณ ตำแหน่งสิ้นสุดช่วงยืดของคาน (δ)

พื้นที่ OACD เป็นค่า Toughness ณ ตำแหน่ง 3 เท่า (3δ) ของจุดสิ้นสุดช่วงยืดของคานไปแล้ว

พื้นที่ OAEF เป็นค่า Toughness ณ ตำแหน่ง 5.5 เท่า (5.5δ) ของจุดสิ้นสุดช่วงยืดของคานไปแล้ว

พื้นที่ OAGH เป็นค่า Toughness ณ ตำแหน่ง 10.5 เท่า (10.5δ) ของจุดสิ้นสุดช่วงยืดของคานไปแล้ว

พื้นที่ใต้กราฟที่ได้จะถูกนำมาคำนวณหาค่าดัชนีความเหนียว (Toughness Indices) I5, I10 และ I20 ดังแสดงในสมการที่ (3.1) – (3.3)

$$I5 = \text{พื้นที่ OACD} / \text{พื้นที่ OAB} \quad (3.1)$$

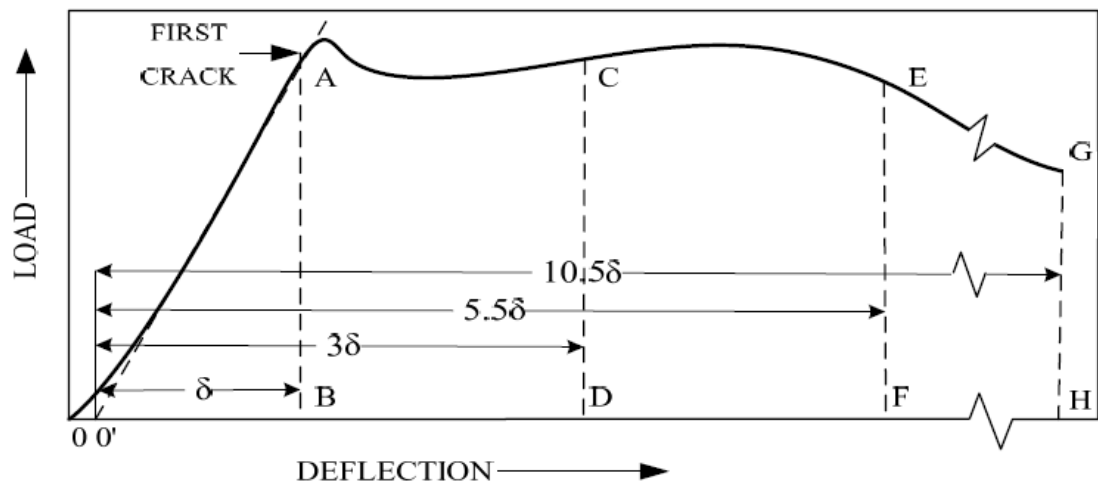
$$I10 = \text{พื้นที่ OAEF} / \text{พื้นที่ OAB} \quad (3.2)$$

$$I20 = \text{พื้นที่ OAGH} / \text{พื้นที่ OAB} \quad (3.3)$$

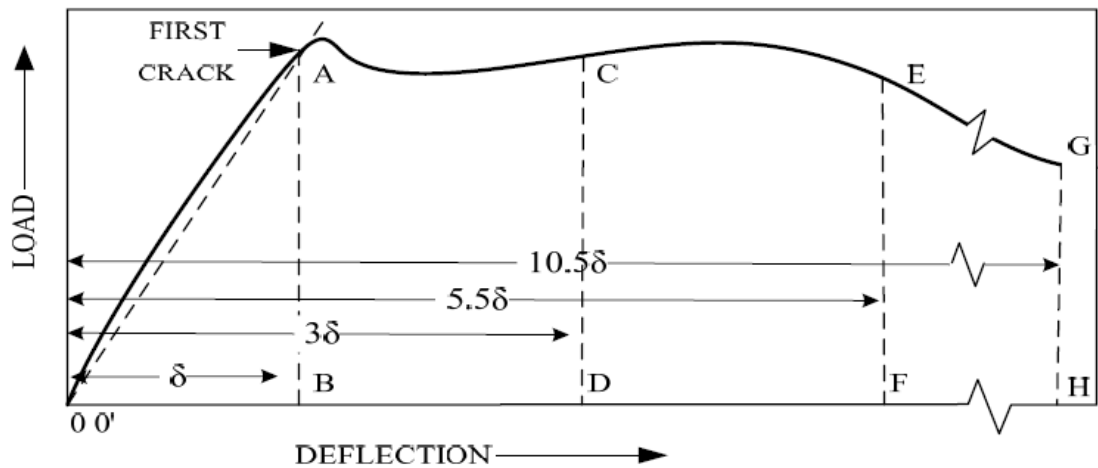
ค่าดัชนีความเหนียวทั้ง I5, I10 และ I20 จะบอกให้ทราบถึงระดับความเหนียวของคานที่โก่งตัวน้อย ปานกลาง และจนถึงมากตามลำดับ



ภาพที่ 3.5 การทดสอบหาโมดูลัสความเหนียว



(a) Concave upwards to first crack



(b) Convex upwards to first crack

ภาพที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโก่งตัวสำหรับการโก่งตัวสำหรับการหาค่า
ดัชนีความเหนียว (ASTM C1018)

3.3.8 การหัดตัวแบบแห้ง

1. วิธีการทดสอบ

1.1 ทำการหล่อแท่งทดสอบทันทีเมื่อผสมส่วนผสมที่เตรียมไว้แล้วเสร็จโดยใช้แบบหล่อขนาด 25 x 25 x 285 มิลลิเมตร โดยหล่อเป็น 2 ชั้น ชั้นละเท่าๆ กัน และอัดแน่นแต่ละชั้นโดยใช้ไม้หัวแม่มือกดไล่เข้าตามมุมและขอบ แล้วกดไปตามผิวบนของส่วนผสมจนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกันทั่วทั้งชิ้นทดสอบ แล้วใช้เกรียงชนิดขอบบางปาดตัวอย่างให้เสมอขอบแบบหล่อหลังจากนั้นใช้เกรียงแต่งผิวหน้าให้เรียบ

1.2 เมื่อหล่อแท่งทดสอบเสร็จแล้วให้รีบนำแท่งทดสอบพร้อมแบบหล่อเอาไปเก็บในตู้ขึ้นหรือห้องขึ้นทันทีโดยเก็บตัวอย่างไว้ 24 ชั่วโมง

1.3 นำแท่งทดสอบที่ออกมาจากอากาศขึ้นและวัดความยาวทันที

1.4 ทำการวัดตามระยะเวลาที่กำหนดจนถึงที่อายุ 90 วัน

1.5 นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าการหดตัวแบบแห้งตามสมการที่ 3.15

$$\text{การหดตัวแบบแห้ง} = \frac{L_x - L_i}{L_i} \times 100 \quad (3.15)$$

โดยที่ L_i = ความยาวเริ่มต้นของแท่งตัวอย่าง

L_x = ความยาวของแท่งตัวอย่างจนถึงที่อายุ 90 วัน

3.3.9 การหดตัวแบบออโตจีเนียส

1. วิธีการทดสอบ

1.1 ทำการหล่อแท่งทดสอบทันทีเมื่อผสมส่วนผสมที่เตรียมไว้แล้วเสร็จโดยใช้แบบหล่อขนาด 25 x 25 x 285 มิลลิเมตร โดยหล่อเป็น 2 ชั้น ชั้นละเท่าๆ กัน และอัดแน่นแต่ละชั้นโดยใช้นิ้วหัวแม่มือกดไหลเข้าตามมุมและขอบ แล้วกดไปตามผิวบนของส่วนผสมจนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกันทั่วทั้งชั้นทดสอบ แล้วใช้เกรียงชนิดขอบบางปาดตัวอย่างให้เสมอขอบแบบหล่อหลังจากนั้นใช้เกลียงแต่งผิวหน้าให้เรียบ

1.2 นำแผ่นพลาสติกใส่หุ้มแท่งทดสอบแล้วนำไปบ่มในตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ± 5 ที่อุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

1.3 เริ่มวัดความยาวของตัวอย่าง โดยเริ่มจากที่เวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) ทำการวัดไปจนถึงอายุ 90 วัน

3.3.10 การทดสอบความทนทานต่อซัลเฟต

1. วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

1.1 แบบหล่อก้อนทดสอบทรงลูกบาศก์ ขนาด 50 x 50 x 50 มม.

1.2 แบบหล่อก้อนทดสอบรูปคาน ขนาด 25 x 25 x 285 มม.

1.3 เครื่องมือทดสอบไวแคต (Modified vicat) ตามมาตรฐาน ASTM C 807

1.4 โต๊ะการไหล และแบบหล่อรูปกรวย ตามมาตรฐาน ASTM C 230

1.5 เครื่องผสมมาตรฐานตามมาตรฐาน ASTM C 305

1.6 เครื่องชั่ง อ่านละเอียดได้ 0.001 กรัม และอ่านได้ 2000 กรัม

1.7 เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compression machine)

1.8 เครื่องวัดการยืดหดตัว ตามมาตรฐาน ASTM C 490 อ่านละเอียดได้ 0.002 มม.

2. วิธีการทดสอบ

2.1 การเปลี่ยนแปลงความยาวตามมาตรฐาน ASTM C1012 โดยใช้ตัวอย่างขนาด $25 \times 25 \times 285$ มม. ดังแสดงในภาพที่ 3.7 ตัวอย่างทดสอบทำการถอดแบบเมื่ออายุ $24 \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง นำก้อนตัวอย่างแช่ในน้ำปูนใสอิ่มตัวและทำการทดสอบกำลังอัดของรูปทรงลูกบาศก์ ถ้ากำลังอัดที่ได้เท่ากับ 20.0 ± 1.0 เมกะปาสคาล หรือมากกว่า ทำการวัด ความยาวเป็นครั้งแรก ตามมาตรฐาน ASTM C490 จากนั้นนำก้อนตัวอย่างทั้งหมดแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต โดยทำการควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารละลายซัลเฟตให้อยู่ในช่วง 6 – 8 ด้วยสารละลายกรดซัลฟริกที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาริตี (M) เป็นตัวปรับค่าความเป็นกรดต่างทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวตั้งแต่ที่อายุ 3, 7, 28, 56 และ 90 วัน ตามลำดับ

2.2 การสูญเสียกำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนัก โดยใช้รูปทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม. ถอดแบบตัวอย่างทดสอบเมื่ออายุ $24 \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง และนำก้อนตัวอย่างแช่ในน้ำปูนใสอิ่มตัว จนกระทั่งกำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่ได้ต้องมีค่าเท่ากับ 20.0 ± 1.0 เมกะปาสคาล หรือมากกว่า บันทึกค่ากำลังอัดครั้งแรก หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างทั้งหมดแช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 3, 7, 28, 56 และ 90 วัน ตามลำดับ เมื่อแช่ตัวอย่างในสารละลายซัลเฟตได้ตามอายุที่ต้องการ แล้วนำตัวอย่างขึ้นจากสารละลายซัลเฟตแล้วเช็ดผิวก้อนตัวอย่างให้แห้งและปล่อยให้แห้งในอากาศ นำก้อนตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัด จดบันทึกค่าแรงกระทำที่ได้เพื่อนำไปคำนวณกำลังอัดสูงสุด ในขณะที่การทดสอบเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียของตัวอย่างซึ่งแช่ในสารละลายซัลเฟตสามารถทำการทดสอบโดยใช้วิธีและเงื่อนไขเช่นเดียวกับข้างต้น แต่เปลี่ยนจากการทดสอบกำลังอัดเป็นการชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่อายุ 3, 7, 28, 56 และ 90 วัน ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบหาน้ำหนักที่สูญเสียแสดงในภาพที่ 3.8

แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพื้นที่ของก้อนตัวอย่างไม่เรียบและสม่ำเสมอจึงใช้วิธีการเลือกด้านที่ถูกกัดกร่อนน้อยที่สุดและลองด้านบนและล่างก้อนตัวอย่างด้วยแผ่นยางรองชนิดแข็ง นอกจากนั้นการวัดความยาวของแต่ละด้านได้ทำการวัดหลายๆ ค่า เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ค่ากำลังอัดที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับกำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่บ่มหรือแช่ในน้ำปูนใสอิ่มตัวเพื่อหาร้อยละการสูญเสียกำลังอัดของส่วนผสมดังกล่าว



(ก) ตัวอย่างที่บ่มในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



(ข) ตัวอย่างที่บ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 3.7 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่างซึ่งบ่มในสารละลายซัลเฟต



(ก) ตัวอย่างที่บ่มในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



(ข) ตัวอย่างที่บ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 3.8 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างซึ่งบ่มในสารละลายซัลเฟต

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 ทัวไป

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซิลิกาฟูม และสารลดน้ำ เพื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางกายภาพ รวมทั้งสมบัติของซีเมนต์เฟลต์ที่จะนำไปพัฒนาในส่วนของ UHPC และ RPC ในด้านกำลังอัด กำลังอัด การหดตัวแบบแห้ง และแบบออโตจีเนียส การขยายตัวและการสูญเสียกำลังเนื่องจากโซเดียมซิลเฟต และแมกนีเซียมซิลเฟต

4.2 องค์ประกอบพื้นฐานของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซิลิกาฟูม และสารลดน้ำ

4.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

การทดลองนี้ได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) โดยนำมาตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF พบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 64.78 มีปริมาณของ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 20.34 ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1 และมีองค์ประกอบทางกายภาพตามตารางที่ 4.2 พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีเบลน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 3,344 ค่าความต้องการน้ำมีค่าเท่ากับร้อยละ 100 ค่ากำลังอัดที่อายุ 3 วัน มีค่าเท่ากับ 155 กก./ cm^2 ที่อายุ 7 วันมีค่าเท่ากับ 268 กก./ cm^2 โดยสมบัติดังกล่าวเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C150

ตารางที่ 4.1

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

องค์ประกอบเคมี (ร้อยละโดยมวล)	ASTM C 150	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
1. ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	-	20.34
2. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	-	4.95
3. ไอรอนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	-	3.26
4. แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	-	64.78
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	ร้อยละ สูงสุด 6.0	1.43
6. โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	-	0.45
7. โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	-	0.17
8. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	-	-
- ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C ₃ A) น้อยกว่าร้อยละ 8	ร้อยละ สูงสุด 3.5	2.84
- ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C ₃ A) มากกว่าร้อยละ 8	ร้อยละ สูงสุด 3.0	-
9. ปูนขาวอิสระ (Free CaO)	-	-
10. ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้(LOI)	ร้อยละ สูงสุด 3.0	1.51

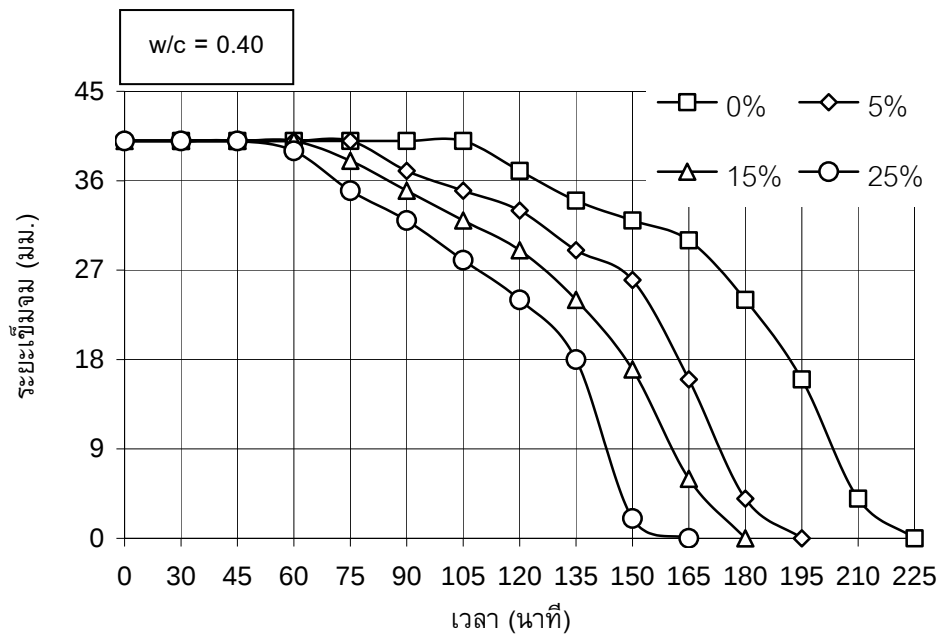
ตารางที่ 4.2

สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

สมบัติทางกายภาพ	ASTM C150	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
1. ปริมาณอากาศ (Air content)	ร้อยละสูงสุด 12	6.7
2. พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีเบลน (ตร.ซม.ต่อกรัม)	-	3,344
3. ความถ่วงจำเพาะ	-	3.13
4. ความละเอียด (ขนาดของอนุภาค, ร้อยละค้ำง)		
- 75 ไมโครเมตร	-	0.6
- 36 ไมโครเมตร	-	9.2
5. กำลังอัด (กก./ซม. ²)		
- ที่อายุ 3 วัน	120	155
- ที่อายุ 7 วัน	190	268
6. ระยะเวลาการก่อตัว (Vicat test)		
- ระยะเวลาการเริ่มต้น (Initial setting time, min)	ไม่น้อยกว่า 45	105
- ระยะเวลาการสุดท้าย (Final setting time, min)	ไม่เกิน 375	203

4.2.2 ซิลิกาฟุ่ม

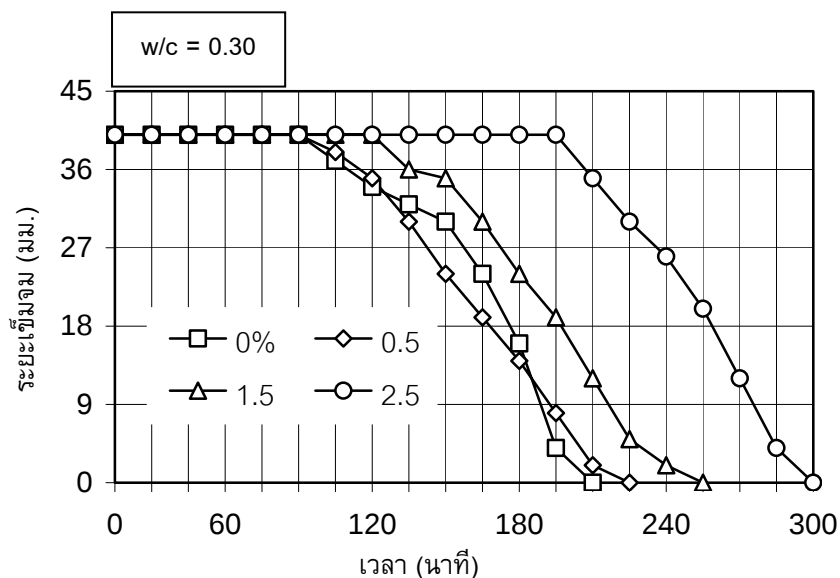
ในการทดลองครั้งนี้ใช้ซิลิกาฟุ่มของบริษัท ดับบลิว อาร์ เกรซ (ประเทศไทย) จำกัด โดยมีลักษณะสีเทาอมขาว มีความถ่วงจำเพาะ 2.25 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ปริมาณที่ใช้ตามคำแนะนำของผู้ผลิตอยู่ในปริมาณร้อยละ 2 – 15 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ซึ่งหากใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลต่อความสามารถในการทำงานได้และทำให้ระยะเวลาการก่อตัวน้อยลง ตามภาพที่ 4.1 เมื่อปริมาณซิลิกาฟุ่มเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 จะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวลดลงประมาณ 30 นาที ซิลิกาฟุ่มดังกล่าว มีส่วนประกอบของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) มากกว่าร้อยละ 85 ตามมาตรฐาน ASTM C1240 ที่แสดงในตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.1 ระยะเวลาการก่อตัวต่อปริมาณซิลิกาฟูมร้อยละ 0, 5, 15 และ 25 โดยน้ำหนัก

4.2.3 สารลดน้ำ

ในการทดลองครั้งนี้ใช้สารลดน้ำของ บริษัท ดับบลิว อาร์ เกรซ (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น ADVA CAST 207 ซึ่งเป็นสารลดน้ำแบบยั้งยวด (Water reducing and high range admixture) จัดอยู่ในสารผสมเพิ่มประเภท Type F ตามมาตรฐาน ASTM C494 โดยมีความสามารถในการลดน้ำร้อยละ 40 ของปริมาณน้ำ ปริมาณการใช้ตามคำแนะนำของผู้ผลิตควรใช้สารลดน้ำในปริมาณ 200 – 700 มิลลิลิตรต่อปูนซีเมนต์ 100 กิโลกรัม เมื่อใช้สารลดน้ำในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ระยะเวลาการก่อตัวจะเพิ่มขึ้นประมาณ 30 ถึง 45 นาที



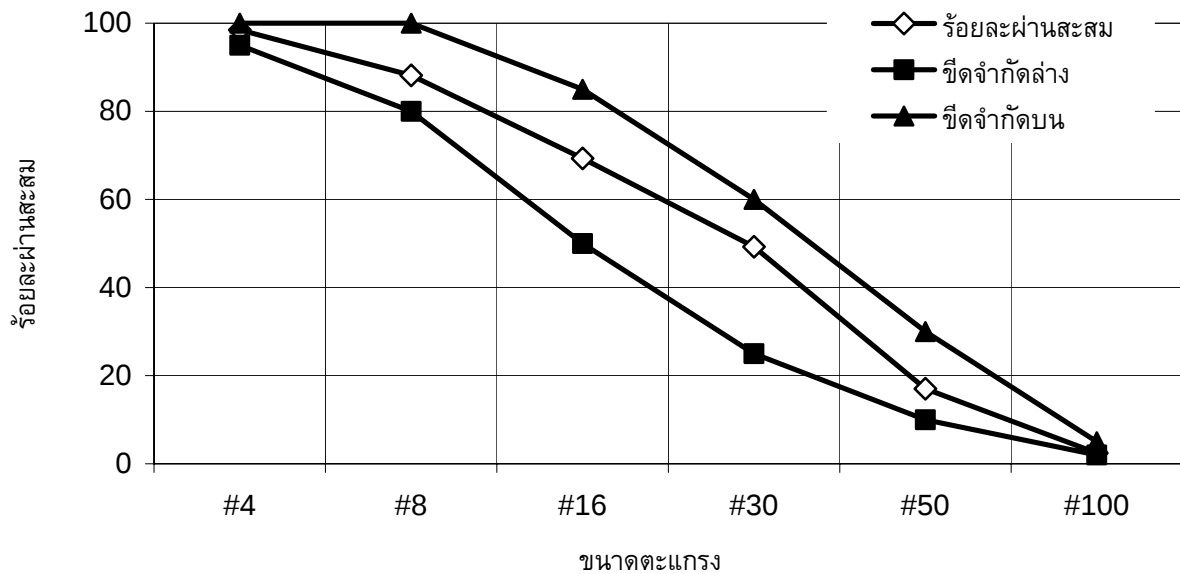
ภาพที่ 4.2 ระยะเวลาการก่อตัวต่อปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 0, 0.5, 1.5 และ 2.5

ตารางที่ 4.3
องค์ประกอบทางเคมีของซีลิกาฟูม

องค์ประกอบเคมี (ร้อยละโดยมวล)	ASTM C1240	ซีลิกาฟูม Force 10,000 D
1. ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	ร้อยละต่ำสุด 85	92
2. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	-	0.5
3. ไทออนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	-	2.1
4. แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	-	0.8
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	-	0.3
6. โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	-	1
7. โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	ร้อยละสูงสุด 1.5	0.1
8. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	-	0.2
9. ปูนขาวอิสระ (Free CaO)	-	-
10. ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้ (LOI)	ร้อยละสูงสุด 10	2.3

4.2.4 ทรายละเอียด

ทรายที่ใช้ในการทดลองได้ใช้ทรายละเอียดที่ใช้การผสมคอนกรีตทั่วไป โดยมีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C136 และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.75 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดให้ค่าโมดูลัสของมวลรวมละเอียดควรมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 2.30 – 3.20 และเลือกใช้ทรายที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 50 ที่มีขนาดระหว่าง 300 – 600 ไมโครเมตร มีปริมาณที่ค้ำร้อยละ 32 และทรายที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 100 ที่มีขนาดระหว่าง 150 – 300 ไมโครเมตร มีปริมาณที่ค้ำร้อยละ 15 และทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของทรายที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 50 และเบอร์ 100 ที่นำมารวมกันมีค่าเท่ากับ 2.55 ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.40 และมีน้ำหนักอิ่มตัวสภาพผิวแห้งเท่ากับ 1,545 กก./ม.³



ภาพที่ 4.3 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ใช้

4.3 สมบัติของซีเมนต์เพสต์

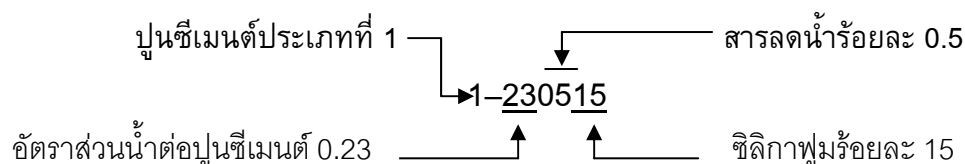
ในการทดลองได้จัดอัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์ในช่วง 0.17 – 0.29 ต่อปริมาณซิลิกาฟูมในอัตราส่วนร้อยละ 5,10,15,20 และ 25 ปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 0,0.5,1.0,1.5,2.0 และ 2.5 โดยเทียบกับน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ทั้งนี้สารลดน้ำที่นำมาใช้อยู่ในรูปของเหลวซึ่งผู้ผลิตไม่ได้ระบุถึงปริมาณน้ำในส่วนผสมของสารลดน้ำดังกล่าว จึงได้ทำการทดลองหาปริมาณน้ำที่อยู่ในสารลดน้ำ โดยนำสารลดน้ำอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อให้ น้ำที่เป็นส่วนประกอบระเหยออกและนำไปชั่งน้ำหนักจนน้ำหนักไม่มีการเปลี่ยนแปลง พบว่าสารลดน้ำ ADVA CAST 207 มีส่วนประกอบของน้ำที่ระเหยออกไปเป็นปริมาณร้อยละ 68 และมีส่วนประกอบที่เป็นของแข็งที่ยังคงเหลือจากการอบในปริมาณร้อยละ 32 ดังนั้นปริมาณน้ำที่นำมาใช้ในส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ได้รวมปริมาณน้ำที่มีอยู่ในส่วนผสมของสารลดน้ำร้อยละ 68 เข้าไปเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ใช้ในส่วนผสมจริง

การผสมซีเมนต์เพสต์ทำการผสมด้วยเครื่องผสมตามมาตรฐาน มอก.15 ทั้งนี้การผสมบางส่วนผสมมีการใช้เวลามากกว่าที่มาตรฐานกำหนด เนื่องจากส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์ต่ำจะทำให้การเข้าถึงของสารลดน้ำในส่วนผสมค่อนข้างยากจึงทำให้ต้องใช้ระยะเวลาผสมมากขึ้น ซึ่งใช้ระยะเวลาผสมประมาณ 5 – 15 นาที

ตารางที่ 4.4
อัตราส่วนผสมซีเมนต์เพสต์

ลำดับ	ปูนซีเมนต์	อัตราส่วนน้ำ ต่อ ปูนซีเมนต์	ร้อยละของ ซิลิกาฟูม	ร้อยละของสารลดน้ำ					
1	1	0.17	5	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			10	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			15	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			20	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			25	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
2	1	0.20	5	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			10	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			15	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			20	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			25	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
3	1	0.23	5	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			10	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			15	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			20	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			25	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
4	1	0.26	5	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			10	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			15	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			20	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			25	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
5	1	0.29	5	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			10	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			15	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			20	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
			25	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50

การเก็บตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบกำลังอัด ได้ใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม. โดยจัดเก็บเพื่อทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน อย่างละ 3 ตัวอย่างในแต่ละส่วนผสม ทำการถอดแบบหลังจากการหล่อ 1 วัน นำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องจนได้อายุทดสอบ เพื่อให้เป็นที่เข้าใจในการทดลองและการอ่านค่าส่วนผสมของตัวอย่าง ได้กำหนดตัวอักษรย่อสำหรับชื่อส่วนผสมซีเมนต์เพสต์ดังมีตัวอย่างดังนี้



4.3.1 ระยะเวลาการก่อตัว

จากการทดลองได้ทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นในแต่ละส่วนผสมโดยระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) ไม่น้อยกว่า 45 นาที และไม่เกิน 185 นาที ส่วนระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) ไม่เกิน 312 นาที ตามมาตรฐาน ASTM C191 เนื่องจากส่วนผสมมีจำนวนมาก จึงไม่สามารถหาระยะเวลาการก่อตัวในเวลาทุกๆ 15 นาทีได้ จึงทำการทดสอบเฉพาะในช่วงเวลาที่ 45, 185 และ 312 นาที

จากการทดลองพบว่าความเข้ากันได้ของส่วนผสมมีความแตกต่างกันตามปริมาณของส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยสามารถแบ่งแยกลักษณะส่วนผสมได้ดังนี้

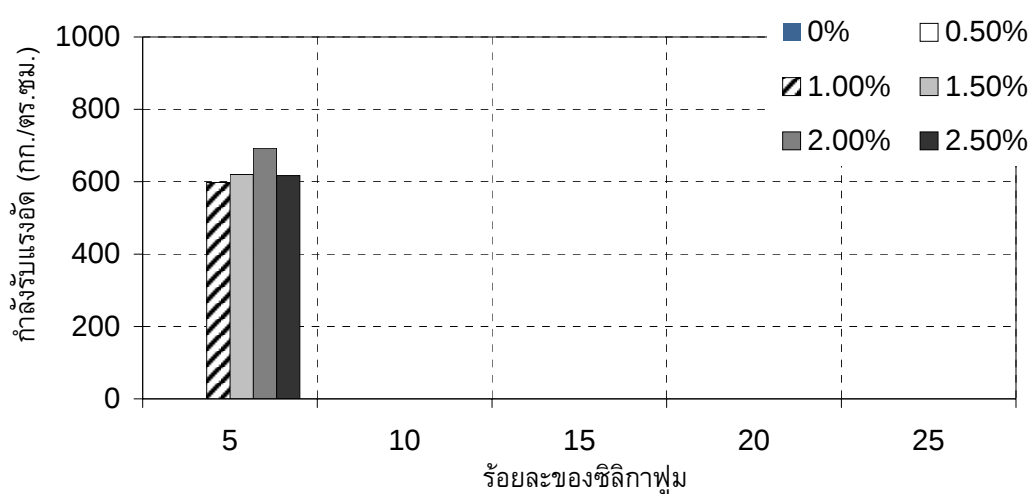
ส่วนผสมที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ เป็นส่วนผสมที่มีอัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่มีค่าต่ำกว่า 0.19 โดยมีส่วนผสมของซิลิกาฟุ่มมากกว่าร้อยละ 5 และใช้สารลดน้ำต่ำกว่าร้อยละ 1 เมื่อทำการผสมในระยะเวลา 10 นาที ส่วนผสมยังมีลักษณะเป็นผงไม่จับตัวกัน

ส่วนผสมที่ผสมเข้ากันได้และมีระยะเวลาการก่อตัวปกติ เป็นส่วนผสมที่มีอัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ตั้งแต่ 0.19 โดยมีส่วนผสมของซิลิกาฟุ่มน้อยกว่าร้อยละ 5 และใช้สารลดน้ำร้อยละ 1 จนถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน w/b ไม่เกิน 0.28 โดยมีส่วนผสมของซิลิกาฟุ่มน้อยกว่าร้อยละ 5 และใช้สารลดน้ำร้อยละ 1.50 โดยระยะเวลาการผสมจะอยู่ในช่วง 1-8 นาที ส่วนผสมจะมีลักษณะเข้ากันได้และมีการไหลตัวได้แก่ส่วนผสม 1-262005, 1-262505, 1-292005 และ 1-292505

ส่วนผสมที่มีระยะเวลาการก่อตัวผิดปกติ พบในส่วนผสมที่มีอัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) มากกว่า 0.28 โดยมีส่วนผสมของซิลิกาฟุ่มน้อยกว่าร้อยละ 5 และใช้สารลดน้ำมากกว่าร้อยละ 1.50 ระยะเวลาในการผสมจะอยู่ในช่วง 1-2 นาที ส่วนผสมจะมีลักษณะเหลว และมีการแยกตัวของน้ำกับวัสดุประสานระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมากกว่า 150 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายมากกว่า 360 นาที

4.3.2 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

ภาพที่ 4.4 แสดงกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.20 จากการทดสอบพบว่ามีส่วนผสมที่สามารถผสมเข้ากันได้ 4 ส่วนผสม โดยมีปริมาณซิลิกาฟูมที่ร้อยละ 5 ผสมร่วมกับสารลดน้ำในอัตราส่วนร้อยละ 1.00 – 2.50 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ในช่วงดังกล่าวการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำช่วยให้ส่วนผสมสามารถผสมเข้ากันได้และซีเมนต์เพสต์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น โดยปริมาณสารลดน้ำที่เหมาะสมที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีกำลังอัดสูงสุด อยู่ที่ร้อยละ 2.00 เป็นส่วนผสมที่ 1-202005 มีกำลังอัดเท่ากับ 692.4 กก./ชม.² และเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาฟูมในอัตราส่วนร้อยละ 10 ขึ้นไป ทำให้ไม่สามารถผสมส่วนผสมต่างๆ เข้ากันได้



ภาพที่ 4.4 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.20 โดยส่วนผสมมีค่า 0.0 คือส่วนผสมที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้

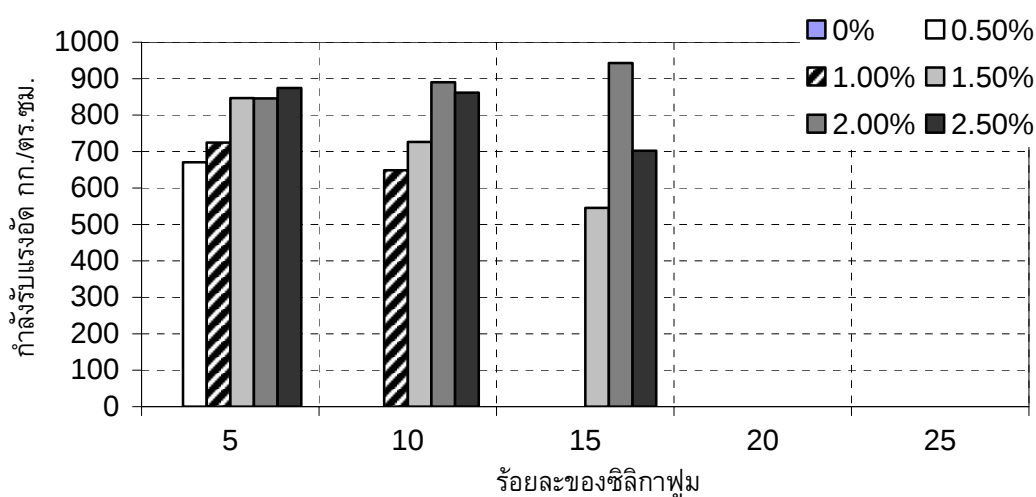
ภาพที่ 4.5 ช่วงอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.23 จากการทดสอบพบว่าเป็นช่วงที่ให้กำลังอัดค่อนข้างสูงในทุกส่วนผสมซึ่งสามารถแยกพิจารณาได้ดังนี้

- ปริมาณซิลิกาฟูมร้อยละ 5 ส่วนผสมที่มีการใช้สารลดน้ำตั้งแต่ร้อยละ 0.5 สามารถผสมส่วนผสมเข้ากันได้และเมื่อปริมาณสารลดน้ำมากขึ้นกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้ปริมาณสารลดน้ำที่ใช้สูงสุดที่ร้อยละ 2.50 เป็นส่วนผสมที่ 1-232505 ซึ่งทำให้ซีเมนต์เพสต์มีกำลังอัดเท่ากับ 874.4 กก./ชม.²

- ปริมาณซิลิกาฟูมร้อยละ 10 มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.209 ส่วนผสมที่เริ่มผสมเข้ากันได้ที่มีปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 1.00 เมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำมากขึ้นจะทำให้กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้นจนสารลดน้ำที่มีปริมาณร้อยละ 2.00 เป็นส่วนผสมที่ 1-232010 ซีเมนต์เพสต์มีกำลังอัดเท่ากับ 890.0 กก./ชม.² และเมื่อปริมาณสารลดน้ำในอัตราส่วนร้อยละ 2.50 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์จะมีค่าเท่ากับ 861.8 กก./ชม.² ซึ่งกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสารลดน้ำมากกว่าร้อยละ 2.00

- ปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 15 มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20 ส่วนผสมที่เริ่มผสมเข้ากันได้ที่ปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 1.50 และที่ปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 2.00 ซีเมนต์เพสต์มีค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 942.8 กก./ซม.² และกำลังอัดเริ่มมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำมากขึ้น

จากการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ในช่วงอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.23 การเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่มเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นจะต้องพิจารณาใช้ปริมาณสารลดน้ำอย่างเหมาะสม จากภาพที่ 4.4 แสดงถึงกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น และลดลงจากการเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่ม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เพิ่มขึ้นไม่อาจช่วยในการเพิ่มกำลังอัด หากผสมรวมกับปริมาณสารลดน้ำที่ไม่เหมาะสม ปริมาณสารลดน้ำในอัตราส่วนร้อยละ 2.00 เป็นปริมาณที่เหมาะสมกับการใช้ร่วมกับซิลิกาฟุ่ม การเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่มแสดงให้เห็นถึงกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมที่ 1-232005, 1-232010 และ 1-232015 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 846 , 890 และ 940 กก./ซม.² ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 5 ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 5



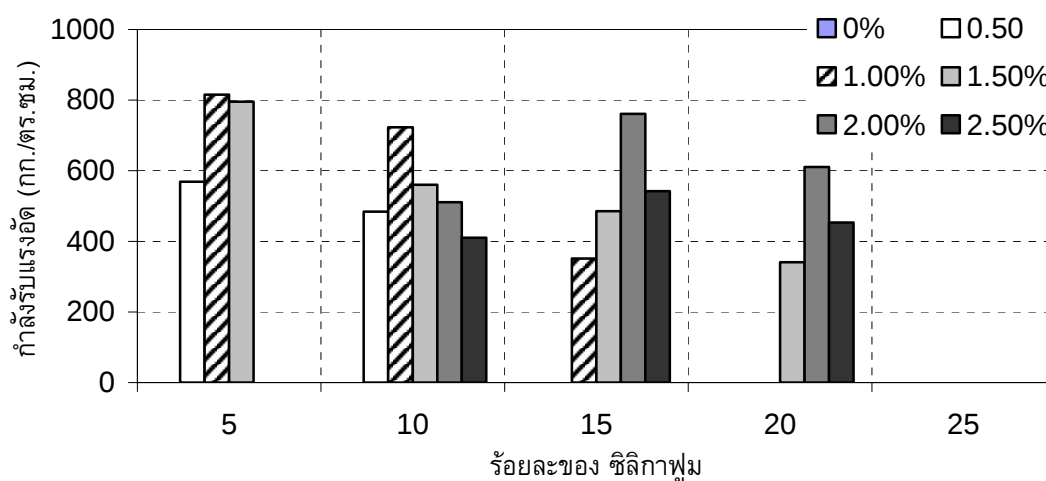
ภาพที่ 4.5 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.23 โดยส่วนผสมมีค่า 0.0 คือส่วนผสมที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้

ภาพที่ 4.6 แสดงกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.26 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ส่วนผสมสามารถผสมเข้ากันได้มากขึ้น และมีผลกระทบต่อการพัฒนากำลังอัดและระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งแยกพิจารณาได้ดังนี้

- ปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 5 พิจารณาส่งผลที่ 1-261005 มีกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นจากส่วนผสมที่ 1-231005 ร้อยละ 12 กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จะมีปริมาณสารลดน้ำที่เหมาะสม เมื่อปริมาณสารลดน้ำมากกว่าร้อยละ 1.00 กำลังอัดเริ่มลดลง จนเมื่อปริมาณสารลดน้ำเท่ากับร้อยละ 2.00 ซีเมนต์เพสต์เริ่มมีระยะเวลาการก่อตัวผิดปกติซึ่งเกิดจากปริมาณน้ำร่วมกับปริมาณสารลดน้ำที่มากทำให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

- ปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 20 ในช่วงดังกล่าวการเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่มมีผลทั้งการพัฒนากำลังอัดและการผสมได้ของส่วนผสม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ส่วนผสมที่ก่อตัวผิดปกติในส่วนผสม 1- 262005 และ 1- 262505 มีการก่อตัวปกติเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่ม และมีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นและมีกำลังอัดสูงสุดเมื่อปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 15 เมื่อปริมาณมากกว่าร้อยละดังกล่าวกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงและส่งผลให้ส่วนผสมไม่สามารถผสมเข้ากันได้เนื่องจากปริมาณน้ำวัสดุประสานที่ลดน้อยลงจนต่ำกว่าปริมาณที่จะสามารถผสมเข้ากันได้

ช่วงอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.26 พบว่าเป็นช่วงที่ให้กำลังอัดอยู่ในช่วง 400 – 815 กก./ชม.² โดยส่วนผสมที่ 1-261005 มีค่ากำลังอัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 815.7 กก./ชม.² โดยส่วนผสมดังกล่าวมีการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นเท่านั้น ซึ่งส่วนผสมอื่นๆ ที่มีการปรับเพิ่มทั้งปริมาณซิลิกาฟุ่ม และสารลดน้ำมีกำลังอัดที่น้อยกว่าส่วนผสมดังกล่าว



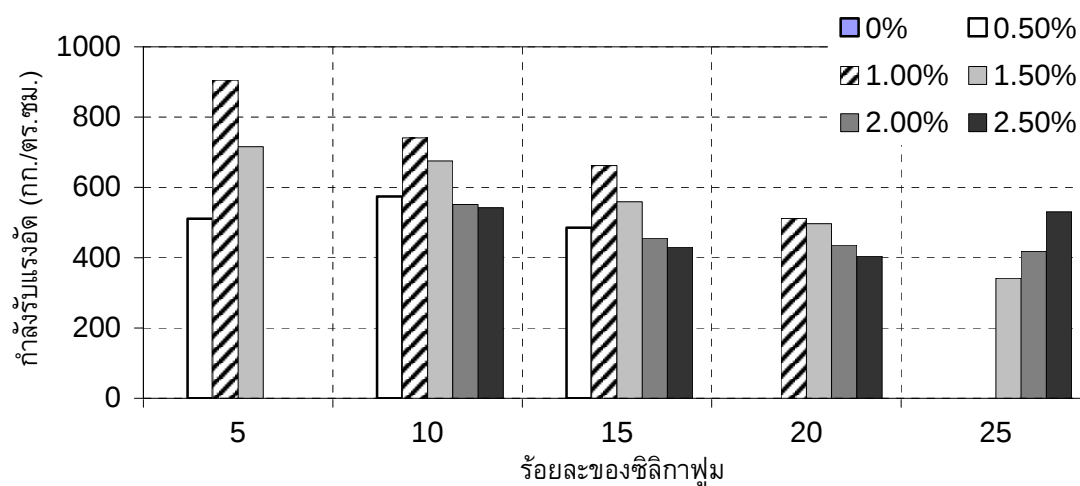
ภาพที่ 4.6 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.26 โดยส่วนผสมมีค่า 0.0 คือส่วนผสมที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้

ภาพที่ 4.7 ช่วงอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.29 เป็นปริมาณที่สูงสุดในการทดสอบกำลังอัดที่ได้ อยู่ในช่วง 350 – 900 กก./ชม.² การเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีผลต่อกำลังอัดซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับช่วงอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.26 ซึ่งแยกพิจารณาได้ดังนี้

- ปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 10 พิจารณาส่วนผสมที่ 1-291005 มีกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นจากส่วนผสมที่ 1-261005 ร้อยละ 12 กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จะมีปริมาณสารลดน้ำที่เหมาะสม เมื่อปริมาณสารลดน้ำมากกว่าร้อยละ 1.00 กำลังอัดเริ่มลดลง จนเมื่อปริมาณสารลดน้ำเท่ากับร้อยละ 2.00 ซีเมนต์เพสต์ยังคงมีระยะเวลาการก่อตัวผิดปกติคล้ายกับช่วงอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.26 ซึ่งเกิดจากปริมาณน้ำร่วมกับปริมาณสารลดน้ำที่มากทำให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

- ปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 25 ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้ส่วนผสมสามารถผสมเข้ากันได้มากขึ้น ปริมาณสารลดน้ำที่มากกว่าร้อยละ 1.50 ส่งผลให้กำลังอัดลดลง

จากการทดสอบพบว่าในช่วงอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.29 ส่วนผสมที่ 1-291005 มีกำลังอัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 905.3 กก./ซม.² โดยส่วนผสมดังกล่าวมีการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นเท่านั้น ซึ่งส่วนผสมอื่นๆที่มีการปรับเพิ่มทั้งปริมาณซิลิกาฟูม และสารลดน้ำมีกำลังอัดที่น้อยกว่าส่วนผสมดังกล่าว



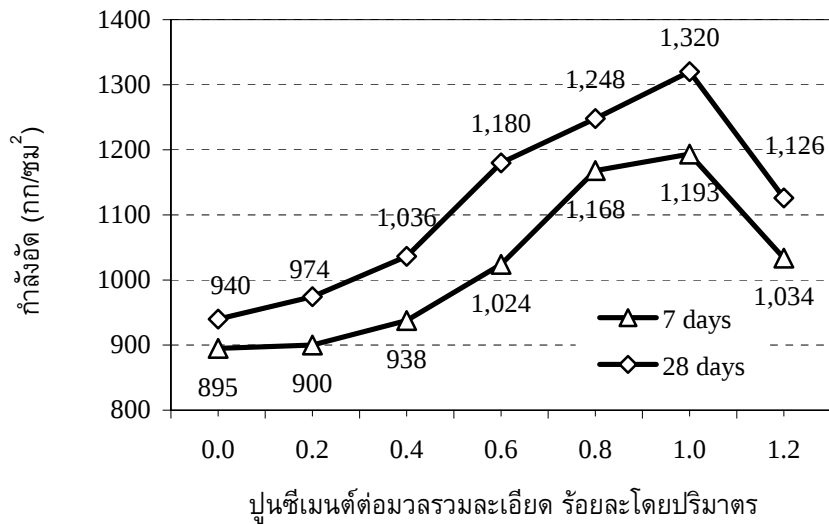
ภาพที่ 4.7 กำลังอัดของซีเมนต์เฟสท์ที่อายุ 28 วัน ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.29 โดยส่วนผสมมีค่า 0.0 คือส่วนผสมที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้

4.4 สมบัติของ UHPC

ในการทดลองส่วนผสมของ UHPC ได้พิจารณาส่วนผสมของซีเมนต์เฟสท์ในส่วนผสมที่ 1-232505 ,1-232015 และ 1-291005 นำมาพัฒนาเพื่อให้ได้ส่วนผสม UHPC มีกำลังอัดสูงสุด ภายใต้ อัตราการการไหลแผ่ที่ไม่น้อยกว่าร้อยละ 110 $\pm$ 5 จากการทดสอบอัตราการไหลแผ่ (Flow table) โดยทดลองหาปริมาณมวลรวมละเอียดที่เหมาะสมในอัตราส่วนร้อยละ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 โดยปริมาตรปูนซีเมนต์

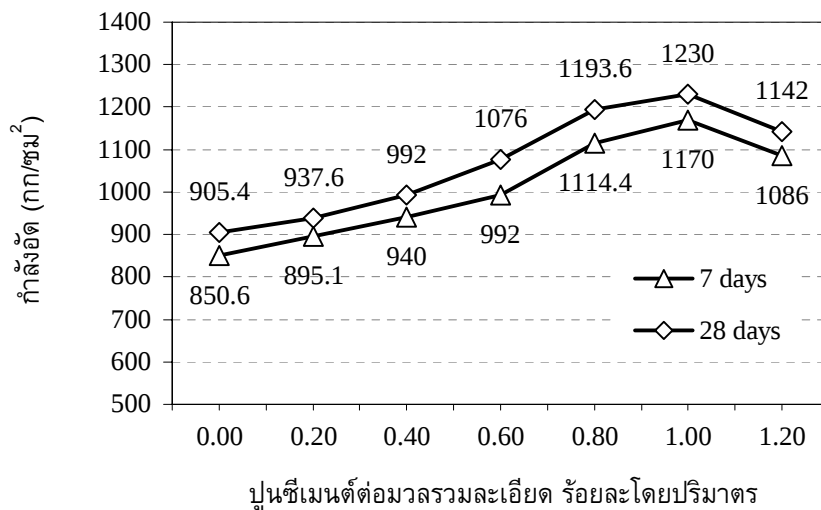
4.4.1 กำลังอัดของ UHPC

ภาพที่ 4.8 กำลังอัดในส่วนผสม 1-232505 ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.23 มีปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และมีปริมาณซิลิกาฟูมร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์นำมาผสมรวมกับทรายละเอียดในอัตราส่วนต่างๆพบว่า ส่วนผสมที่มีกำลังอัดที่ยังคงอัตราการไหลแผ่ไม่ต่ำกว่า 110 $\pm$ 5 คือผสมมวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0.8 โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 1,248 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน



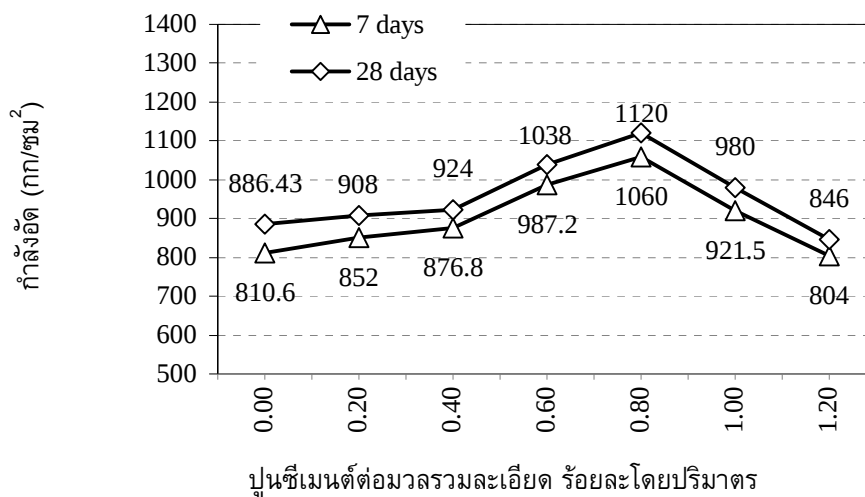
ภาพที่ 4.8 กำลังอัดของ UHPC ที่อายุ 7 และ 28 วัน ในส่วนผสม 1-232505

ภาพที่ 4.9 กำลังอัดในส่วนผสม 1-232015 ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.23 มีปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และมีปริมาณซิลิกาฟูมร้อยละ 15 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ นำมาผสมรวมกับมวลรวมละเอียดในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าส่วนผสมที่มีกำลังอัดที่ยังคงอัตราการไหลไม่น้อยกว่า 110 ± 5 คือผสมมวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0.8 โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 1,193 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน



ภาพที่ 4.9 กำลังอัดของ UHPC ที่อายุ 7 และ 28 วัน ในส่วนผสม 1-232015

ภาพที่ 4.10 กำลังอัดในส่วนผสม 1-291005 ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.29 มีปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และมีปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ นำมาผสมรวมกับมวลรวมละเอียดในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าส่วนผสมที่มีกำลังอัดที่ยังคงอัตราการไหลแผ่ไม่น้อยกว่า 110 ± 5 คือผสมมวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0.8 โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ $1,193 \text{ กก./ซม.}^2$ ที่อายุ 28 วัน

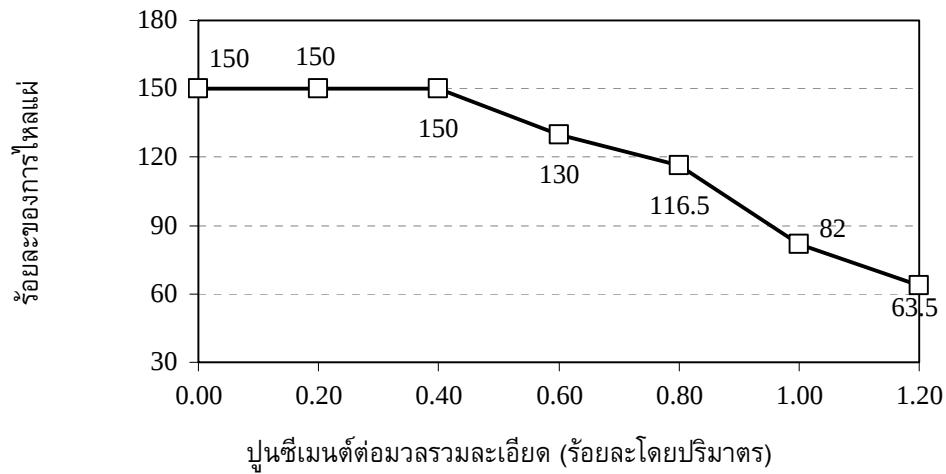


ภาพที่ 4.10 กำลังอัดของ UHPC ที่อายุ 7 และ 28 วัน ในอัตราส่วน 1-291005

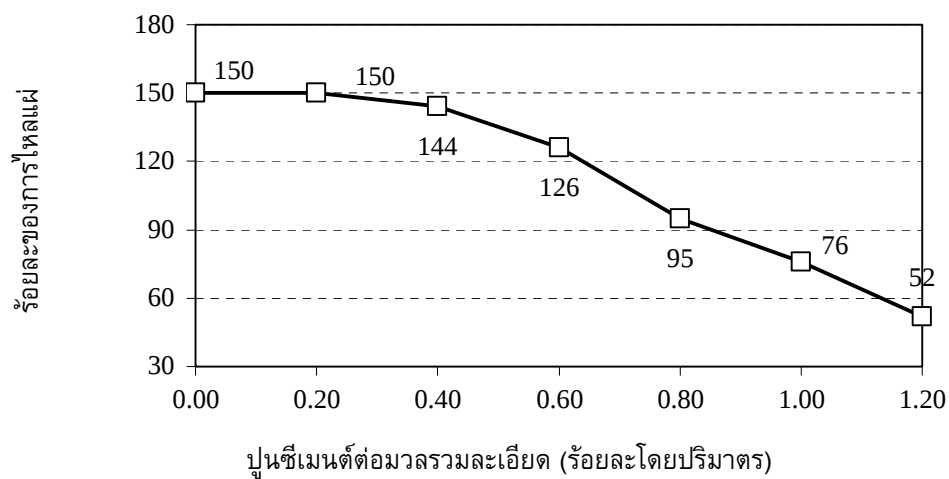
4.4.2 ปริมาณของทรายละเอียดมีผลต่อการไหลแผ่

ภาพที่ 4.11 แสดงให้เห็นอัตราการไหลแผ่ของ UHPC มีอัตราการไหลแผ่ลดลงตามปริมาณทรายละเอียดที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของทรายละเอียดในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ ส่งผลให้อัตราการไหลแผ่ลดลงประมาณร้อยละ 15 โดยส่วนผสม 1- 232505-08 เป็นส่วนผสมที่มีกำลังอัดและมีค่าอัตราการไหลแผ่ ซึ่งค่าเท่ากับร้อยละ 116 ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 และคิดเป็นอัตราส่วนซีเมนต์เฟสต่อทรายละเอียดเท่ากับ 1 : 0.62 ปริมาณซีเมนต์เฟสที่มากกว่าทรายละเอียดจะทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานระหว่างมวลรวมทำให้การไหลตัวได้ดี

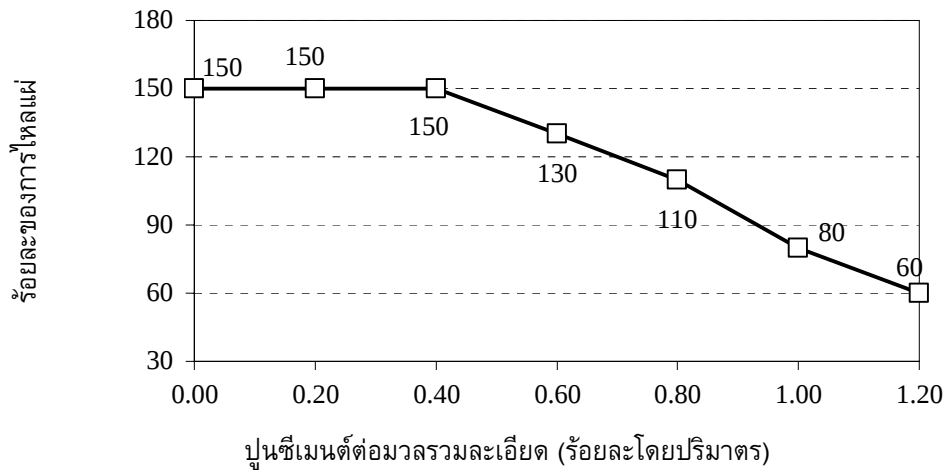
จากผลการทดสอบกำลังอัดของ UHPC เมื่อปริมาณทรายละเอียดเพิ่มขึ้นกำลังอัดของ UHPC มีแนวโน้มที่สูงขึ้น จนถึงอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายละเอียดเท่ากับ 1 : 1 UHPC มีค่ากำลังอัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ $1,320 \text{ กก./ซม.}^2$ ซึ่งอัตราส่วนของทรายละเอียดดังกล่าวทำให้ UHPC มีความอัดแน่นอย่างเต็มที่



ภาพที่ 4.11 อัตราไหลผ่านของ UHPC ส่วนผสม 1-232505 โดยผสมกับทรายละเอียดในอัตราส่วน 0.00, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00 และ 1.20 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.12 อัตราไหลผ่านของ UHPC ส่วนผสม 1-232015 โดยผสมกับทรายละเอียดในอัตราส่วน 0.00, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00 และ 1.20 ตามลำดับ

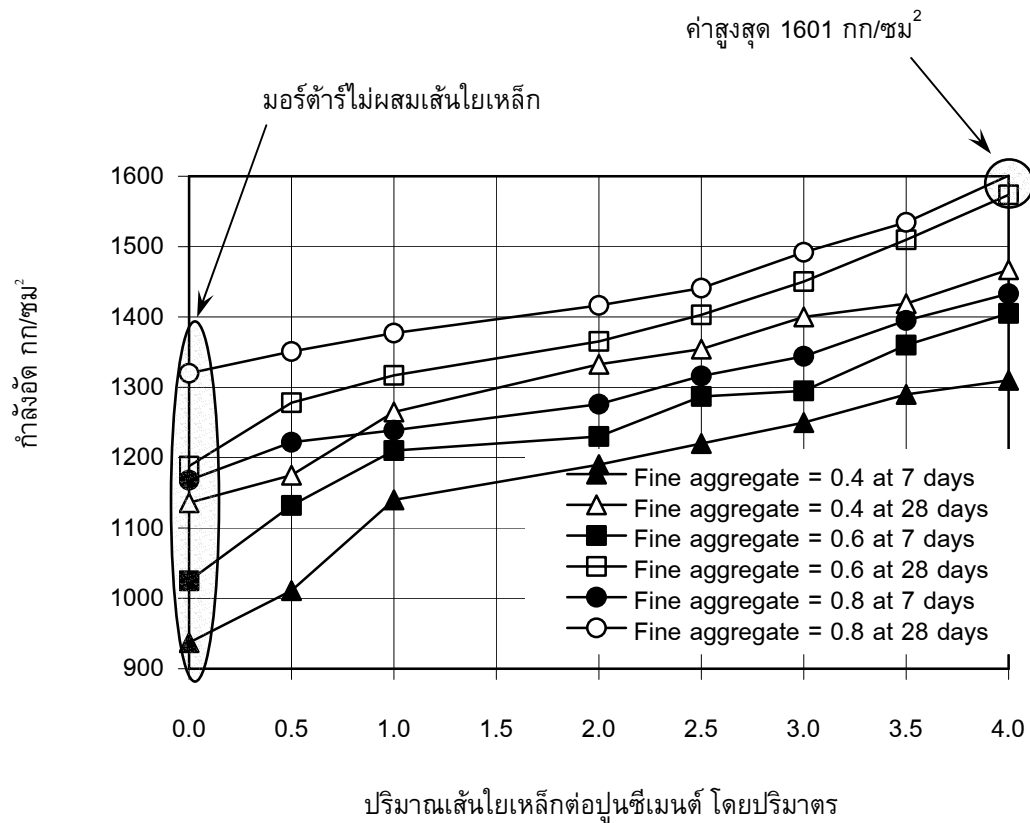


ภาพที่ 4.13 อัตราไหลแผ่ของ UHPC ส่วนผสม 1-291005 โดยผสมกับทรายละเอียดในอัตราส่วน 0.00, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00 และ 1.20 ตามลำดับ

4.4.3 อิทธิพลร่วมของปริมาณเส้นใยเหล็กที่มีผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

จากผลการทดสอบทั้งค่าการไหลแผ่และกำลังอัดของมอร์ตาร์ได้ข้อสรุปของส่วนผสมที่จะถูกพัฒนาไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลร่วมปริมาณเส้นใยเหล็กและทรายละเอียดที่มีผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ต่อไปโดยใช้ความสามารถในการทำงานได้ผ่านค่าการไหลแผ่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5 มอร์ตาร์ต้องมีค่าอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8

ภาพที่ 4.14 แสดงกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 และ 28 วัน โดยมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 นอกจากนั้นในการศึกษานี้ได้ขยายอัตราส่วนของวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดที่ 1 : 0.6 และ 1 : 0.4 เพิ่มเติม พบว่ามอร์ตาร์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเส้นใยเหล็ก โดยมอร์ตาร์มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 ที่ปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 4.0 โดยปริมาตรวัสดุประสาน สามารถพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงสุดได้ถึง 1601 กก/ซม^2



ภาพที่ 4.14 กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยเหล็กที่อายุ 7 และ 28 วัน

สำหรับมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดที่ 1 : 0.6 และปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 4.0 โดยวัสดุประสาน มีการพัฒนากำลังไปได้ถึง 1574 กก/ชม² ซึ่งต่ำกว่าที่อัตราส่วน 1 : 0.8 ในขณะที่มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดที่ 1 : 0.4 มีค่าเท่ากับ 1467 กก./ชม.² ตามปริมาณน้ำอิสระ (Free water) ที่มีในส่วนผสมที่มีมากขึ้นเมื่อปริมาณมวลรวมละเอียดมีปริมาณลดลง

จากผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยเหล็กสามารถหาความสัมพันธ์ในรูปแบบของโพลิโนเมียลของกำลังอัดกับร้อยละของเส้นใยเหล็ก โดยปริมาตรดังแสดงในสมการที่ (1) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ดังแสดงในตารางที่ 4.5

$$f_{t(days)} = \frac{a}{(1 + \exp^{b-cx})^{\frac{1}{d}}} \quad (4.1)$$

เมื่อ $f_{t(days)}$ คือ กำลังอัดของมอร์ตาร์ (อายุ (วัน))

ρ_{steel} คือ ร้อยละของเส้นใยเหล็ก โดยปริมาตรวัสดุประสาน

a, b, c และ d คือ ค่าสัมประสิทธิ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5
ค่าสัมประสิทธิ์ ตามสมการที่ (1)

อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.4					
ที่อายุ (วัน)	ค่าสัมประสิทธิ์				r
	a	b	c	d	
7	1332.95	-0.80	0.67	1.07	0.99
28	1555.26	1.01	0.53	4.22	0.99
อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.6					
ที่อายุ (วัน)	ค่าสัมประสิทธิ์				r
	a	b	c	d	
7	1557.68	-1.84	0.31	0.38	0.98
28	2472.13	17.87	1.57	25.12	0.99
อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8					
ที่อายุ (วัน)	ค่าสัมประสิทธิ์				r
	a	b	c	d	
7	2061.10	20.48	1.74	36.46	0.99
28	2374.36	19.68	1.50	33.09	0.99

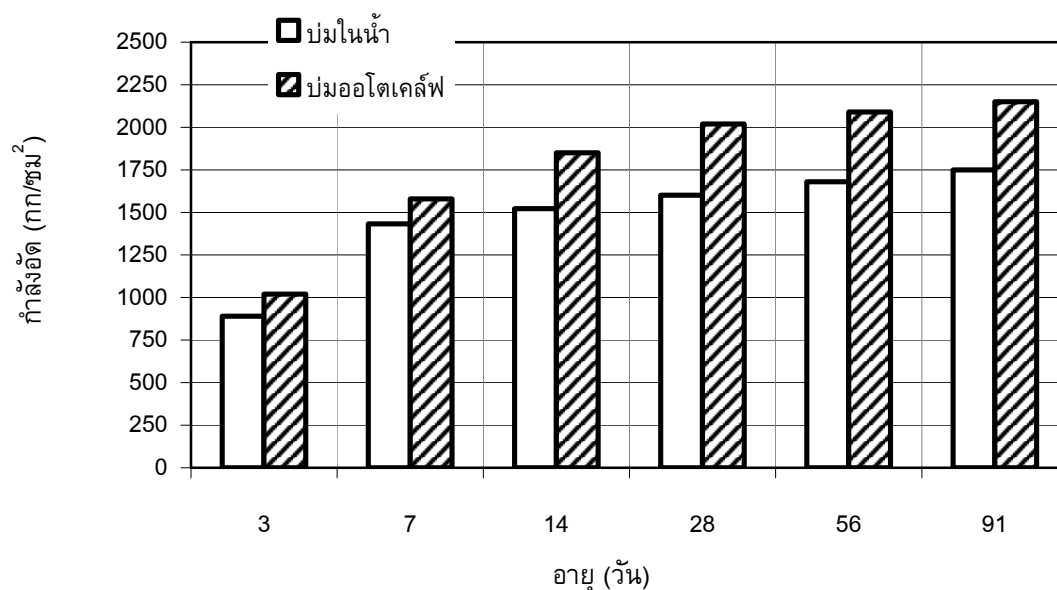
หมายเหตุ r คือสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

4.5 สมบัติของ Reactive powder concrete (RPC)

สำหรับสมบัติของ Reactive powder concrete (RPC) อันประกอบด้วย กำลังอัด กำลังดึง กำลังดัด โมดูลัสยืดหยุ่น การหดตัวแบบแห้งและแบบออโตจีเนียส และความต้านทานต่อซัลเฟตของ มอร์ตาร์มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 ที่ปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 4.0 จะได้นำเสนอในส่วนนี้ โดยการศึกษาผลกระทบของการบ่มด้วยการแช่น้ำปกติและไอน้ำแรงดันสูงควบคู่กันไปด้วย

4.5.1 กำลังอัด

การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซึ่งในที่นี้จะได้นิยามเป็น Reactive powder concrete (RPC) ชนิดหนึ่ง แสดงในภาพที่ 4.15 โดยจากการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมดังกล่าวข้างต้นที่ยึดตามเกณฑ์สามประการอันประกอบด้วยค่า กำลังอัดสูงสุด มีค่าการไหลแผ่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5 และมีการก่อตัวปกติพบว่า มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 ที่ปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 4.0 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดถึง 1601 กก./ซม.² ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติของมอร์ตาร์ภายใต้การบ่ม 2 ชนิด ได้แก่ การบ่มในน้ำปูนใส ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และการบ่มด้วยออโตเคล์ฟที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1.7 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าการพัฒนากำลังอัดของ RPC เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งสองชนิดการบ่ม โดยที่อายุ 91 วัน RPC มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 1,752 และ 2,159 กก./ซม.² สำหรับการบ่มในน้ำและบ่มด้วยออโตเคล์ฟตามลำดับ ซึ่งจะเห็นการบ่มที่อุณหภูมิสูงมีผลในการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาโซลานิกทำให้มีการก่อตัวของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วจึงส่งผลทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงต้น

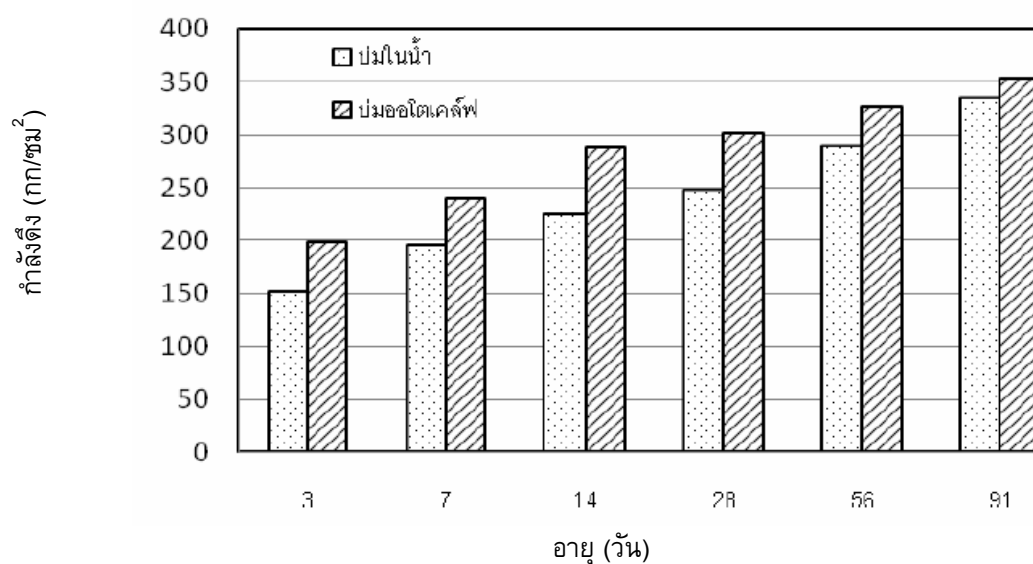


ภาพที่ 4.15 กำลังอัดของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคล์ฟ

4.5.2 กำลังดึง

เช่นเดียวกันกับการพัฒนากำลังอัด การพัฒนากำลังดึงของ RPC มีอัตราที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ภายใต้การบ่มในน้ำและอโตเคล์ฟ โดยในช่วงต้น (14 วันแรก) อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังดึง โดยจะเห็นว่า ที่อายุ 28 และ 91 วัน RPC มีค่ากำลังดึงอยู่ที่ 150 และ 195 กก./ชม.² และ 325 และ 350 กก./ชม.² ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.16 ซึ่งการเพิ่มขึ้นดังกล่าวมีนัยสองประการคือ การพัฒนา กำลังดึงมาจากความแข็งแรงของโครงสร้างภายในที่เพิ่มขึ้นด้วยอัตราการทำปฏิกิริยาที่สูง (อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานที่ต่ำ โดยในที่นี้มีค่าเท่ากับ 0.23) และการอัดแน่นของอนุภาคจากวัสดุเติมแทรกซึ่งก็คือ ซิลิกาฟุ่ม ส่วนนัยที่สองคือผลจากการใช้เส้นใยเหล็กในปริมาณร้อยละ 4 เข้าไป ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงได้มากขึ้นกว่าคอนกรีตธรรมดา

สำหรับผลการกระทบจากวิธีการบ่มทั้งแบบธรรมดาและใช้วิธีการอโตเคล์ฟพบการเพิ่มขึ้นของแรงดึงใน RPC ที่ผ่านการบ่มด้วยอโตเคล์ฟสูงขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการบ่มในน้ำ สาเหตุที่สำคัญ มาจากการความร้อนที่สูงถึง 200 องศาเซลเซียส มีผลต่อคิเนติกส์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันกฎของ Arrhenius ทำให้อัตราการฟอร์มตัวของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังส่งผลต่อปริมาณ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นปฏิกิริยาปอซโซลานิกซ์ของซิลิกาฟุ่มซึ่งต้องใช้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นจึงมีมากขึ้น จากผลดังกล่าวทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ของ ปฏิกิริยาทั้งสองหรือก็คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีมากขึ้นและเกิดในอัตราที่สูง นอกจากนั้นแล้ว ความดันที่มีค่าสูงยังส่งผลต่อการจัดเรียงอนุภาคในขณะที่ยังอยู่ในสภาวะกึ่งอิลาสติกด้วย ซึ่งนั่น หมายถึงอนุภาคถูกกดดันให้เคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากขึ้น จากผลดังกล่าวทำให้ค่ากำลังดึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

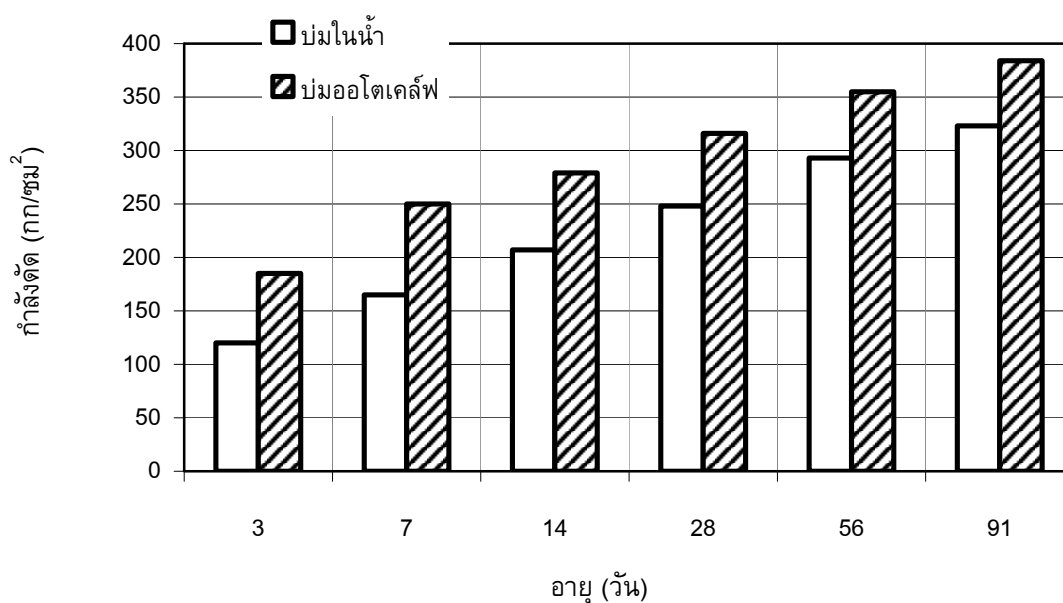


ภาพที่ 4.16 กำลังดึงของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและอโตเคล์ฟ

4.5.3 กำลังดัด

การพัฒนา กำลังดัดของ RPC แสดงในภาพที่ 4.17 โดยค่ากำลังที่รับได้เป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพของวัสดุต่อการรับแรงดึงและแรงอัดในขณะเดียวกัน โดยจะพบว่าค่ากำลังดัดของ RPC ซึ่งผ่านการบ่มในน้ำที่อายุ 28 และ 91 วัน มีค่า 207.4 และ 323.4 กก./ชม.² ตามลำดับ ในขณะที่ RPC ซึ่งผ่านการบ่มด้วยออโตเคล์ฟที่อายุ 28 และ 91 วัน มีค่า 316.4 และ 384.9 กก./ชม.² ตามลำดับ หรือก็คือการบ่มด้วยออโตเคล์ฟมีผลต่อการเพิ่มกำลังดัดที่อายุ 28 และ 91 วัน ร้อยละ 27.4 และ 18.9 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นดังกล่าวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับทั้งกำลังอัดและกำลังดึง ด้วยเหตุผลเช่นเดียวคือ การเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตจากคิเนติกส์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิกที่เพิ่มขึ้น

แต่อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้เพิ่มเติมว่า ค่าความแตกต่างของกำลังดัดของ RPC ที่อายุมากขึ้นมีค่าลดลง ซึ่งแสดงนัยในสองประการคือ การบ่มด้วยออโตเคล์ฟมีผลในการเพิ่มกำลังดัดในช่วงต้น ในขณะที่การบ่มในน้ำมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งการบ่มด้วยออโตเคล์ฟด้วยความร้อนและความดันที่สูงมีผลต่อการแตกร้าวในระดับไมโคร (Micro-cracking) ซึ่งมีผลต่อกำลังรับแรงในระยะยาวที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ RPC ที่บ่มในน้ำอย่างต่อเนื่อง

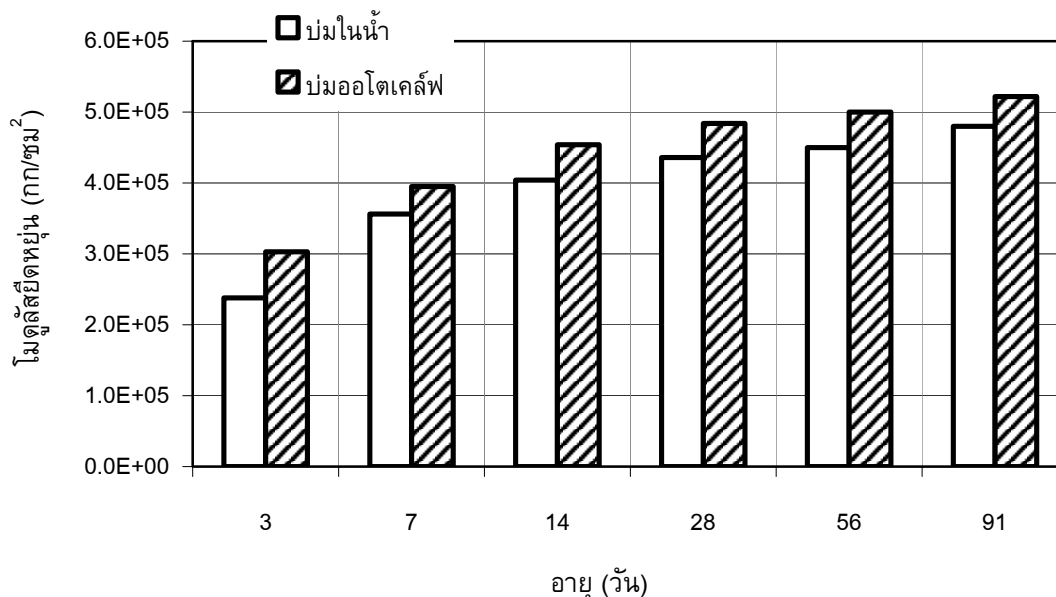


ภาพที่ 4.17 กำลังดัดของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคล์ฟ

4.5.4 โมดูลัสยืดหยุ่น

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในช่วง 91 วันแรกของ RPC ที่ผ่านการบ่มในน้ำและออโตลฟ์แสดงในภาพที่ 4.18 พบว่าเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดย RPC ที่บ่มในน้ำมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในช่วง 230,000 กก./ชม.² (ที่อายุ 3 วัน) ถึง 480,000 กก./ชม.² (ที่อายุ 91 วัน) ในขณะที่ RPC ที่ผ่านการบ่มออโตลฟ์มีค่าในช่วง 300,000 กก./ชม.² (ที่อายุ 3 วัน) ถึง 520,000 กก./ชม.² (ที่อายุ 91 วัน) การเพิ่มขึ้นดังกล่าวเป็นผลมาจากสาเหตุเช่นเดียวกับ กำลังอัด กล่าวคือ การบ่มในน้ำช่วยเพิ่มการทำปฏิกิริยาให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิสูงมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต อีกทั้งความดันที่สูงช่วยในการอัดแน่นของโครงสร้างภายในให้สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการบ่มด้วยออโตเคิร์ฟทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 13.6 เมื่อเปรียบเทียบกับ การบ่มในน้ำ

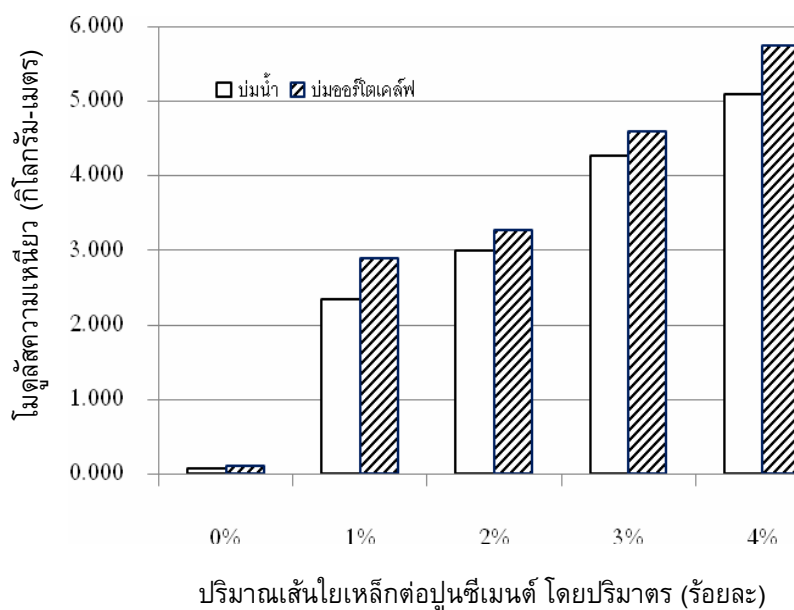
เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ RPC เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318 (Building Code Requirements for Structural Concrete) ซึ่งกำหนดไว้คือ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (E_c) ของคอนกรีตปกติเท่ากับ $0.043w_c^{1.5}\sqrt{f'_c}$ เมกะปาสคาล โดยที่ w_c คือหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (กก./ม.³) และ f'_c คือกำลังอัดในหน่วยเมกะปาสคาล พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ RPC มีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ ทั้งนี้เนื่องจากในส่วนผสมของคอนกรีต RPC มีเส้นใยเหล็กผสมอยู่ทำให้เป็นการเพิ่มความสามารถในการรับแรงภายใต้การเสียรูปที่ค่าเดียวกันได้มากขึ้น



ภาพที่ 4.18 โมดูลัสยืดหยุ่นของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคิร์ฟ

4.5.5 โมดูลัสความเหนียว (Modulus of Toughness)

จากการทดสอบกำลังดัดซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1018 ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดัดกับระยะโก่งตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตได้ โมดูลัสความเหนียวเป็นความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานระหว่างที่รับน้ำหนักกระทำจนแตกหัก ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าโมดูลัสความเหนียว (Modulus of Toughness) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ของแรงกระทำกับระยะโก่งที่เกิดขึ้น โดยแสดงในภาพที่ 4.19 โมดูลัสความเหนียวของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคล์ฟที่อายุ 28 วัน ซึ่งพบว่าโมดูลัสความเหนียวของ RPC มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น โดยค่าโมดูลัสความเหนียวของ RPC ที่ผสมเส้นใยเหล็กในอัตราส่วนปริมาณเส้นใยเหล็กต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 1, 2, 3 และ 4 โดยปริมาตร มีค่า 0.08 ถึง 5.08 กิโลกรัม-เมตร และ มีค่า 0.10 ถึง 5.47 กิโลกรัม-เมตร สำหรับคอนกรีตที่บ่มในน้ำและออโตเคล์ฟ ตามลำดับ ซึ่งมาจากผลของเส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มกำลังของคอนกรีตหรือความสามารถของคอนกรีตในการรับแรงดึงที่สูงขึ้น และจะเห็นว่าการบ่มด้วยออโตเคล์ฟมีส่วนช่วยเพิ่มโมดูลัสความเหนียวด้วยเช่นกัน อันเนื่องจากการเปลี่ยนโครงสร้างภายในที่อัดแน่นขึ้นในระหว่างการบ่ม

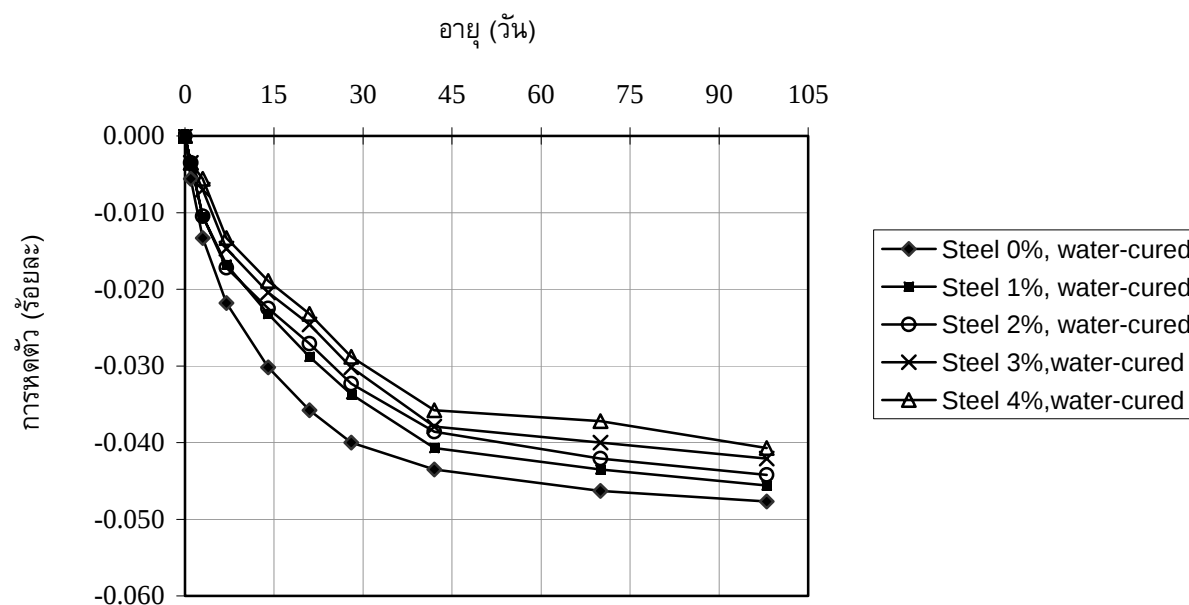


ภาพที่ 4.19 โมดูลัสความเหนียวของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคล์ฟที่อายุ 28 วัน

4.5.6 การหดตัวแบบแห้ง

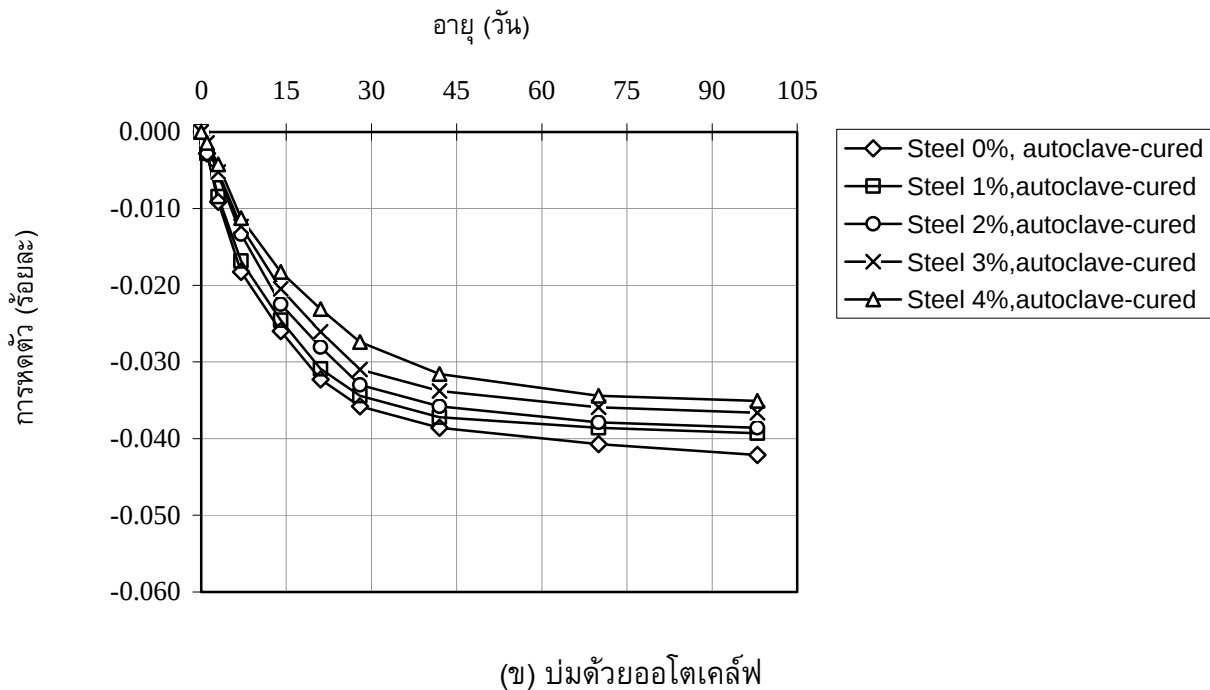
การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตเป็นการหดตัวที่เกิดขึ้นจากการสูญเสียน้ำหรือความชื้น (Moisture) ซึ่งประกอบด้วยน้ำอิสระ (Free Water) และน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและอยู่ในสภาวะอากาศที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Water) และเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible) กล่าวคือ เมื่อน้ำคอนกรีตไปผ่านสภาวะที่มีความชื้นจะไม่สามารถทำให้คอนกรีตกลับมามีปริมาตรเท่ากับปริมาตรเริ่มต้น โดยผลการทดสอบค่าการหดตัวแบบแห้งของ RPC แสดงในภาพที่ 4.19 ซึ่งพบว่าแนวโน้มของค่าการหดตัวแบบแห้งของ RPC ที่ผ่านการบ่มในน้ำและออโตเคล์ฟมีลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ อัตราการหดตัวแบบแห้งจะมีค่าสูงในช่วงแรก (56 วันแรก) จากนั้นมีอัตราที่ลดลงตามลำดับจนถึงที่อายุ 180 วัน ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงต้นความชื้นที่บริเวณผิวของตัวอย่างสามารถเคลื่อนที่ออกได้ง่ายจึงส่งผลต่อการหดตัวที่มากขึ้น ในขณะที่ในช่วงหลังความชื้นภายในเคลื่อนที่ออกมาได้ยากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความชื้นที่บริเวณผิวนอก

จากภาพเดียวกันจะเห็นได้ว่า การหดตัวแบบแห้งของ RPC ที่ผ่านการบ่มด้วยออโตเคล์ฟมีค่าต่ำกว่าที่ผ่านการบ่มในน้ำ เนื่องจากสาเหตุที่มาจากความทึบน้ำที่ลดลงตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของ RPC ที่บ่มด้วยออโตเคล์ฟ ทำให้ความชื้นจากภายในออกมาได้น้อยกว่า ประกอบการอัดแน่นในช่วงที่บ่มมีส่วนทำให้โครงสร้างภายในที่มีโพรงคาพิวลารีที่ไม่ต่อเนื่องมีมากกว่า จึงยังส่งผลต่อการเคลื่อนที่ออกของความชื้นที่เป็นไปได้ยากกว่า การหดตัวแบบแห้งจึงมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างซึ่งบ่มในน้ำ



(ก) บ่มด้วยน้ำ

ภาพที่ 4.20 การหดตัวแบบแห้งของ RPC

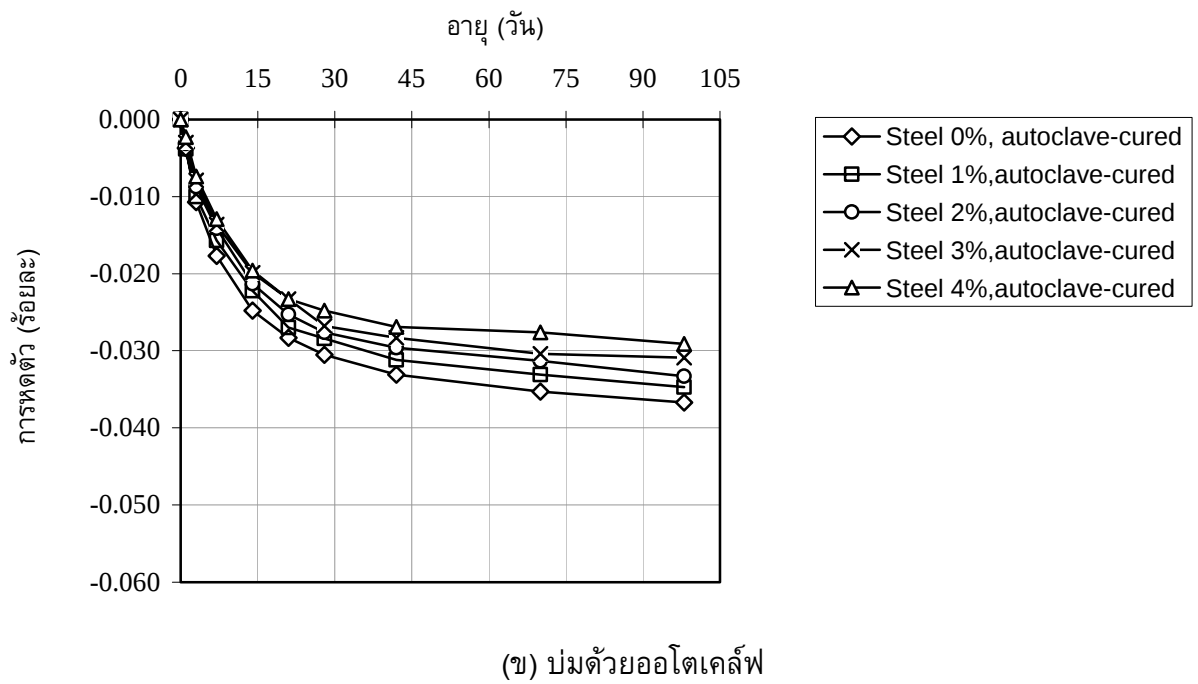
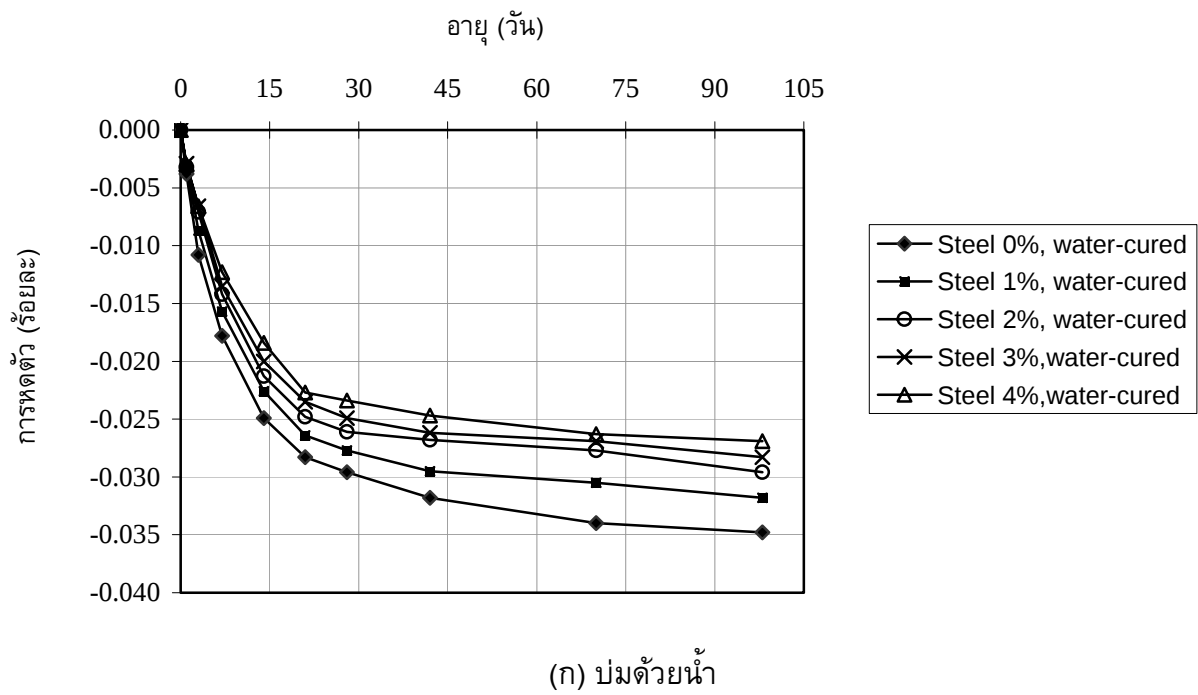


ภาพที่ 4.20 (ต่อ) การหดตัวแบบแห้งของ RPC

4.5.7 การหดตัวแบบออโตจีเนียส

การหดตัวแบบออโตจีเนียสของ RPC เป็นผลมาจากการลดลงของความดันในช่องว่างคาปิลลารี เนื่องจากน้ำในช่องว่างคาปิลลารีถูกดูดซึมไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งน้ำในโพรงคาปิลลารีถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่อง จนน้ำในโพรงคาปิลลารีเกิดไม่อึดตัวและไม่มีน้ำจากภายนอกเข้าทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้มีชื่อเรียกว่า Self-desiccation มีผลทำให้ความดันในช่องว่างคาปิลลารีลดลง เป็นสาเหตุของการหดตัวแบบออโตจีเนียสตามมาซึ่งการหดตัวจะเกิดในทุกทิศทาง ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อหดตัวชนิดนี้ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ปริมาณน้ำที่ใช้ผสม อัตราส่วนผสมของคอนกรีตและสภาพการบ่ม โดยขนาดของการหดตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ที่ละเอียดและมากขึ้น

ผลการทดสอบการหดตัวชนิดนี้ของ RPC แสดงในภาพที่ 4.21 พบว่าแนวโน้มของค่าการหดตัวของ RPC มีลักษณะเดียวกันกับการหดตัวแบบแห้ง โดยมีค่าสูงในช่วงแรก (56 วันแรก) จากนั้นมีอัตราที่ลดลงตามลำดับจนถึงที่อายุ 180 วัน สำหรับผลของการบ่มด้วยออโตเคล์ฟที่มีต่อการหดตัวของ RPC พบว่ามีค่าการหดตัวมากกว่า RPC ที่ไม่ผ่านการบ่มด้วยออโตเคล์ฟ ทั้งนี้เพราะการเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยาที่สูงจากความร้อนที่ใส่เข้าไปทำให้ความชื้นภายในถูกใช้ไปปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกว่าที่อุณหภูมิปกติ



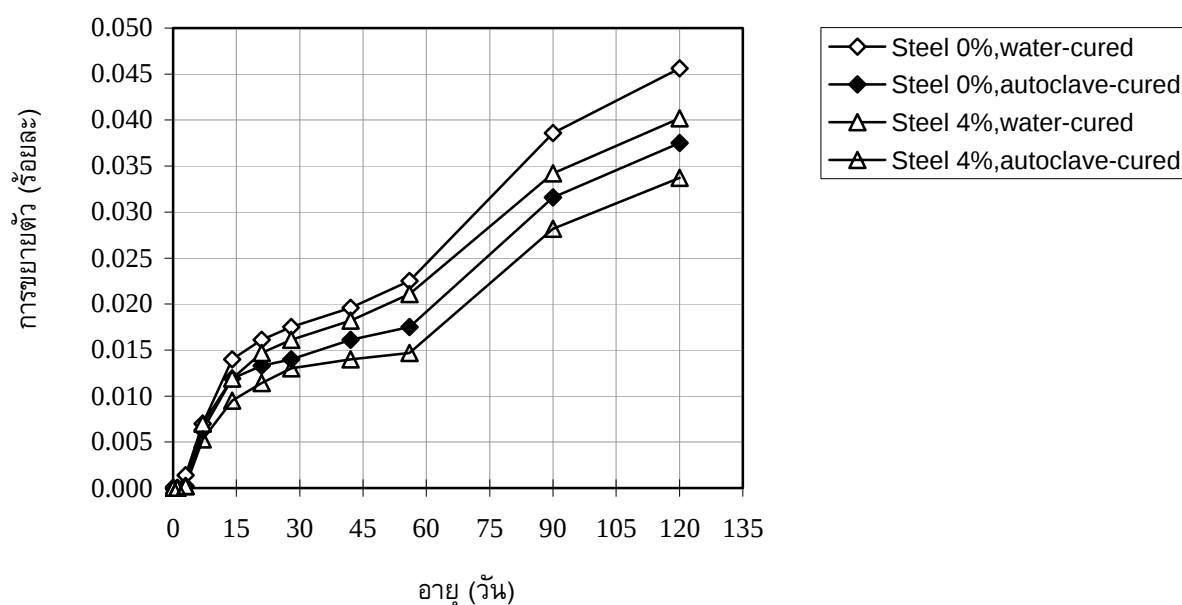
ภาพที่ 4.21 การหดตัวแบบบอโตจีเนียสของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคล์ฟ

4.5.8 ความต้านทานต่อซัลเฟต

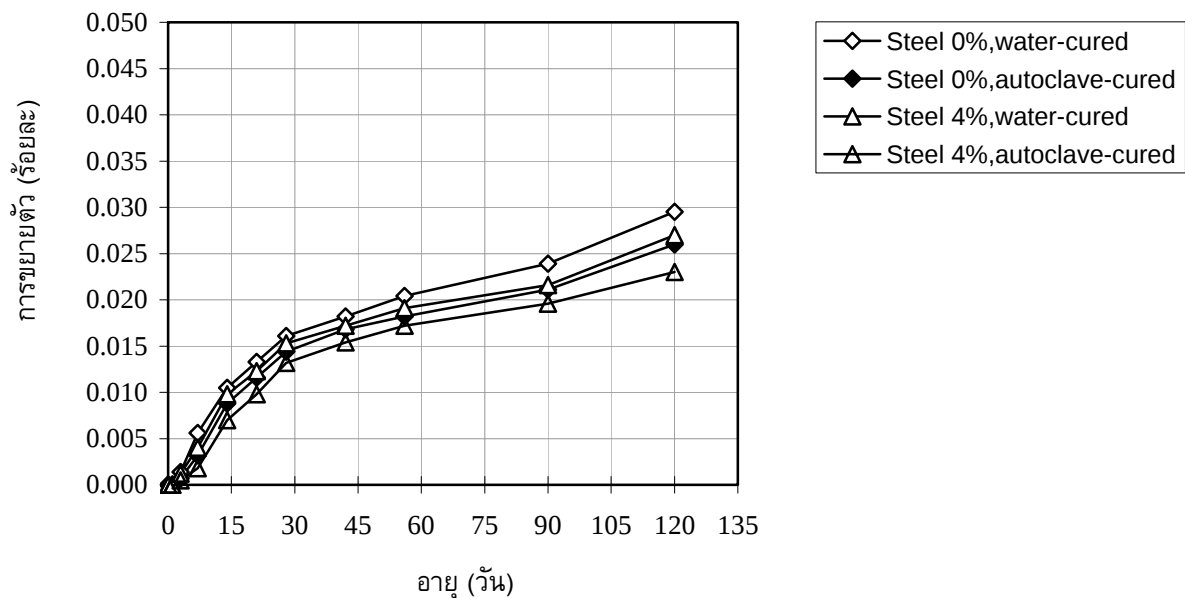
4.5.8.1 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อการกระทำเนื่องจากสารละลายซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่มีความเข้มข้น 50 มก./ล. โดยทำการควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ในช่วง 6 ถึง 8 ด้วยกรดซัลฟริก (H_2SO_4) โดยความต้านทานเนื่องจากสารละลายซัลเฟตสามารถวัดในรูปของการขยายตัวเชิงเส้น (Linear Expansion) ของ RPC แสดงในภาพที่ 4.22 พบว่า ในช่วงประมาณ 100 วันแรก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะในช่วงแรกที่มีปริมาณของยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และเอ็ททริงไกต์มีน้อยกล่าวคือ ปฏิกิริยาของโซเดียมซัลเฟตกับเพสต์ใน RPC สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ โดยเริ่มจากการเกิดยิปซัม โดยโซเดียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เกิดผลิตภัณฑ์เป็นยิปซัม ซึ่งในช่วงแรกผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) มีปริมาณน้อยและส่วนใหญ่ถูกกักอยู่กับโครงสร้างของแคลเซียมซลิเกตไฮเดรตทำให้ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่จะทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลเฟตมีน้อยลง

เมื่อพิจารณาค่าการขยายตัวของ RPC พบว่า RPC ที่ผ่านการบ่มออโตเคิลฟ์มีค่าการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตน้อยกว่า RPC ที่ไม่ผ่านการบ่ม ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการพัฒนากำลังของ RPC ที่ผ่านการบ่มด้วยออโตเคิลฟ์มีค่าสูงกว่าแบบที่ไม่ผ่านการบ่ม ซึ่งหมายถึงโครงสร้างภายในมีความทึบสูงกว่าทำให้ไอออนของซัลเฟตไม่สามารถเข้าไปสู่ภายในได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้าง RPC ที่ไม่ได้บ่ม



(ก) เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

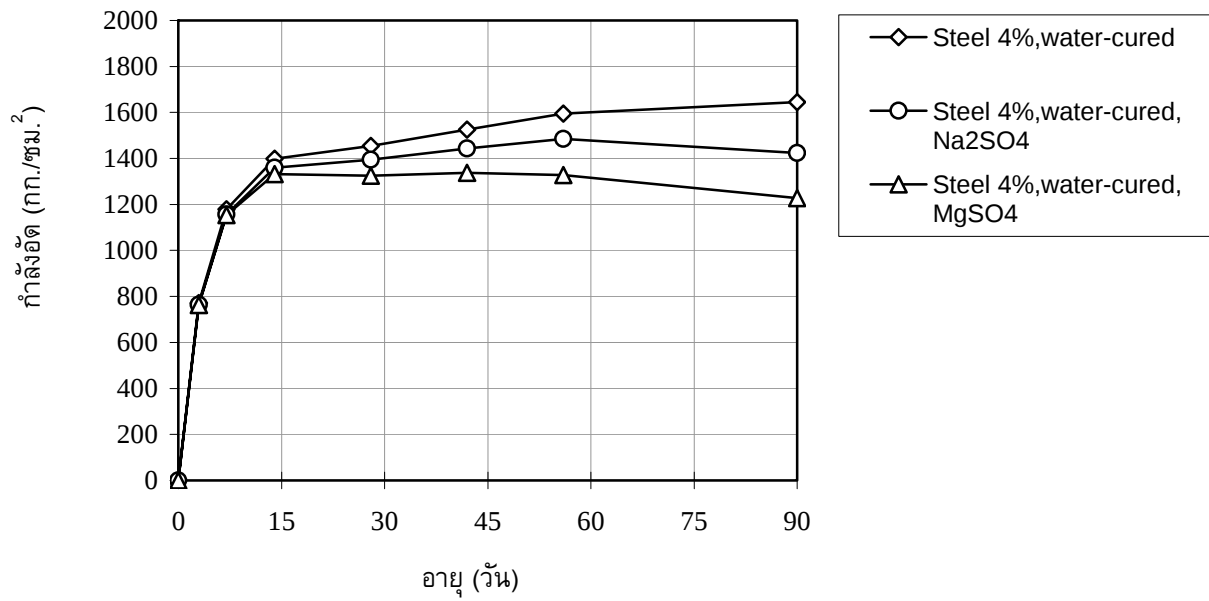


(ก) เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟต

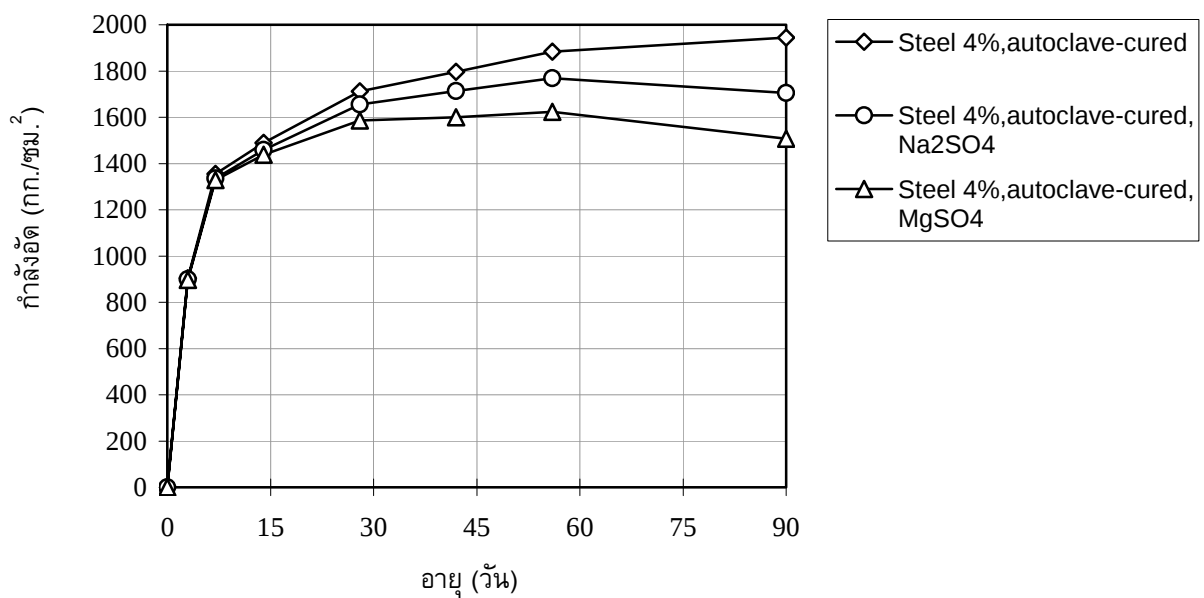
ภาพที่ 4.22 การขยายตัวของ RPC

4.5.8.2 การสูญเสียกำลังอัดและน้ำหนักเนื่องจากสารละลายซิลเฟต

ผลการทดสอบการพัฒนากำลังอัดของ RPC แช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซิลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แสดงในภาพที่ 4.23 พบว่า RPC ที่ผ่านการบ่มในน้ำและบ่มด้วยออโตเคิร์ฟมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วง 28 วันแรกของการแช่ในสารละลาย ในขณะที่ในช่วงหลังจาก 28 วัน ไปจนถึงที่อายุ 90 วัน RPC ซึ่งการแช่ในน้ำและสารละลายโซเดียมซิลเฟต มีอัตราของเพิ่มขึ้นของกำลังที่ลดลง ส่วนตัวอย่าง RPC ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟตมีกำลังที่ลดลงเล็กน้อย ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับน้ำหนักที่สูญเสียไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 4.24 ส่วน RPC ซึ่งผ่านการบ่มด้วยวิธีออโตเคิร์ฟ เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซิลเฟตมีผลทำให้กำลังลดลงหลังจากอายุ 56 วัน ซึ่งหมายถึงมีกำลังอัดที่สูญเสียไปบางส่วนเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของแมกนีเซียมซิลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะได้ยิปซัมและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายลดลงเกิดความไม่เสถียรของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและเอ็ททริงไกท์ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดการแตกตัวเพื่อให้ค่าความเป็นกรดต่างสูงขึ้นได้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์และไอออนของซิลิกอน สำหรับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายซิลิกอน ได้เป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งไม่มีสมบัติในการเชื่อมประสาน แต่เมื่อในส่วนผสมของ RPC มีซิลิกาฟุ่มเป็นส่วนประกอบทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกซึ่งเป็นการลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้สารตั้งต้นที่จะทำให้เกิดการกระจายของแมกนีเซียมซิลเฟตลดลง นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดที่สูงหมายถึงค่าความพรุนที่ลดลงตามไปด้วยทำให้ไอออนของซิลเฟตยิ่งกระทำกับโครงสร้างของ RPC ได้น้อยลง และยิ่งลดมากขึ้นเมื่อ RPC บ่มด้วยออโตเคิร์ฟ

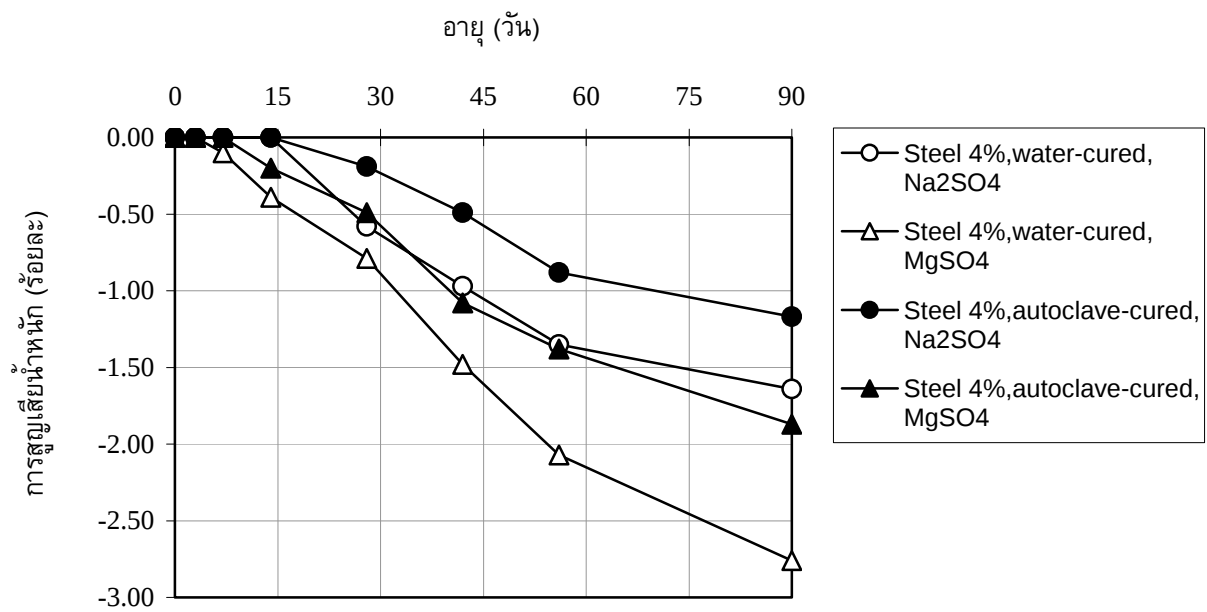


(ก) RCP ที่ผ่านการบ่มในน้ำ

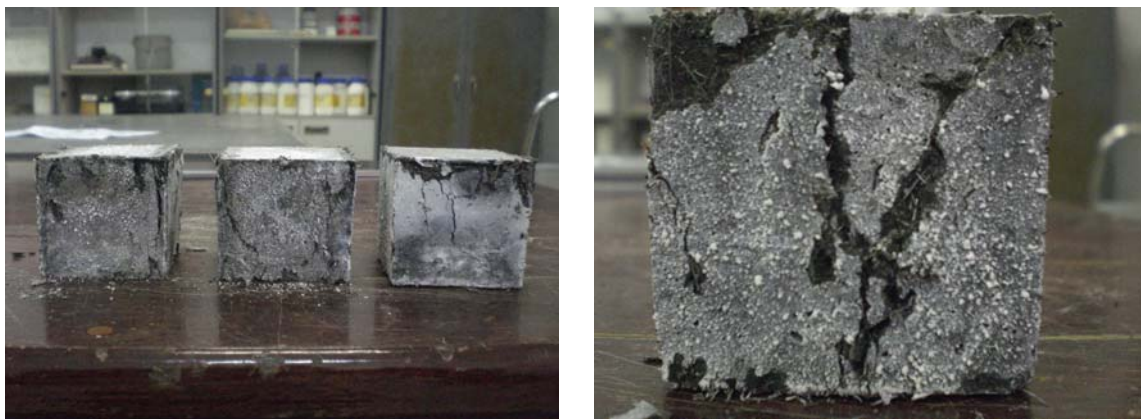


(ข) RCP ที่ผ่านการบ่มด้วยออโตเคลฟ

ภาพที่ 4.23 การพัฒนากำลังอัดของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคลฟเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



ภาพที่ 4.24 การสูญเสียน้ำหนักของ RPC ภายใต้การบ่มในน้ำและออโตเคลฟเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



ภาพที่ 4.25 การสูญเสียกำลังอัดจากสารละลายซัลเฟต



ภาพที่ 4.26 การสูญเสียน้ำหนักจากสารละลายซัลเฟต

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

จากผลการวิจัยที่ได้พัฒนา Reactive Powder Concrete หรือ RPC ให้มีกำลังอัดสูงสุดซึ่งไม่น้อยกว่า 1,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ภายใต้อัตราการการไหลแผ่ที่ไม่น้อยกว่าร้อยละ 110 $\pm$ 5 จากการทดสอบอัตราการไหลแผ่ (Flow Table) เพื่อให้มีความสามารถในการเทได้ ซึ่งจากการวิจัยจึงได้ส่วนผสมที่มีคุณสมบัติดังกล่าว คือส่วนผสม 1-232505-0840 ซึ่งประกอบด้วยอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ 0.23 สารลดน้ำร้อยละ 2.5 ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 5 ผสมรวมกับทรายละเอียดที่มีขนาดระหว่าง 300 – 600 ไมโครเมตร ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายละเอียดเท่ากับ 1:0.8 และปริมาณเส้นใยเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 มิลลิเมตรยาว 13 มิลลิเมตร ร้อยละ 4 โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ ซึ่งมีกำลังอัดเท่ากับ 1,601 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ในช่วงอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.23 การเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่มเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นจะต้องพิจารณาใช้ปริมาณสารลดน้ำอย่างเหมาะสม ปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เพิ่มขึ้นไม่อาจช่วยในการเพิ่มกำลังอัด หากผสมรวมกับปริมาณสารลดน้ำที่ไม่เหมาะสม ปริมาณสารลดน้ำในอัตราส่วนร้อยละ 2.00 เป็นปริมาณที่เหมาะสมกับการใช้ร่วมกับซิลิกาฟุ่ม การเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่มแสดงให้เห็นถึงกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ 0.23 ปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 2.00 ผสมรวมกับ ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 5 , 10 และ 15 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 846 , 890 และ 940 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 5 ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 5

5.1.2 ส่วนผสม Ultra High Strength Concrete (UHPC) ที่มีปริมาณทรายละเอียดเพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัดของ HSM มีแนวโน้มที่สูงขึ้นจน UHPC มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:1 ในส่วนผสม โดยมีอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.23 สารลดน้ำร้อยละ 2.5 และซิลิกาฟุ่มร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ (1-232505-10) มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 1,320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่ HSM ที่มีความสามารถในการทำงานที่ผ่านการทดสอบค่าการไหลแผ่ในช่วงร้อยละ 110 $\pm$ 5 เป็นส่วนผสมที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 โดยส่วนผสมอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.23 สารลดน้ำ ร้อยละ 2.5 และซิลิกาฟุ่มร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ (1-232505-08) มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 1,248 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

5.1.3 Reactive Powder Concrete (RPC) มีกำลังอัด กำลังดึง กำลังดัด โมดูลัสยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสความเหนียว เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยเหล็ก โดย RPC ที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 4.0 โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ มีอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8

สามารถพัฒนากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน ได้ถึง 1,601 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กำลังดึงเท่ากับ 250 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โมดูลัสแตกร้าวเท่า 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 440,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่าโมดูลัสความเหนียวเท่ากับ 5.00 กิโลกรัม-เมตร

5.1.4 Reactive Powder Concrete (RPC) ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.23 ปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 2.5 ปริมาณซิลิกาฟูมร้อยละ 5 อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 และ ปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 4.0 โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ (1-232505-0840) ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดถึง 1,601 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติของ RPC ภายใต้การบ่ม 2 ชนิด ได้แก่ การบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และการบ่มด้วยอโตเคลฟที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1.7 เมกะปาสกาล เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และนำมาบ่มต่อในน้ำจนครบอายุที่จะทำการทดสอบ พบว่า การพัฒนากำลังอัดของ RPC เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งสองชนิดการบ่ม โดยที่อายุ 91 วัน RPC มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 1,752 และ 2,159 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับการบ่มในน้ำและบ่มด้วยอโตเคลฟตามลำดับ

5.1.5 ค่าการหดตัวแบบแห้งและแบบอโตจีเนียสของ RPC ที่ผ่านการบ่มในน้ำและอโตเคลฟมีลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ อัตราการหดตัวแบบแห้งจะมีค่าสูงในช่วงแรก (56 วันแรก) จากนั้นมีอัตราการหดตัวแบบแห้งและแบบอโตจีเนียสเริ่มมีแนวโน้มลดลง

5.1.6 Reactive Powder Concrete (RPC) ที่ผ่านการบ่มอโตเคลฟมีค่าการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตน้อยกว่า RPC ที่ผ่านบ่มด้วยน้ำ ในขณะที่การสูญเสียกำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนักของ RPC ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการสูญเสียมากกว่าตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตทั้งการบ่มด้วยอโตเคลฟ และบ่มใน น้ำ ด้านกำลังอัดเริ่มสูญเสียกำลังเมื่อแช่ในสารละลายในช่วง 56 วันแรก และมีแนวโน้มการสูญเสียกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และการสูญเสียน้ำหนัก RPC ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการสูญเสียมากกว่าการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเช่นกันทั้งนี้ผลการทดสอบที่ได้ยังคงอยู่ในช่วงระยะเวลา 90 วัน หากพิจารณาถึงความทนทานของ RPC ต่อสารละลายซัลเฟตจะต้องพิจารณาผลการทดสอบในระยะยาวประกอบต่อไป

บรรณานุกรม

- Collepardi S., L. Coppola, R. Troli e M. Collepardi, "Mechanical, Properties of Modified Reactive Powder Concrete", Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on "Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete", SP-173, pp. 1-21, (1997).
- Collepardi S., R. Troli, S. Monosi and O. Favoni, L'Influenza del tipo di fibre sulle prestazioni di conglomerati tipo RPC / The Influence of the Fiber Type on the Performance of RPC Industria Italiana del Cemento, n. 786, April 2003.
- Collepardi S., S.Monosi, G. Pignoloni, R. Troli and M. Collepardi, Modified Reactive Powder Concrete with Artificial Aggregate, Proceedings of Sixth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Nice, France, 10-13 October 2000, pp. 447 - 459.
- Coppola L., R. Troli, A. Borsoi, P. Zaffaroni and M. Collepardi, "Influence of Superplasticizer Type on the Compressive Strength of RPM", Proceedings of Fifth CANMET/ACI International Conference on "Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete", Roma, 7-10 Ottobre (1997), SP 173, pp. 512-536.
- Coppola L., R. Troli, S. Collepardi, A. Borsoi, T. Cerulli, M. Collepardi, "Materiali Cementizi Innovativi: dagli HPC verso gli RPC. Parte II. L'Influenza del Cemento e del Fumo di Silice sulla Resistenza Meccanica del Reactive Powder Concrete/Innovative Cementitious Materials: from HPC to RPC. Part II. The Effect of Cementi and Silica Fume Type on the Compressive Strength of Reactive Powder Concrete", L'Industria Italiana del Cemento, 707, pp. 112-125, Roma (1996).
- Coppola L., T. Cerulli, R. Troli, M. Collepardi, "The Influence of Raw Materials on Performance of Reactive Powder Concrete", Proceedings of Internationa Conference on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures, Florianopolis, Brasil, pp. 502-503, 5-7 Giugno (1996).

Hill J.,B.R. Whittle, J.H. Sharp and M. Hayes, Effect of Elevated Curing Temperature on Early
Hidration and Microstructure of Composite Cements, University of Sheffield, 2002

Jian Xinma and Holger Schneider, "Properties of Ultra High Strength Concrete", Lacer No.7
2002.

Jin Wen-yu, An Ming-zhe, Yan Gui-ping and Wang Jun-min, "Study on reactive powder
concrete used in sidewalk system of the Qinghai-Tibet railway bridge", International
Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing China,
May 2004

Kumar Mehta P., "Advancement in Concrete Technology", Concrete International, June 1999.

Piere Y.Blais and Marco Couture, "Precast, Prestressed Pedestrian Bridge – Wolrd's First
Reactive Powder Concrete Structure", PCI Journal September-October 1999

Richard, P. and Cheyrezy, M.H. "Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800
MPa Compressive Strength", Concrete Technology: Past, Present, and Future,
Proceedings of the V. Mohan Malhotra Symposium, ACI SP-144, S. Francisco 1994,
pp. 507-518. Editor: P.K. Mehta.

สมภพสุวรรณกวิน, "ผลกระทบของซิลิกาฟุ่มในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต
สมรรถนะสูง "วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา,
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2539

การพัฒนา Ultra High Strength Mortar: อิทธิพลของปริมาณเส้นใยเหล็กและมวลรวมละเอียด

เอกพล บุญมาเลิศ (Ekkapol Boonmalert)¹

บุรฉัตร จิตรวีระ (Burachat Chatveera)²

ณัฐ มากุล (Natt Makul)³

¹นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Email address: ce23561@hotmail.com

²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Email address: cburacha@engr.tu.ac.th

³อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

Email address: shinomomo7@hotmail.com

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยเหล็กและมวลรวมละเอียดที่มีต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์กำลังอัดสูง โดยเริ่มต้นจากการหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมและพัฒนาไปใช้เป็นมอร์ตาร์ซึ่งควบคุมค่าการไหลได้ในช่วงร้อยละ 110 $\pm$ 5 ตัวแปรที่ใช้คือ ปริมาณเส้นใยเหล็กที่ร้อยละ 0.5 ถึง 4.0 โดยปริมาตรวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซิลิกาฟูม) และอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำคัดขนาด 0.15 - 0.60 มม) ที่ร้อยละ 0.2 ถึง 1.2 โดยปริมาตร จากผลการทดสอบ พบว่าสัดส่วนของส่วนผสมที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) : ซิลิกาฟูม : สารลดน้ำอย่างแรง ร้อยละโดยน้ำหนักวัสดุประสาน เท่ากับ 0.23 : 5 : 2.5 โดยมีมอร์ตาร์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของมวลรวมละเอียดที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่อายุ 28 วันของมอร์ตาร์ซึ่งมีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 1 คือ 1320 กก/ซม² จากนั้นกำลังอัดมีค่าลดลงในขณะที่กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเส้นใยเหล็ก โดยเฉพาะที่ปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 4.0 และมีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 โดยปริมาตรวัสดุประสาน มอร์ตาร์สามารถพัฒนากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน ได้ถึง 1601 กก/ซม²

Abstract: The objective of this research was to investigate the influences of steel fiber and fine aggregate content upon the compressive strength of ultra high strength mortar. Starting from the mix proportion of cement paste was optimized and then developed to use as the mortar proportion which was controlled the specific flow value at 110% $\pm$ 5%. The studied parametric were steel fiber contents from 0% to 0.4% by volume of binder materials (Type I Portland cement and condensed silica fume) and binder materials-to-fine aggregate (graded river sand ratio in the range of 0.15 to 0.0 mm) ratio from 0.2% to 1.2% by volume. From the test results, it was found that the optimal mix proportion of the paste of binder materials (w/b): condensed silica fume : graded river sand was 0.23 : 5 : 2.5. The compressive strengths of mortars increased as graded river sand content increased and highest strength at 28 days of mortar with having a binder materials-to-fine aggregate of 1 : 1 was 1320 kg/cm², after that it was then decreased. Whereas the compressive strength mortar was also increased as steel fiber content increased. In particular, at the steel fiber content of 4 % and the binding materials-to-fine aggregate of 1 : 0.8, the mortar can develop the compressive strength at the age of 28 days up to 1601 kg/cm².

KEYWORDS: Graded river sand, Compressive strength, Steel fiber, Ultra high strength mortar.

1. บทนำ

ในช่วงหลาย ๆ ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาที่มุ่งเป้าไปที่เทคนิคในการผลิตคอนกรีตที่มีกำลังสูงมาก (Ultra High Strength Concrete (UHSC) ซึ่งโดยสรุปมีด้วยกัน 2 เทคนิคหลักๆ กล่าวคือ เทคนิคแรกเกี่ยวข้องกับการทำให้อนุภาคที่เป็นส่วนประกอบของเฟส (Paste หรือ Matrix phase) เกิดการอัดแน่นสูงสุดด้วยการใช้สารลดน้ำอย่างแรงและซิลิกาฟุ่มร่วมกับมวลรวมที่มีระดับความแข็งที่สูงมาก อาทิเช่น บอกไซต์ที่ผ่านการเผา (Calcinated bauxite) หรือแกราไนต์ (Granite) [1] ส่วนเทคนิคที่สองเป็นการเป็นลดข้อต่อของเฟสด้วยวัสดุจำพวกโพลิเมอร์ (Defect-free polymer) [2] ซึ่งจะได้ เนื้อเฟสที่สามารถรับกำลังดึงได้สูงมาก (มากกว่า 1500 กก/ซม^2) โดยเฉพาะเมื่อผสมกับอะลูมินาซีเมนต์ จนกระทั่งในช่วงปลายทศวรรษที่ 90 ได้มีงานวิจัยของ Richard et al. [3,4] และ M. Behloul et al. [5] ที่คิดค้นคอนกรีตประเภท Reactive Powder Concrete (RPC) ที่มีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง $2000-8000 \text{ กก/ซม}^2$ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสนใจในการใช้วัสดุเติมแทรกขนาดเล็ก (Microfillers) เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของวัสดุซีเมนต์ร่วมกับประสิทธิภาพของสารลดน้ำอย่างแรง โดยวัสดุเติมแทรกนี้จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นจากการอัดแน่นของอนุภาค (Particle packing density) ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทั้งในสถานะสดและที่แข็งตัวแล้วให้ดีขึ้นอย่างมาก [6,7] แต่อย่างไรก็ตาม วัสดุเติมแทรกและสารเคมีผสมเพิ่มนี้ยังมีราคาสูงอันจะส่งผลต่อราคาคอนกรีตที่สูงขึ้น

ดังนั้นการศึกษาคความสัมพันธ์ของอิทธิพลที่กระทบกับสมบัติของคอนกรีตในระดับที่มีการใช้งานในปัจจุบันจึงเป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยเหล็กและมวลรวมละเอียดที่มีต่อกำลังอัดมอร์ตาร์กำลังอัดสูงในช่วงกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ไม่ต่ำ 1200 กก/ซม^2 เพื่อประเมินสัดส่วนผสมที่เหมาะสมทั้งสมบัติ

ด้านกำลังอัดและสามารถใช้งานได้จริง ในที่นี้ยึดค่าการไหลแผ่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5 เป็นหลัก

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุ

1. ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 [8] มีองค์ประกอบเคมีดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

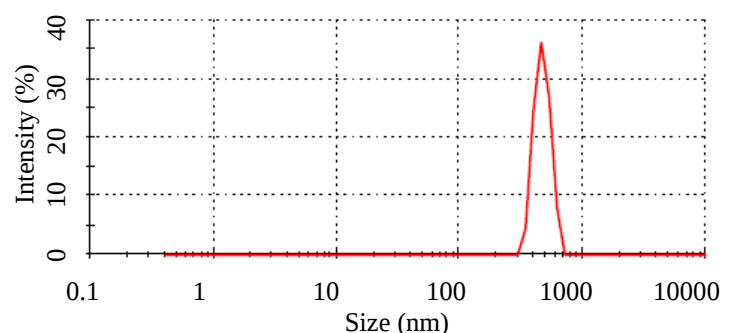
องค์ประกอบเคมี	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)	20.34	4.95	3.26	64.78	1.43	0.45	0.17

2. มวลรวม เป็นทรายแม่น้ำคัดขนาดที่มีขนาดอนุภาคในช่วงระหว่าง $0.15-0.60 \text{ มม.}$ หรืออนุภาคทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้างบนตะแกรงเบอร์ 100

3. ซิลิกาฟุ่มมีสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C1240 [9] มีลักษณะสีเทาอมขาว มีความถ่วงจำเพาะ 2.25 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และมีการกระจายขนาดผลแสดงในรูปที่ 1

4. น้ำยาลดน้ำยิ่งยวด (Polycarboxylate-based superplasticizer) [10]

5. เส้นใยเหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.16 มม ยาว 13 มม มีกำลังดึงสูงสุด 20000 กก/ซม^2



รูปที่ 1 การกระจายขนาดผลของซิลิกาฟุ่ม

2.2 ขอบเขตของการศึกษา

ขอบเขตของสัดส่วนผสมที่ใช้คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และซิลิกาฟุ่ม) เท่ากับ

0.23 ปริมาณสารลดน้ำตอปูนซีเมนต์ร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ปริมาณซิลิกาฟูมร้อยละ 5 ถึง 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สัดส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดอยู่ในช่วง 1 : 0.2 ถึง 1 : 1.2 และปริมาณเส้นใยเหล็กที่ร้อยละ 0.5 ถึง 4.0 โดยปริมาตรวัสดุประสาน

2.3 การผสมและการอัดแน่น

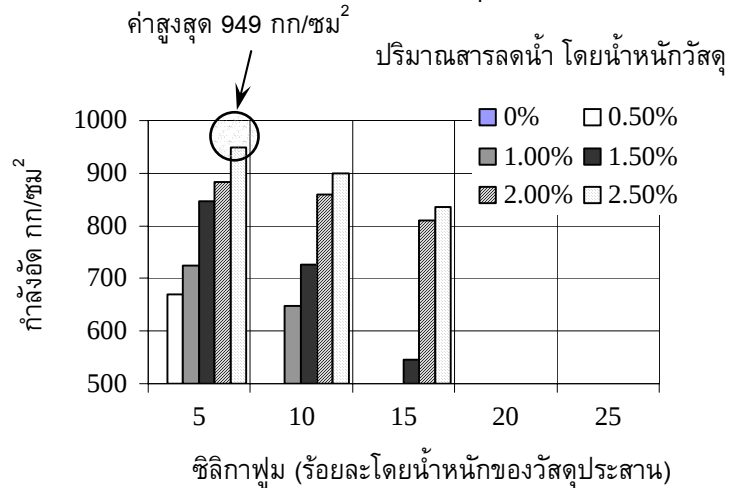
ตัวอย่างทดสอบตามขอบเขตข้างต้นผสมถูกผสมตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C305 [11] หลังจากผสมจึงนำเพสต์และมอร์ตาร์ใส่แบบหล่อขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม.³ และการอัดแน่นตามมาตรฐาน ASTM C109 [12] จากนั้นหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและปล่อยให้ตัวอย่างแข็งตัวแล้วถอดแบบที่อายุ $24 \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มน้ำที่อุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส และทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 [12] ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ

3. ผลการทดสอบ

3.1 ปริมาณซิลิกาฟูมและสารลดน้ำที่มีต่อกำลังอัดของเพสต์กำลังสูง

รูปที่ 2 แสดงกำลังอัดของเพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูม) (w/b) เท่ากับ 0.23 พบว่าปริมาณซิลิกาฟูมร้อยละ 5 ส่วนผสมที่ใช้สารลดน้ำอย่างแรงตั้งแต่ร้อยละ 0.5 สามารถผสมส่วนผสมเข้ากันได้และเมื่อปริมาณสารลดน้ำมากขึ้น กำลังอัดของเพสต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการทดลองนี้ปริมาณสารลดน้ำที่ใช้สูงสุดที่ร้อยละ 2.5 ซึ่งมีผลทำให้เพสต์สามารถพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ได้สูงสุดเท่ากับ 949 กก./ซม^2 ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณซิลิกาฟูมร้อยละ 15 และมีสารลดน้ำอย่างแรงเท่ากันมีกำลังอัดเท่ากับ 836 กก./ซม^2 จากการเพิ่มปริมาณ ซิลิกาฟูมแสดงให้เห็นว่าปริมาณซิลิกาฟูมที่เพิ่มขึ้นไม่ ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นอันน่าจะเป็นผลมาจากปริมาณความชื้นที่ใช้ในการทำละลายซิลิโคนไดออกไซด์และปริมาณแคลเซียม

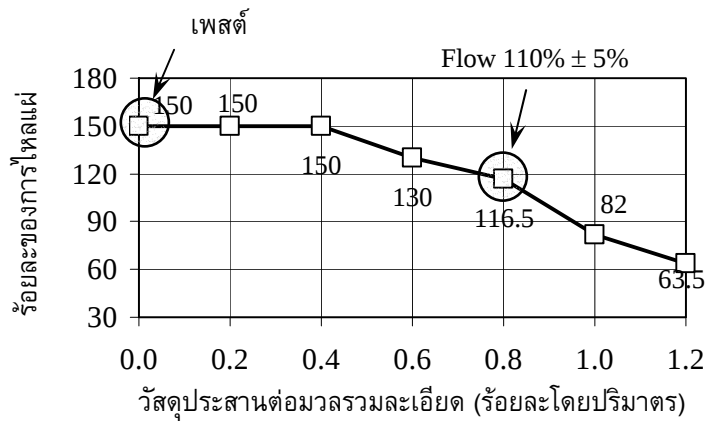
ไฮดรอกไซด์ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ดังนั้นปริมาณสารลดน้ำที่อัตราส่วนร้อยละ 2.5 เป็นปริมาณที่เหมาะสมกับการใช้ร่วมกับซิลิกาฟูมในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก วัสดุประสาน



รูปที่ 2 กำลังอัดของเพสต์ที่อายุ 28 วัน ส่วนที่ไม่แสดงค่ากำลัง คือส่วนผสมที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้

3.2 ปริมาณของทรายละเอียดที่มีผลต่อการไหลแผ่

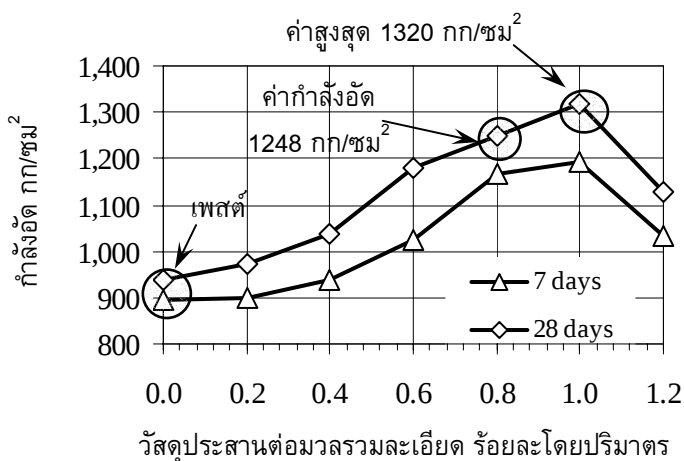
รูปที่ 3 แสดงค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่พัฒนาจากเพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.23 ปริมาณซิลิกาฟูมร้อยละ 5 และใช้สารลดน้ำตั้งแต่ร้อยละ 0.5 พบว่ามอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่ลดลงตามปริมาณทรายละเอียดที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของทรายละเอียดในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยปริมาตรของวัสดุประสานส่งผลให้อัตราการไหลแผ่ลดลงประมาณร้อยละ 15 โดยยึดตามเกณฑ์ค่าการไหลแผ่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่อยู่ในช่วงดังกล่าวคือมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8



รูปที่ 3 อัตราไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดต่างๆ

3.3 ปริมาณทรายละเอียดที่มีผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

รูปที่ 4 แสดงกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่สัดส่วนผสมซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.23 มีปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงเท่ากับร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ นำมาผสมร่วมกับทรายละเอียดในอัตราส่วนต่างๆ พบว่ามอร์ตาร์ที่มีค่าการไหลแผ่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5 คือ มอร์ตาร์ที่มีสัดส่วนของวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 1 โดยปริมาตร โดยมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 1320 กก/ซม^2



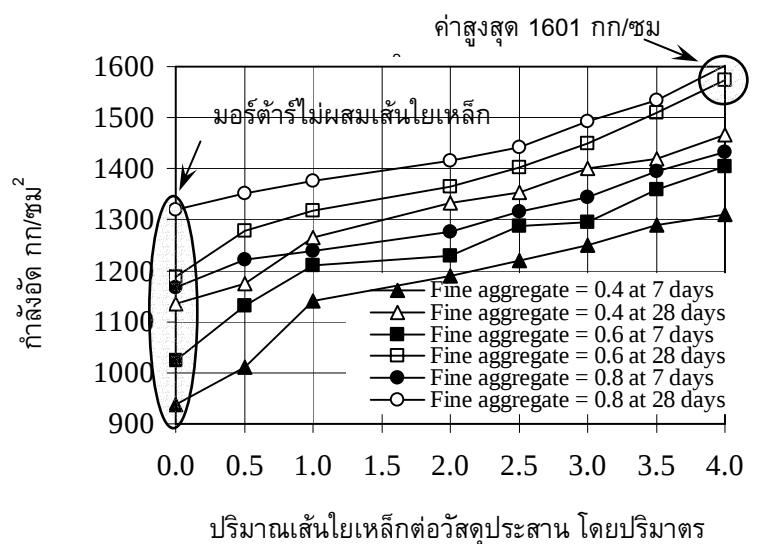
รูปที่ 4 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 และ 28 วัน

จากผลการทดสอบทั้งค่าการไหลแผ่และกำลังอัดของมอร์ตาร์ได้ข้อสรุปของส่วนผสมที่จะถูก

พัฒนาไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลรวมปริมาณเส้นใยเหล็กและทรายละเอียดที่มีผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ต่อไป โดยใช้ความสามารถในการทำงานได้ผ่านค่าการไหลแผ่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5 มอร์ตาร์จะต้องมีค่าอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8

3.4 อิทธิพลรวมของปริมาณเส้นใยเหล็กและทรายละเอียดที่มีผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

รูปที่ 5 แสดงกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 และ 28 วัน โดยมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 นอกจากนั้นในการศึกษานี้ได้ขยายอัตราส่วนของวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดที่ 1 : 0.6 และ 1 : 0.4 เพิ่มเติม พบว่ามอร์ตาร์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเส้นใยเหล็ก โดยมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 ที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 4.0 โดยปริมาตรวัสดุประสาน สามารถพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงสุดได้ถึง 1601 กก/ซม^2



รูปที่ 5 กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยเหล็กที่อายุ 7 และ 28 วัน

สำหรับมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดที่ 1 : 0.6 และปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 4.0 โดยวัสดุประสาน มีการพัฒนากำลังอัดไปถึง 1574 กก/ซม^2 ซึ่งต่ำกว่าที่อัตราส่วน 1 : 0.8

ในขณะที่มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดที่ 1 : 0.4 มีค่าเท่ากับ 1467 กก/ชม² ตามปริมาณน้ำอิสระ (Free water) ที่มีในส่วนผสมที่มีมากขึ้นเมื่อปริมาณมวลรวมละเอียดมีปริมาณลดลง

จากผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยเหล็กสามารถหาความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับร้อยละของเส้นใยเหล็ก โดยปริมาตรดังแสดงในสมการที่ (1) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ดังแสดงในตารางที่ 2

$$f_{t(days)} = \frac{a}{(1 + \exp^{b-cx})^{\frac{1}{d}}} \quad (1)$$

เมื่อ $f_{t(days)}$ คือ กำลังอัดของมอร์ตาร์ (อายุ (วัน))

ρ_{steel} คือ ร้อยละของเส้นใยเหล็ก โดยปริมาตร วัสดุประสาน

a, b, c และ d คือ ค่าสัมประสิทธิ์ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ ตามสมการที่ (1)

อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.4					
ที่อายุ (วัน)	ค่าสัมประสิทธิ์				r
	a	b	c	d	
7	1332.95	-0.80	0.67	1.07	0.99
28	1555.26	1.01	0.53	4.22	0.99
อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.6					
ที่อายุ (วัน)	ค่าสัมประสิทธิ์				r
	a	b	c	d	
7	1557.68	-1.84	0.31	0.38	0.98
28	2472.13	17.87	1.57	25.12	0.99
อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8					
ที่อายุ (วัน)	ค่าสัมประสิทธิ์				r
	a	b	c	d	
7	2061.10	20.48	1.74	36.46	0.99
28	2374.36	19.68	1.50	33.09	0.99

หมายเหตุ r คือสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

4. สรุปผล

4.1 ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่สามารถใช้เพื่อพัฒนาต่อให้ได้ส่วนผสม UHPC ที่มีกำลังอัดสูงสุดภายใต้การควบคุมค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ได้แก่

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูม) เท่ากับร้อยละ 0.23 สารลดน้ำร้อยละ 2.5 และซิลิกาฟูมร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

4.2 ปริมาณทรายละเอียดเพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มที่สูงขึ้นจนถึงมอร์ตาร์มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:1 โดยมีค่ากำลังอัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1320 กก/ชม² แต่มอร์ตาร์ที่มีความสามารถในการทำงานได้ผ่านการทดสอบค่าการไหลแผ่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5 จะต้องมียุทธศาสตร์วัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 โดยมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 1248 กก/ชม²

4.3 มอร์ตาร์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยเหล็ก โดยมอร์ตาร์ที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 4.0 โดยปริมาตรวัสดุประสานมีอัตราส่วนของวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 สามารถพัฒนากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน ได้ถึง 1601 กก/ชม²

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ตามสัญญาเลขที่ RDG5350003 บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทุนวิจัยเพิ่มเติมและการทดสอบหาค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์และสมบัติเชิงกายภาพของวัสดุงานวิจัย สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] H.H. Bache, 1981. Densified cement ultrafine particle-based materials. 2nd International Conference on Superplasticizers in Concrete, Ottawa, June 10-12.
- [2] N.M. Alford, G.W. Groves, D.D. Double, 1982. Physical properties of high strength cement pastes. Cement and Concrete Research, 12 (3): 349-358.

- [3] P. Richard, M. Cheyrezy, 1995. Composition of reactive powder concrete, Cement and Concrete Research, 25 (7): 1501-1511.
- [4] P. Richard, 1996. Reactive powder concrete: A new ultra-high strength cementitious materials, 4th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Paris, pp. 1343-1349.
- [5] M. Behloul, G. Bernier, M. Cheyrezy, 1996. Tensile behavior of reactive powder concrete (RPC), 4th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Paris, pp. 1343-1349.
- [6] P. Kumar Mehta, 1999. Advancements in concrete technology, Concrete International, pp. 69-76 (June).
- [7] P.C. Aitcin, A. Neville, 1993. High performance concrete demystified, Concrete International, pp. 21-26 (January).
- [8] American Society for Testing Materials, 2008. ASTM C150/C150M-09 Standard Specification for Portland Cement. Annual Book of ASTM Standard Vol.4.01, Philadelphia, PA, USA.
- [9] American Society for Testing Materials, 2008. ASTM C1240-05 Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures. Annual Book of ASTM Standard Vol.4.02, Philadelphia, PA, USA.
- [10] American Society for Testing Materials, 2008. ASTM C494/C494M-10 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. Annual Book of ASTM Standard Vol.4.02, Philadelphia, PA, USA.
- [11] American Society for Testing Materials, 2008. ASTM C305-06 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. Annual Book of ASTM Standard Vol.4.01, Philadelphia, PA, USA.
- [12] American Society for Testing Materials, 2008. ASTM C109/C109M-08 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). Annual Book of ASTM Standard Vol.4.01, Philadelphia, PA, USA.