



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนา Reactive Powder Concrete

โดย รองศาสตราจารย์ ดร. บุรฉัตร นัตรวีระ และคณะ

สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สิงหาคม 2549



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนา Reactive Powder Concrete

โดย รองศาสตราจารย์ ดร. บุรฉัตร นัฏฐวิระ และคณะ

สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สิงหาคม 2549

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนา Reactive Powder Concrete

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|---|-----------------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร. บุรฉัตร นิตริวัระ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 2. นายรัชชัย คงศักดิ์ตระกูล | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |

ชุดโครงการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

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

คำนำ

รายงานฉบับสมบูรณ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอสรุปผลการศึกษาดังแต่ (1 ธันวาคม พ.ศ. 2547 ถึง 30 มิถุนายน พ.ศ. 2549) ของโครงการ “การพัฒนา Reactive Powder Concrete” ตามสัญญาเลขที่ RDG4850044 ซึ่งได้รับการสนับสนุนทุนในการทำวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ในชุดโครงการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรมและบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) โดยมีนายธวัชชัย คงศักดิ์ตระกูล นักศึกษาผู้ปฏิบัติการวิจัย ซึ่งปัจจุบันได้เสียชีวิต ข้าพเจ้าในนามของอาจารย์ขอไว้อาลัยอย่างสุดซึ้งในการจากไปดังกล่าว

อนึ่งในรายงานฉบับนี้ประกอบด้วย 4 ส่วนหลักคือ ข้อมูลของโครงการ กระบวนการวิจัย สรุปผลการวิจัย และสรุปผลการวิจัยของโครงการ

บุรฉัตร ฉัตรวีระ

สิงหาคม 2549

Executive Summary

ด้วยตระหนักถึงการพัฒนาคุณภาพของปูนซีเมนต์และคอนกรีตเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่องเพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติทั้งเชิงกลใกล้เคียงกับเหล็กมากที่สุด และปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความคงทนให้สูงขึ้น โดยจากการพัฒนาให้กำลังของคอนกรีตมีการพัฒนาทั้งระยะต้นและช่วงปลายสูงขึ้นมีส่วนช่วยลดขนาดและน้ำหนักของโครงสร้างคอนกรีตลง หนึ่งในนวัตกรรมสมัยใหม่ที่มีหลักการดังกล่าวข้างต้นคือ การพัฒนา Reactive Powder Concrete ซึ่งช่วยสร้างองค์ความรู้เพื่อนำไปใช้ในการผลิต Reactive Powder Concrete ในภาคอุตสาหกรรมจริง และเป็นพื้นฐานความรู้เพื่อใช้ศึกษาและพัฒนาต่อไปในอนาคต

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

จากการศึกษาสรุปได้ว่า ปริมาณสารลดน้ำที่ให้ค่ากำลังอัดที่ 28 สูงสุด มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 5 ถึง 6 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เหมาะสมในการผลิต UHPC อยู่ที่ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ค่าอัตราส่วนของซีเมนต์เฟสต่อช่องว่างของมวลรวมต่ำสุด (γ) ที่เหมาะสมในการผลิต RPC มีค่า 240 เมื่อใช้งานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการออกแบบและพัฒนาคอนกรีตชนิด Reactive Powder โดยคุณสมบัติที่ทำการศึกษาประกอบด้วย คุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และความทนทานของ Reactive Powder Concrete คุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ความสามารถในการลดน้ำ และระยะเวลาการก่อตัว คุณสมบัติทางกลได้แก่ กำลังอัด กำลังดึง และกำลังดัดที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต และคุณสมบัติทางด้านความทนทานได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การยืดหดตัว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การหดตัวแบบบอโตจีเนียสและแห้ง ความสามารถในการซึมผ่านได้ของน้ำ และความทนทานต่อซัลเฟตและกรด

จากผลการทดสอบเบื้องต้น พบว่าปริมาณสารลดน้ำที่เหมาะสมในการผลิต Ultra High Performance Concrete (UHPC) ที่ทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันมีค่าสูงสุด อยู่ในช่วงร้อยละ 5 ถึง 6 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เหมาะสมในการผลิต UHPC อยู่ในช่วงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ นอกจากนั้นค่าอัตราส่วนของซีเมนต์เฟสต่อช่องว่างของมวลรวมต่ำสุด (γ) ที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตชนิด Reactive Powder Concrete (RPC) มีค่าเท่ากับ 240

Abstract

The objective of this research was to study the guidelines for design and developing of reactive powder concrete. The properties studied were physical, mechanical, and durability properties of reactive powder concrete. The physical properties were water reducing ability and setting time. The mechanical properties were compressive, tensile, and flexural strength at the ages of 1, 3, 7 and 28 days, and modulus of elasticity. Acid resistance, coefficient of shrinkage and/or expansion due to temperature change were also studied. The coefficient of expansion and/or contraction under temperature change, autogenous and drying shrinkage, water permeability, and sulfate and acid resistance were studied for the durability aspects.

From the preliminary test results, it was found that the optimal water reducing agent content for producing Ultra High Performance Concrete (UHPC) with the highest compressive strength of concrete at the age of 28 days was in the range of 5 – 6% by weight of cement. The suitable content of silica fume was 25% by weight of cement. Furthermore, the optimal ratio of cement paste-to-minimum void ratio (γ) for producing the Reactive Powder Concrete (RPC) was 240.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทนำ	(1)
Executive Summary	(2)
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
สารบัญ	(5)
สารบัญตาราง	(7)
สารบัญรูป	(10)
ส่วนที่ 1 ข้อมูลของโครงการ	(12)
ส่วนที่ 2 รายงานกระบวนการทำวิจัย	(13)
ส่วนที่ 3 สรุปผลการวิจัย	(14)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ข้อมูลพื้นฐาน	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	14
3.1 ปฏิกริยาไฮเดรชัน	14
3.2 ปฏิกริยาปอซโซลานิก	16
3.3 Dense Packing	16
3.4 Heat Curing	17
บทที่ 4 แผนการศึกษาและวิจัย	20
4.1 ขอบเขตของงานวิจัย	20
4.1.1 การพัฒนา UHPC	20

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.1.2 การพัฒนา RPC	21
4.2 ขั้นตอนและรายละเอียดวิธีการทดสอบ	22
4.2.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ	22
4.2.2 การพัฒนา UHPC และ RPC	23
บทที่ 5 ผลการวิจัยและสรุปผลการศึกษา	28
5.1 การศึกษาทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ RPC	28
5.2 คุณสมบัติของวัสดุ	28
5.3 การแบ่งกลุ่มการทดลองและสัญลักษณ์ของส่วนผสม	32
5.4 การผสม การทำคอนกรีตให้แน่น และการบ่มคอนกรีต	33
5.5 ผลของปริมาณซิลิกาฟูมและสารลดน้ำต่อระยะเวลาการก่อตัว	34
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา	84
บรรณานุกรม	

สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
2.1 สัดส่วนผสมของ RPC โดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์	5
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟุ่มที่ผ่านมาตรฐาน ASTM C1240 เทียบกับปูนซีเมนต์ 9	9
4.1 ลำดับขั้นตอนการพัฒนา RPC	20
4.2 การทดสอบวัสดุ	21
4.3 การทดสอบ UHPC	21
4.4 การพัฒนาและการทดสอบ RPC	22
4.5 รายละเอียดการพัฒนา UHPC	23
4.6 รายละเอียดการพัฒนา RPC 26	
5.1 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซิลิกาฟุ่ม Force 10,000D ที่ใช้ในการวิจัย	29
5.2 ขนาดผลของมวลรวมละเอียดก่อนคัดขนาด	30
5.3 สัดส่วนของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดลอง	31
5.4 ประเภทของซีเมนต์และผู้ผลิตซิลิกาฟุ่มและสารลดน้ำที่ใช้ในการวิจัย	32
5.6 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่สัดส่วนร้อยละซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ระหว่าง 0.15 - 0.35	35
5.7 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A23615	36
5.8 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A23620	37
5.9 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A23625	38
5.10 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A23630	39
5.11 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A23635	40
5.12 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1B23615	41
5.13 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1B23620	42
5.14 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1B23625	43
5.15 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1B23630	44
5.16 สรุปผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อดำของคอนกรีตที่สัดส่วนร้อยละของ ซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ค่าต่างๆ	45
5.17 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่สัดส่วนปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ ร้อยละ 4 – 12	47
5.18 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A23425	48
5.19 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A23625	49
5.20 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A23825	50
5.21 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A231025	51

สารบัญตาราง (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
5.22 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1B23625	52
5.23 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1B23825	53
5.24 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1B231025	54
5.25 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1B231225	55
5.26 สรุปผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อดำของคอนกรีตที่สัดส่วนร้อยละของ สารลดน้ำตื้อซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ค่าต่างๆ กัน	56
5.27 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.25 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 4	58
5.28 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.25 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 4	59
5.29 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.24 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 5	60
5.30 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.24 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 5	60
5.31 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.23 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 6	61
5.32 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.23 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 6	61
5.33 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.22 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 7	62
5.34 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.22 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 7	62
5.35 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.21 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 8	63
5.36 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.21 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 8	63
5.37 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต 1A ที่ปริมาณสารลดน้ำและ ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่างๆ กัน	64
5.38 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.25 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 4	65
5.39 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.25 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 4	65
5.40 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.24 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 5	66
5.41 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.24 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 5	66
5.42 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.23 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 6	67
5.43 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.23 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 6	67
5.44 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.22 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 7	68
5.45 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.22 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 7	68
5.46 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.21 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 8	69
5.47 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.21 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 8	69
5.48 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต 1B ที่ปริมาณสารลดน้ำและ ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่างๆ กัน	70
5.49 สัดส่วนผสมของ RPC และ UHPC	73

สารบัญตาราง (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
5.50 น้ำหนักของทรายที่ค่า γ ต่างๆ เมื่อทรายมีความหนาแน่นอัดแน่น = 0.6054	74
5.51 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 160	75
5.52 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 160	75
5.53 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 190	77
5.54 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 190	77
5.55 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 210	78
5.56 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 210	78
5.57 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 240	79
5.58 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 240	79
5.59 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 260	80
5.60 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 260	80
5.61 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่ 28 วันกับ γ ที่ w/c ต่างๆ	81
5.62 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลแผ่ (มม.) กับ w/c ที่ค่า γ ต่างๆ	82

สารบัญรูปประกอบ

เรื่อง	หน้า
2.1 หน้าตัดของคาน RPC อัดแรงเทียบกับคานเหล็กที่มีกำลังรับแรงดัดเท่าๆ กัน	6
2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างสะพานคนข้ามที่เมือง Sherbrooke ประเทศแคนาดา	7
3.1 แสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต	14
3.2 การใช้อุณหภูมิหลายขนาดเพื่อให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น	17
3.3 โครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตที่บ่มที่อุณหภูมิ 20 °C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง	18
3.4 โครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 90 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง	18
5.1 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ใช้ก่อนร่อน	31
5.2 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ผ่านการร่อนและนำมาใช้ในงานวิจัย	32
5.3 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1A23615	36
5.4 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1A23620	37
5.5 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1A23625	38
5.6 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1A23630	39
5.7 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1A23635	40
5.8 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1B23615	41
5.9 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1B23620	42
5.10 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1B23625	43
5.11 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1B23630	44
5.12 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนซิลิกาฟูมต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักต่อ ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	45
5.13 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1A23425	48
5.14 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1A23625	49
5.15 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1A23825	50
5.16 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1A231025	51
5.17 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1B23625	52
5.18 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1B23825	53
5.19 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1B231025	54
5.20 ระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วนผสม 1B231225	55
5.21 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนสารลดน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนัก กับระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	56
5.22 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.25 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 4	59

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
5.23 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.24 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 5	60
5.24 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.23 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 6	61
5.25 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.22 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 7	62
5.26 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.21 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 8	63
5.27 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต 1B ที่ปริมาณสารลดน้ำและ ปริมาณซิลิกาฟูมต่างๆ กัน	64
5.28 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.25 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 4	65
5.29 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.24 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 5	66
5.30 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.23 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 6	67
5.31 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.22 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 7	68
5.32 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.21 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 8	69
5.33 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต 1B ที่ปริมาณสารลดน้ำและปริมาณซิลิกาฟูมต่างๆ กัน	70
5.34 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 160	76
5.35 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 190	77
5.36 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 210	78
5.37 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 240	79
5.38 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 260	80
5.39 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่ 28 วันกับ γ ที่ w/c ต่างๆ	81
5.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลแผ่ (มม.) กับ w/c ที่ค่า γ ต่างๆ	82
5.41 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 3 ที่การบ่มแบบต่างๆ	83

ส่วนที่ 1
ข้อมูลของโครงการ

ชื่อโครงการ “การพัฒนา Reactive Powder Concrete” สัญญาเลขที่ RGD4850044

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัย	<u>รศ.ดร.บุรณัฏฐ์ นัทรวิระ</u>
นักศึกษาผู้ปฏิบัติงานวิจัย	<u>นายธวัชชัย คงศักดิ์ตระกูล</u>
โครงการเริ่มเมื่อวันที่	<u>1 ธันวาคม พ.ศ. 2547</u>
โครงการสิ้นสุดเมื่อวันที่	<u>30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2548</u>
รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2	<u>1 มิถุนายน พ.ศ. 2548 ถึง 30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2548</u>
ขยายเวลาครั้งที่ 1	<u>1 ธันวาคม พ.ศ. 2548 ถึง 30 มิถุนายน พ.ศ. 2549</u>
รวมเวลาที่ทำวิจัยทั้งสิ้น	<u>19 เดือน</u>

ส่วนที่ 2

รายงานกระบวนการทำวิจัย

1. ในรอบ 7 เดือน ที่ผ่านมาท่านได้

- ☒ ติดต่อทางโทรศัพท์ / โทรสาร กับ user 4 ครั้ง
- ☐ ประชุมร่วมกับ user 0 ครั้ง
เมื่อวันที่
- ☐ ไปพบ user ณ สถานที่_ครั้ง
เมื่อวันที่
- ☒ ติดต่อ สกว. หรือ สปว. 0 ครั้ง
ประชุมที่มวิจัย 4 ครั้ง เป็นเรื่อง
- ☒ ทบทวน / ☐ วางแผนงาน 2 ครั้ง
- ☒ หาหรือปัญหาการทำวิจัย 2 ครั้ง
- ☒ วิเคราะห์ผล_ครั้ง
- ☐ มอบหมายงาน_ครั้ง
- ☐ การจัดหาจัดจ้าง

2. ในรอบ 7 เดือน ที่ผ่านมาท่านได้ติดตามข้อมูลงานวิจัยโดย

- ☐ บันทึกการทำวิจัย (สมุดเล่มดำ) จำนวน_หน้า
- ☒ อ่าน paper ที่เกี่ยวข้อง 6 ชิ้น
- ☒ ค้นข้อมูลทาง internet 8 ครั้ง

3. ในกรณีที่มีนักศึกษาบัณฑิตศึกษาหรือผู้ช่วยวิจัยในโครงการ ในรอบ 7 เดือนที่ผ่านมาท่านได้

- ☒ ให้นักศึกษานำเสนอความก้าวหน้า 1 ครั้ง
- ☒ ประชุมกับนักศึกษา / ผู้ช่วยวิจัย หรือนักศึกษาขอพบเพื่อหาหรือการทำวิจัย 2 ครั้ง
- ☐ ตรวจแก้ผลงานวิจัยที่ทำโดยนักศึกษา หรือผู้ช่วยวิจัย

ส่วนที่ 3

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงวิธีการพัฒนาและดำเนินการพัฒนา Reactive Powder Concrete ขึ้นมาและศึกษาถึงระยะเวลาการก่อตัวและความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสด และศึกษาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วในด้านคุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เพื่อพิจารณาถึงโอกาสในการนำมาใช้งานทางวิศวกรรม

ในเบื้องต้นผลการทดสอบหาปริมาณสารลดน้ำที่เหมาะสมในการผลิต UHPC พบว่าปริมาณสารลดน้ำที่ให้ค่ากำลังอัดที่ 28 สูงสุด มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 5 ถึง 6 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และปริมาณซิลิกาฟูมที่เหมาะสมในการผลิต UHPC อยู่ที่ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ค่า γ ที่เหมาะสมในการผลิต RPC มีค่า 240 เมื่อใช้งานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับการทดลองกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 อยู่ระหว่างการรอผลการทดลอง

รายละเอียดของการศึกษาแสดงในบทที่ 1 ถึง 5

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กและคอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการนำมาใช้งานทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง เหล็กเป็นวัสดุที่สามารถรับกำลังได้สูงกว่าคอนกรีตในทุกๆ ด้าน และเมื่อออกแบบโครงสร้างตามหลักวิชาการแล้วพบว่าโครงสร้างเหล็กจะมีน้ำหนักเบากว่าโครงสร้างคอนกรีตและสามารถก่อสร้างให้เสร็จได้รวดเร็วกว่าโครงสร้างคอนกรีต แต่โครงสร้างเหล็กก็ยังมีจุดที่ด้อยกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น ความต้องการการบำรุงรักษาโดยเฉพาะในการป้องกันสนิม ความคงทนต่อไฟไหม้ และมีราคาค่าก่อสร้างที่สูงกว่า ส่วนโครงสร้างคอนกรีตโดยทั่วไปก็มีปัญหาด้านความคงทนเช่นกัน เช่น การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต การเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในเนื้อคอนกรีตเนื่องจากคาร์บอนชั้น หรือคลอไรด์ และสาเหตุอื่นๆ

วิศวกรด้านปูนซีเมนต์และคอนกรีตเทคโนโลยีได้พยายามที่จะพัฒนาคอนกรีต เพื่อให้มีคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กมากที่สุด และปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนให้สูงขึ้น การพัฒนาให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้นจะช่วยลดขนาดและน้ำหนักของโครงสร้างลง ให้ใกล้เคียงกับโครงสร้างเหล็กและช่วยทำให้คอนกรีตมีความคงทนสูงขึ้น

Richard และ Cherezy (1995) ได้เผยแพร่ผลงานเกี่ยวกับ Reactive Powder Concrete เป็นครั้งแรก ทำให้เกิดการตื่นตัวและเริ่มมีศึกษาถึงเทคนิคและวิธีการผลิต Reactive Powder Concrete ขึ้นในหลายประเทศ ในแคนาดา Reactive Powder Concrete ถูกนำมาผลิตเป็นโครงสร้างสะพานสำหรับคนเดินข้ามแม่น้ำแบบอัดแรงภายนอก บริษัทผู้คิดค้น RPC ได้นำ RPC มาผลิตเป็นท่อระบายเสียเพื่อจำหน่ายในประเทศสหรัฐอเมริกา วิศวกรของจีนได้ศึกษาเพื่อนำไปใช้แทนโครงสร้างเหล็กในพื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมรุนแรงซึ่งมีความแตกต่างของอุณหภูมิในฤดูกาลต่างๆ ค่อนข้างสูง

การศึกษาการพัฒนา Reactive Powder Concrete จะช่วยสร้างองค์ความรู้เพื่อนำไปใช้ในการผลิต Reactive Powder Concrete ในภาคอุตสาหกรรมจริง และเป็นฐานความรู้เพื่อใช้ศึกษาและพัฒนาต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาถึงแนวทางการออกแบบและพัฒนา Reactive Powder Concrete ตามแนวคิดของผู้ที่คิดค้นวัสดุนี้โดยใช้วัสดุที่สามารถหาได้ภายในประเทศให้มากที่สุด เพื่อเป็นฐานความรู้ในการค้นคว้าวิจัยในเรื่องนี้ต่อไป

- 2) ศึกษาถึงคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของ Reactive Powder Concrete ที่พัฒนาขึ้น เช่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น ระยะเวลาการก่อตัว การหดตัวแบบออโตจีเนียส (Autogeneous Shrinkage) การหดตัวแบบแห้งตัว (Drying Shrinkage) ความสามารถในการทนกรดและด่าง ค่าสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิ เพื่อให้สามารถที่จะนำคุณสมบัติต่างๆ มาพิจารณาใช้งาน Reactive Powder Concrete ตามความเหมาะสมต่อไป

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1) สามารถผลิต Reactive Powder Concrete ได้ตามแนวทางที่ผู้คิดค้นได้คิดค้นขึ้น
- 2) ทราบคุณสมบัติของวัตถุดิบที่เหมาะสมในการพัฒนา Reactive Powder Concrete
- 3) ทราบถึงคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างระดับอนุภาคของ Reactive Powder Concrete

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษา ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่ใช้ทั่วไป
- 2) มวลรวม เป็นทรายละเอียดคัดขนาดที่มีขนาดระหว่าง 0.15-0.6 มิลลิเมตรเท่านั้น จากการหาข้อมูลในเบื้องต้นพบว่าทรายแก้วละเอียดจากจังหวัดระยองมีคุณสมบัติที่เหมาะสม เนื่องจากทรายแก้วมีรูปทรงที่ค่อนข้างกลมทำให้สามารถจัดเรียงตัวได้แน่น และทำให้ได้คอนกรีตหรือมอร์ตาร์ที่ไหลลื่นตัวได้ดี โดยทำการร่อนคัดขนาดทรายก่อนการใช้งานโดยจะใช้ทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 100 เท่านั้นซึ่งทรายที่ได้จะมีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 150-600 ไมครอน โดยจะทำการศึกษาเปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไปที่ร่อนผ่านตะแกรงเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคขนาดเดียวกัน
- 3) ซิลิกาฟุ่ม ใช้ซิลิกาฟุ่มที่มีสัดส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 85 ขึ้นไปตามมาตรฐาน ASTM C 1240
- 4) น้ำยาผสมเพิ่มใช้น้ำยาลดน้ำยิ่งยวดประเภทโพลีคาร์บอกซีเลทที่มีความสามารถในการลดน้ำมากที่สุด
- 5) เส้นใยเหล็กใช้เส้นใยเหล็กที่มีความละเอียดสูงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16 มิลลิเมตร ยาว 13 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงสูงประมาณ 2000 เมกะปาสคาล
- 6) การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตประกอบด้วย ระยะเวลาในการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ
- 7) ทดสอบคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตประกอบด้วย การหดตัวจากการแห้งตัว ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ และความทนทานต่อสภาพความเป็นกรดและซัลเฟต

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลพื้นฐาน

คอนกรีตกำลังสูงเริ่มถูกใช้งานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1965 ในสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1993 ได้มีการบัญญัติความหมายของคอนกรีตสมรรถนะสูงขึ้นโดย ACI และในปี ค.ศ. 1996 คอนกรีตกำลังสูงได้ถูกเสนอเพื่อใช้ในการก่อสร้างทางหลวงและถูกนิยมนำมาใช้เพิ่มขึ้นในโครงสร้างที่อยู่นอกชายฝั่งและโครงสร้างสะพานที่มีช่วงความยาวค่อนข้างยาว

Reactive Powder Concrete คือ วัสดุที่มีซีเมนต์เป็นตัวประสานมวลรวมต่าง ๆ โดยใช้องค์ความรู้ทางด้านโครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตร่วมกับความรู้ทางด้านเคมีของปูนซีเมนต์และคอนกรีตโดยหลักการของ RPC คือ

1. ทำให้คอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุดโดยไม่ใช้มวลรวมหยาบ
2. ปรับปรุงความหนาแน่นอัดแน่นโดยการจัดสัดส่วนผสมให้แน่นที่สุดโดยใช้วิธีการออกแบบคอนกรีตแบบใหม่
3. ปรับปรุงโครงสร้างระดับจุลภาคเพื่อเพิ่มความคงทนในระยะยาว โดยการให้ความร้อนหลังการก่อตัวซึ่งช่วยทำให้การหดตัวน้อยลง
4. ปรับปรุงความเหนียวให้ดีขึ้นโดยการผสมเส้นใยเหล็กขนาดเล็ก

ผู้คิดค้นวิจัย RPC เป็นคณะแรกคือคณะวิจัยของ HDR Engineering Inc ซึ่งเป็นบริษัทแม่ผู้ก่อตั้งบริษัท Bouygues โดยเริ่มทำการศึกษาตั้งแต่ช่วงต้น ค.ศ. 1990 และในปี ค.ศ. 1995 Richard และ Cheyrezy (1995) ได้รายงานผลการพัฒนา Reactive Powder Concrete ดังมีสัดส่วนผสมตามตารางที่ 2.1

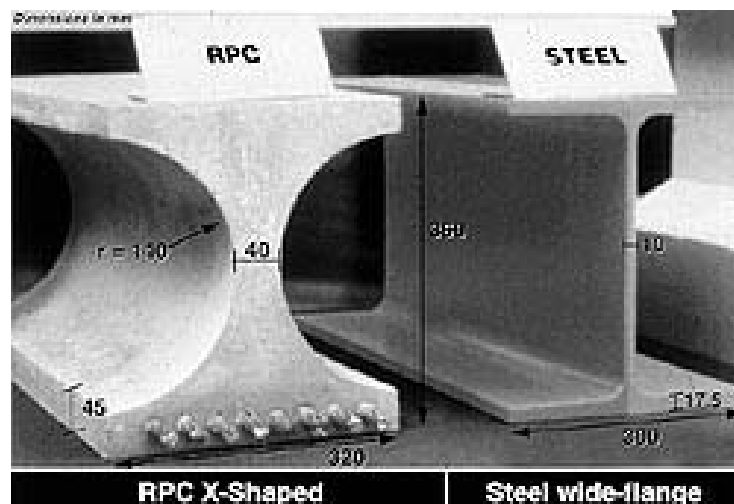
ตารางที่ 2.1 สัดส่วนผสมของ RPC โดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์

	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 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กำลังรับแรงดัดอยู่ระหว่าง 300-600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่ RPC 800 ที่ใช้ทรายเป็นส่วนผสมมีกำลังรับแรงอัดสูงอยู่ระหว่าง 4,900-6,800 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วน RPC 800 ที่ใช้เส้นใยเหล็กเป็นส่วนผสมมีกำลังรับแรงอัดสูงถึง 6,500 – 8,100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร RPC 800 มีกำลังรับแรงดัดอยู่ระหว่าง 450 – 1,410 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

Collepari และคณะได้เสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Reactive Powder Concrete (RPC) หลายเรื่องด้วยกันเช่น “อิทธิพลของสารลดน้ำยิ่งยวดต่อกำลังรับแรงอัดของ Reactive Powder Mortar” , “คุณสมบัติทางกลของ RPC ดัดแปลง” และ “อิทธิพลของวัสดุต่อสมรรถนะของ RPC” เป็นต้น จากผลการศึกษาสามารถที่จะผลิต Reactive Powder Concrete ที่มีกำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่า 1,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ขึ้นไปและมีกำลังต้านทานแรงดัดมากกว่า 160 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ขึ้นไป สาเหตุที่ทำให้คุณสมบัติทางกลของ RPC จากการศึกษาของ Collepari มีกำลังแตกต่างจาก Richard และ Cheyrezy นั้นเนื่องจากได้ใช้มวลรวมหยาบแทนที่ทรายคัดขนาดเพื่อลดความยุ่งยากในกระบวนการผลิตและลดต้นทุนการผลิต RPC ลง และยังได้พยายามใช้เส้นใยเหล็กที่มีขนาดเล็กใกล้เคียงกับที่ใช้ในการผลิต steel fiber reinforced concrete (SFRC) ทัวไปซึ่งสามารถหาวัสดุได้ง่ายกว่าและราคาถูกกว่ามาก

แม้ว่า RPC จะเป็นคอนกรีตที่ได้รับการพัฒนาคุณภาพในหลาย ๆ ด้านแต่เนื่องจาก RPC มีต้นทุนการผลิตที่สูงจึงไม่คุ้มค่าที่จะนำมาใช้แทนคอนกรีตธรรมดา ในขณะเดียวกัน RPC มีคุณสมบัติทางกลหลายด้านที่ใกล้เคียงกับเหล็ก จึงเกิดความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ที่จะนำ RPC มาใช้แทนโครงสร้างเหล็ก Christophe Dauriac (1997) ได้แสดงให้เห็นถึงหน้าตัดเปรียบเทียบระหว่างคานคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ RPC ซึ่งสามารถรับแรงดัดได้เท่ากับคานเหล็กที่มีความลึกเท่ากัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1

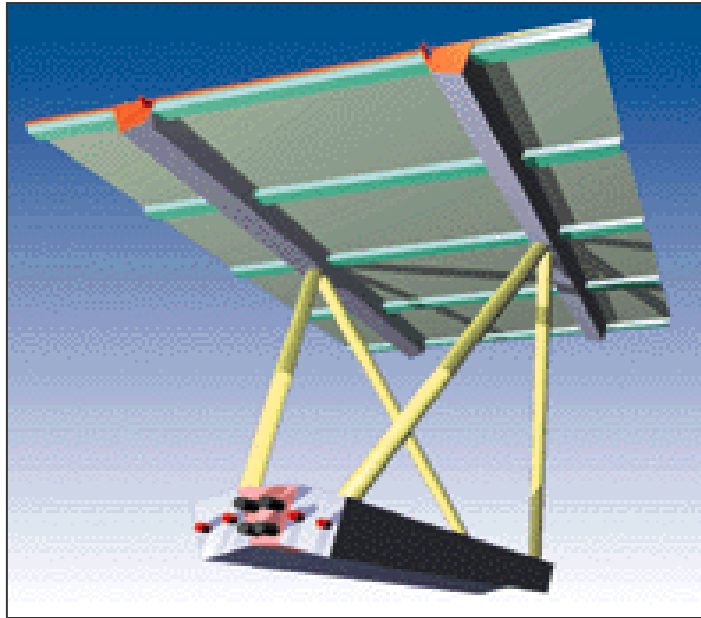


รูปที่ 2.1 หน้าตัดของคาน RPC อัดแรงเทียบกับคานเหล็กที่มีกำลังรับแรงดัดเท่า ๆ กัน

จากวิวัฒนาการด้านงานโครงสร้างที่ผ่านมามีวัสดุประเภทคอนกรีตและวัสดุที่ทำจากปูนซีเมนต์ถูกใช้เพื่อรับกำลังอัดเท่านั้น แต่ RPC ได้อยู่เหนือข้อจำกัดนี้และได้นำเสนอแนวทางใหม่ให้การออกแบบคอนกรีตอัดแรงเพราะ RPC สามารถที่จะรับแรงดึงได้ ทำให้ไม่ต้องการการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนและเหล็กเสริมอื่นๆ ทำให้ต้นทุนในการเสริมเหล็กลดลง แต่สิ่งสำคัญที่ขาดไม่ได้คือ แรงงานที่จะทำให้คุณภาพของ RPC เป็นไปตามที่ออกแบบไว้

New-Technologies.Org, On Line, 2004 ได้แสดงถึงโครงสร้างจริงที่ได้ใช้ Reactive Powder Concrete (RPC) เป็นครั้งแรกคือสะพานสำหรับคนเดินและจักรยานที่เมือง Sherbrooke ประเทศแคนาดา โดยมีลักษณะเป็นสะพานน้ำหนักเบาแบบโครงข้อหมุน 3 มิติ ความยาวช่วงสะพาน 60 เมตร แบ่งชิ้นงานเป็น 6 ชิ้นและทำการอัดแรงภายหลัง โดยมีพื้นทางเดินเป็น Top Chord ซึ่งมีความหนาเพียง 1" ส่วนของ Web

เป็นการใช้โครงสร้างประกอบคือใช้ RPC เเทลงไปในท่อสแตนเลสบาง โดยไม่มีการเสริมเหล็กในส่วน
โครงสร้าง Superstructure ของสะพานทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างสะพานคนข้ามที่เมือง Sherbrooke ประเทศแคนาดา

Jin Wen Yu และคณะได้ศึกษาถึงการนำ Precast RPC ไปใช้แทนระบบหุ้ช้างเหล็กและแผ่นพื้นคอนกรีตธรรมดา ของทางเดินของสะพานรถไฟเส้นทาง Qinghai-Tibet ซึ่งมีระยะทางยาวกว่า 576 กิโลเมตร บางพื้นที่ตั้งอยู่บนพื้นที่สูงกว่าระดับน้ำทะเล 4,000 เมตร ปกคลุมด้วยน้ำแข็ง อุณหภูมิต่ำ มีฝนและหิมะตกบ่อยครั้ง หรือบางพื้นที่ต้องเผชิญกับพายุทราย อีกทั้งยังอยู่ในพื้นที่มีแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ น้ำใต้ดินที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า การนำ RPC มาใช้เป็นหุ้ช้างแทนเหล็ก จะให้ค่าบำรุงรักษาที่ต่ำกว่า อีกทั้งยังมีต้นทุนที่ต่ำกว่า สามารถผลิตได้โดยผู้ผลิตคอนกรีตทั่วไป ให้กำลังอัดสูงถึง 1,600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และกำลังรับแรงดัดสูงกว่า 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีคุณภาพสม่ำเสมอ

นอกจากนั้นยังได้มีแนวคิดที่จะนำ RPC ไปใช้กับโครงสร้างกักเก็บของเสียประเภทนิวเคลียร์ ทั้งนี้เนื่องจาก RPC มีความหนาแน่นสูง ความพรุนต่ำ จึงทำให้การแพร่ของกัมมันตรังสีผ่าน RPC เป็นไปได้ยากยิ่ง

จะเห็นได้ว่าวิศวกรได้พยายามที่จะนำ RPC มาใช้เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุด ซึ่งจากสมรรถนะที่สูงมากของ RPC ทำให้สามารถที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

- กำลังที่สูงมากทำให้สามารถลดน้ำหนักของโครงสร้างลงได้มาก ซึ่งจะให้โครงสร้างที่มีรูปร่างเพรียวขึ้น ทำให้ลดต้นทุนรวมลงและสามารถเพิ่มพื้นที่ใช้สอยในแต่ละชั้นของอาคารสูงได้
- โครงสร้างที่มีความเหนียวมากและสามารถซึมซับพลังงานได้อย่างดี ทำให้ได้โครงสร้างที่มีความปลอดภัยสูงแม้เกิดการรับแรงกระทำจากแผ่นดินไหว
- ตัดการเสริมเหล็กออกได้ทำให้สามารถหล่อโครงสร้างที่ไม่จำกัดรูปร่างและช่วยลดต้นทุนแรงงานที่เกี่ยวข้องลง
- เพิ่มความต้านทานการขัดสีทำให้อายุการใช้งานของพื้นสะพานและพื้นโรงงานอุตสาหกรรมยาวนานขึ้น
- ต้านทานการเกิดสนิมได้ดี ให้การป้องกันเคมีที่มากับเกลือละลายหิมะและเหมาะกับการใช้งานในพื้นที่ที่อยู่ในสภาพชื้นตลอดเวลา
- ปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาที่อยู่ภายในจะช่วยในการประสานรักษาตัวมันเองเมื่ออยู่ในสภาพแตกร้าว
- ผิวมีความละเอียดมากทำให้ได้ผิวที่ตกแต่งแล้วมีคุณภาพสูง
- กำลังที่สูงของ RPC ทำให้ลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์และมวลรวมโดยรวมลงเป็นการใช้วัสดุให้เกิดประโยชน์สูงสุด
- ความคงทนสูงมากเนื่องจากความพรุนที่ต่ำมากทำให้การซึมผ่านของของเหลวและก๊าซแทบจะไม่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาสูง

RPC จัดเป็นคอนกรีตในกลุ่ม Ultra High Performance Concrete (UHPC) ประกอบด้วยวัสดุเหล่านี้

ก. ปูนซีเมนต์ Richard และ Cheyrezy ได้ทำการพัฒนา RPC โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่ง ต่อมา Collepardi และคณะ(1995) ได้ทำการทดลองกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 พบว่าปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมแก่การนำมาผลิต RPC จะเป็นปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 5 ที่มี C_3A ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่น ๆ

ข. ซิลิกาฟุ้ง เป็นสารที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต 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 หรือขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ วัสดุประเภทนี้ไม่มีการผลิตในประเทศไทยแต่มีจำหน่ายใน

ประเทศโดยบริษัทเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในงานก่อสร้าง คุณภาพขั้นต่ำของซิลิกาฟูมควรจะผ่านมาตรฐานตาม ASTM C1240 ซึ่งกำหนดให้มีสัดส่วนของ SiO₂ ไม่น้อยกว่า 85% ขึ้นไปดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2.2 จากการศึกษาของสมภพ (2539)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูมที่ผ่านมาตรฐาน ASTM C1240 เทียบกับปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ (ปริมาณเป็น %)	ซิลิกาฟูม (ปริมาณเป็น %)
SiO ₂	21.3	92-98
Al ₂ O ₃	4.5	0.5
Fe ₂ O ₃	4.0	2.1
MgO	2.4	0.3
CaO	63.1	0.8
Na ₂ O	0.1	0.1
K ₂ O	1.2	1.0
SO ₃	2.2	0.2

- ค. ทราบ เป็นทรายละเอียดคัดขนาดที่มีขนาดระหว่าง 0.15-0.6 มิลลิเมตรเท่านั้น
- ง. สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำยิ่งยวด จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสารประเภทที่เป็นส่วนประกอบของ Acrylic Polymer จะให้ผลดีที่สุดทั้งในด้านความสามารถในการลดน้ำและการทำงานได้
- จ. เส้นใยเหล็ก จากการค้นคว้าวิจัยที่ผ่านมามีการใช้เส้นใยเหล็กหลายขนาด พบว่าขนาดความยาว 13 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16 มิลลิเมตร จะมีความเหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด โดยผสมในอัตราส่วนร้อยละ 1.5-3.0 โดยปริมาตร วัสดุนี้ไม่มีการผลิตในประเทศไทยจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศและไม่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาและดัดแปลง RPC มีดังนี้

Richard และ Cheyrezy (1994) ได้รายงานผลการพัฒนา Reactive Powder Concrete โดยส่วนผสมที่ใช้ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1,000 กิโลกรัม ทรายละเอียดและควอทซ์บด 900-1000 กิโลกรัม ซิลิกาฟุ่ม 230 กิโลกรัม น้ำ 150-180 กิโลกรัม และเส้นใยเหล็กละเอียด 630 กิโลกรัม รวมกับน้ำยาลดน้ำอย่างยั้งยวด ตัวอย่างถูกอัดให้แน่นด้วยวิธีทางกลและบ่มที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังต้านทานแรงอัดสูงถึง 6,800 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และกำลังต้านทานแรงดัดสูงถึง 1,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 7.5×10^5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

Colleparidi และคณะ (1996) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของประเภทของปูนซีเมนต์และซิลิกาฟุ่มที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของ RPC โดยทดลองกับปูนซีเมนต์ 3 ชนิดที่มีค่า C_3A และ Blaine Fineness ต่างๆ กัน และซิลิกาฟุ่ม 3 ชนิดที่มีสีและองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน พบว่าปูนซีเมนต์ที่ให้ผลดีกับกำลังรับแรงอัดคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มี C_3A ต่ำ และมีค่า Blaine Fineness 340 ตร.ม./กก. และซิลิกาฟุ่มที่ให้ผลดีกับกำลังรับแรงอัดคือ ซิลิกาฟุ่มสีขาวที่ไม่มีคาร์บอนและมีขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยที่ 0.7 ไมครอน สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดของ RPC ได้ถึง 2,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์กับ 0.18 และบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 160 °C และผลเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ระหว่างร้อยละ 4-11 พบว่าทำให้อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงเหลือ 1,600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้วิธีการบ่มเช่นเดิม

Colleparidi และคณะ (1997) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสารลดน้ำยั้งยวดที่มีต่อสมรรถนะของ RPC พบว่าสารลดน้ำยั้งยวดที่เป็นส่วนประกอบของอาคริลิคโพลีเมอร์ให้สมรรถนะที่ดีกว่าสารลดน้ำยั้งยวดที่มีส่วนประกอบของแนฟทาลินและเมลามีนโดยให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่ำกว่าและค่ากำลังรับแรงอัดที่คอนกรีตอายุ 3 วันสูงกว่า โดยที่อายุ 1 วัน RPC ที่ใช้อาคริลิคโพลีเมอร์จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามากเมื่อใช้ร่วมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำและมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ ทั้งนี้เกิดจากผลของการหน่วงอย่างแรงเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ร่วมกับซิลิกาฟุ่มบางประเภท เมื่อใช้ร่วมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทอื่นแล้วไม่ปรากฏผลของการหน่วงของสารลดน้ำยั้งยวดประเภทอาคริลิคนี้ ทำให้กำลังรับแรงอัดที่ 1 วันมีค่าค่อนข้างสูง

และที่อายุ 28 วัน เมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้องค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าขึ้นอยู่กับประเภทของปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟุ่ม และสารลดน้ำยั้งยวด อย่างไรก็ตามผลการศึกษาที่ได้ให้ค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 1,600-1,800 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งต่ำกว่าที่ผู้คิดค้นได้รายงานไว้ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 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°C ค) บ่มด้วยไอน้ำแรงดันสูงที่อุณหภูมิ 160 °C

การเพิ่มมวลรวมหยาบคัดขนาดไม่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ลดลง และไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ซึ่งให้ผลที่ตรงกันข้ามกับแนวคิดที่ไม่ใช้มวลรวมหยาบเพื่อให้ได้กำลังรับแรงอัดที่สูงถึง 2,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทั้ง RPC สูตรดั้งเดิมและสูตรดัดแปลงที่ใช้มวลรวมหยาบมีสมรรถนะที่ดีขึ้นในด้านกำลังรับแรงอัด การหดตัวจากการแห้งตัวและการคืบจากความเครียดมีค่าลดลง เมื่อใช้การบ่มด้วยไอน้ำ คุณสมบัติที่ดีขึ้นนี้มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างระดับจุลภาคที่แน่นขึ้นของซีเมนต์เมตริกซ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน RPC ที่บ่มที่อุณหภูมิ 160 °C

Colleparidi และคณะ (2000) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการดัดแปลง RPC ด้วยมวลรวมเทียมที่ทำจากปูนเม็ดบดหยาบที่มีขนาด 100-400 ไมครอนซึ่งใช้แทนทรายและที่มีขนาด 0.1-8 มิลลิเมตรซึ่งใช้แทนทรายเปรียบเทียบกับ RPC ตามสูตรดั้งเดิมที่ใช้ทรายและหินตามขนาดข้างต้น โดยใช้แหล่งปูนเม็ดบดหยาบแหล่งเดียวกับที่ผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ใช้ในการผสม ซึ่งแนวความคิดนี้เกิดขึ้นเพื่อที่จะปรับปรุงกำลังการยึดเกาะของซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ผิวของปูนเม็ด และบ่มตัวอย่างทั้งหมดที่ ก) อุณหภูมิห้อง ข) บ่มด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 90°C ค) บ่มด้วยไอน้ำแรงดันสูงที่อุณหภูมิ 160 °C และทดสอบกำลังรับแรงอัดตามอายุจาก 1 วันถึง 28 วัน

ผลการทดสอบพบว่าสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันได้สูงถึง 2000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และไม่ว่าจะใช้อุณหภูมิในการบ่มเท่าใดพบว่าการใช้ปูนเม็ดบดหยาบแทนมวลรวมที่ได้จากธรรมชาติมีผลทำให้พัฒนากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันได้สูงถึง 2000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างปูนซีเมนต์กับมวลรวมได้รับการปรับปรุงเมื่อใช้ปูนเม็ดบดหยาบแทนมวลรวมที่ได้จากธรรมชาติ จากการสังเกตด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งขึ้นและบ่งชี้ว่าผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมธรรมชาติเป็นจุดที่อ่อนแอใน RPC

Colleparidi และคณะ (2003) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของประเภทของเส้นใยที่มีต่อสมรรถนะของ RPC โดยการศึกษาทั้ง RPC ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ที่ไม่มี C_3A และใช้น้ำยาลดน้ำยิ่งยวดประเภทอาคริลิก และซิลิกาฟุ่มแบบ Undensified ร่วมกับ quartz sand ที่มีขนาดใหญ่สุด 1 มม. และผันแปร Aspect Ratio ขนาดรูปร่างและการเตรียมผิวของเส้นใยโลหะที่ใช้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินถึงอิทธิพลของชนิดของเส้นใยที่มีต่อสมรรถนะในด้านกำลัง ความเหนียว และความคงทนในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง ผลการศึกษาพบว่า

- ก. รูปร่างของเส้นใยไม่มีผลกระทบต่อ Workability ของ RPC
- ข. RPC ที่ใช้เส้นใยที่ทำจากทองเหลืองให้สมรรถนะทางกลดีกว่า RPC ที่ทำจากเส้นใยประเภทอื่นๆ
- ค. เส้นใยเหล็กมีอิทธิพลต่อสมรรถนะทางกลของ RPC โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลคือ ปริมาณของเส้นใยที่กระจายอยู่ใน RPC และแรงยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เมตริกซ์กับเส้นใย และยังพบว่าแรงยึดเกาะกับเส้นใยนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย (ขนาด รูปร่าง และการเตรียมผิว)
- ง. คลอไรด์ที่มาจากน้ำทะเลหรือสารละลาย NaCl ที่เข้มข้นร้อยละ 10 แทบจะไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปใน RPC ได้ตลอดระยะเวลา 6 เดือนของการทดลอง ซึ่งทำให้แทบไม่สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้
- จ. สมรรถนะทางกลของ RPC มีค่าคงที่แม้ว่าชิ้นตัวอย่างจะถูกเก็บอยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง สำหรับ RPC ที่ใช้เส้นใยที่ชุบกลวไนซ์พบว่าไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ผิว (ทราบจากการเกิดออกซิเดชัน)

Jianxin Ma และ Holger Schneider (2002) ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของ Ultra High Performance Concrete (UHPC) ซึ่งเป็นคอนกรีตที่มีส่วนผสมใกล้เคียงกับ RPC แต่ไม่มีการใช้เส้นใยเสริมกำลังในคอนกรีตเท่านั้น โดยได้ดัดแปลง UHPC สูตรดั้งเดิมด้วยการใช้ผงควอทซ์ละเอียดแทนปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูมพบว่าสามารถผลิต UHPC ที่ไหลตัวได้ที่กำลังรับแรงอัด 1550 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยไม่จำเป็นต้องใช้วิธีการบ่มด้วยความร้อนหรือวิธีการพิเศษอื่นๆ และสามารถผลิต UHPC ที่มีกำลังรับแรงอัดสูงถึง 2,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อสามารถควบคุมปริมาณฟองอากาศภายในคอนกรีตไว้ไม่ให้เกินร้อยละ 1 และพบว่า UHPC เกิดการหดตัวแบบ Autogeneous มากกว่าคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วัน

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การก่อตัวและแข็งตัวของปูนซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของปูนซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะคือ

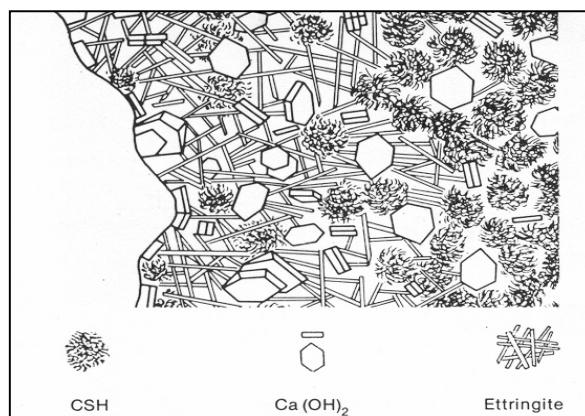
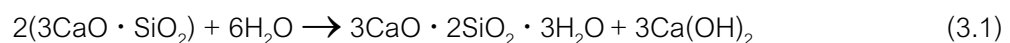
1. อาศัยสารละลาย ปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำก่อให้เกิด Ions ในสารละลายและ Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

2. การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “Solid State Reaction”

ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้จะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์แต่ละประเภท

- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S)

แคลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานดังแสดงในรูปที่ 3.1 สมการที่ (3.1), (3.2)



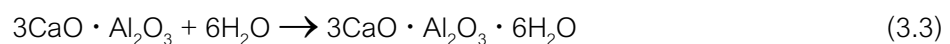
รูปที่ 3.1 แสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต

จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะเกิด Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ C-S-H นี้ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในที่นี้จะใช้ตัวย่อ C-S-H แทน Calcium Silicate Hydrate ที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะมี องค์ประกอบและโครงสร้างเป็นอย่างไร

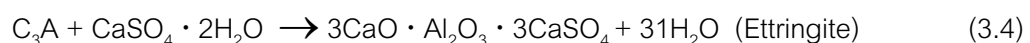
Ca (OH)₂ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมาก คือมี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้เป็นอย่างดี

- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C₃A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของ ซีเมนต์เพสต์ ดังสมการที่ (3.3)



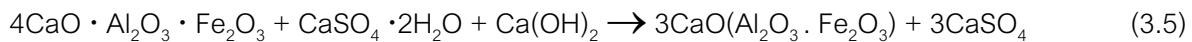
เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัม (CaSO₄ · 2H₂O) เข้าไปในระหว่าง ขบวนการบดปูนซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ C₃A ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C₃A ดังสมการที่ (3.4)



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C₃A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃S และ C₂S เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการ เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน C₃A กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของ ของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃A แต่เมื่อเกิดการ แตกตัว จะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็น อย่างนี้ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮ เดรชันของ C₃A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate

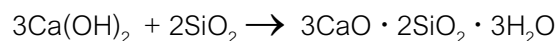
- ปฏิกริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียม อะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

ปฏิกริยาไฮเดรชันของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกริยากับยิปซัม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการที่ (3.5)



3.2 ปฏิกริยาปอซโซลานิก

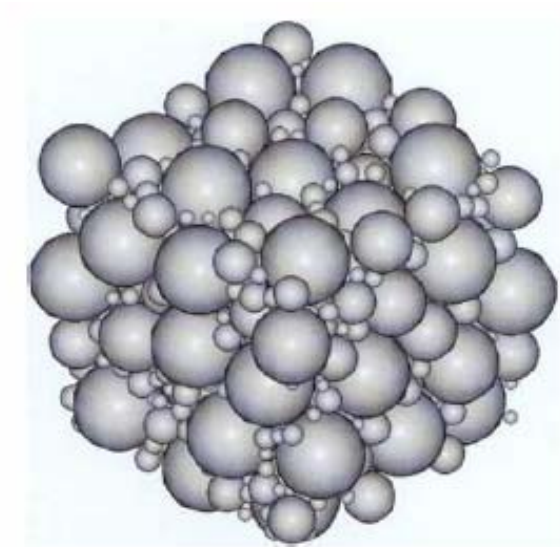
ปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาขั้นที่ 2 โดยมีสารตั้งต้นคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากปฏิกริยาไฮเดรชัน เข้าทำปฏิกริยากับซิลิกอนไดออกไซด์จากซิลิกาฟุ่ม เกิดเป็นตัวเชื่อมประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น โดยมีปฏิกริยาเกิดขึ้นดังนี้



โดยที่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เพิ่มขึ้นนอกเหนือจากปฏิกริยาไฮเดรชัน จะช่วยปรับปรุงโครงสร้างภายในของคอนกรีตให้แน่นทึบมากขึ้นทำให้มีความชื้นได้ต่ำ และช่วยเพิ่มกำลังให้แก่คอนกรีต

3.3 Dense Packing

มวลรวมใน Reactive Powder Concrete มีเพียงมวลรวมละเอียดเท่านั้นซึ่งมีขนาดใหญ่มากที่สุดเพียง 600 ไมครอน และมีช่วงขนาดของอนุภาคระหว่าง 150-600 ไมครอน ส่วนปูนซีเมนต์มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมครอนถึงร้อยละ 90 ตามมาตรฐาน ASTM C430 ควอตซ์ทบละเอียดมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 10 ไมครอน ส่วนซิลิกาฟุ่มมีขนาดอนุภาคเพียง 1 ส่วน 100 ของขนาดปูนซีเมนต์เท่านั้น จะเห็นว่าขนาดของอนุภาคของมวลสารใน Reactive Powder Concrete มีการละกันหลายขนาด ทั้งนี้เนื่องจากผู้พัฒนาได้นำแนวคิดทางด้าน Dense Packing เข้ามาใช้เป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนา

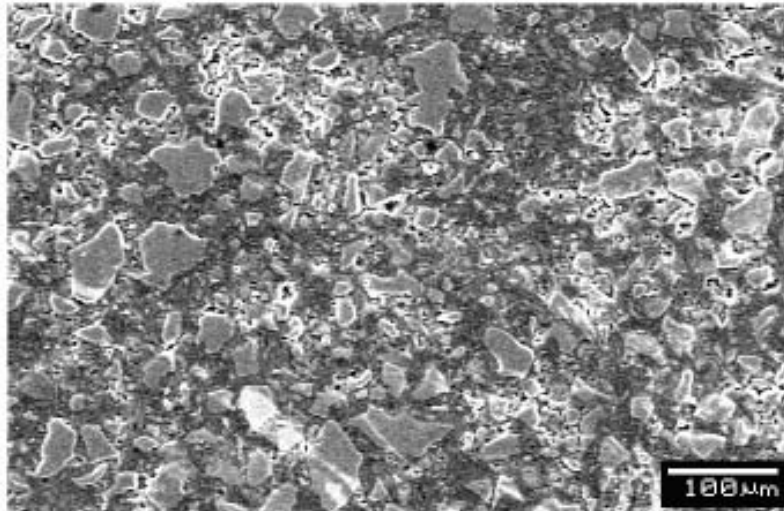


รูปที่ 3.2 การใช้อนุภาคหลายขนาดเพื่อให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น

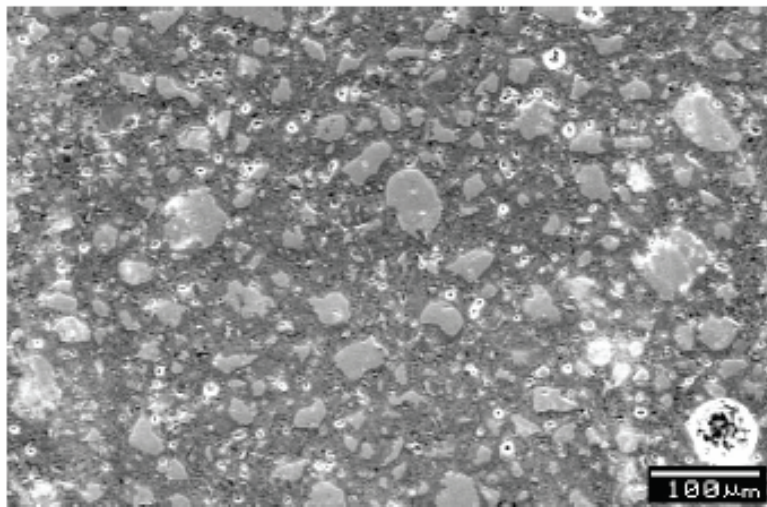
ผลจากการทำ Dense Packing อย่างหนึ่งคือ Filler Effect เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ 100 เท่า เป็นผลให้อนุภาคซิลิกาฟุ่มสามารถแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ได้ ดังนั้นโครงสร้างของคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ่มเป็นส่วนประกอบจึงมีความทึบแน่นสูงมากกว่าคอนกรีตธรรมดา ส่งผลได้สามารถรับกำลังได้ดีขึ้นและความพรุนน้อยลงทำให้มีความซึมได้ต่ำ (Low Permeability)

3.4 Heat Curing

การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์แน่นกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำมีผลทำให้ความคงทนเพิ่มมากขึ้นและการหดตัวลดน้อยลง ดังแสดงด้วยภาพที่ 3.3 และ 3.4 ซึ่ง Hill และคณะ (2002) ได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตที่บ่มที่อุณหภูมิ 20 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมงหรือ 3 วัน เทียบกับตัวอย่างของคอนกรีตที่บ่มที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าคอนกรีตที่บ่มที่อุณหภูมิ 90 °C มีความพรุนน้อยกว่าคอนกรีตที่บ่มที่อุณหภูมิ 20 °C มาก



รูปที่ 3.3 โครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตที่บ่มที่อุณหภูมิ 20 °C
เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง



รูปที่ 3.4 โครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิ
90 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

บทที่ 4

แผนการศึกษาและวิจัย

จากการศึกษาข้อมูลในอดีตพบว่า ยังไม่มีผู้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ RPC ในประเทศไทย โดยในอดีตที่ผ่านมา มีเพียงการศึกษาเกี่ยวกับคอนกรีตกำลังสูง หรือคอนกรีตสมรรถนะสูงเท่านั้น ทำให้การวิจัยนี้ต้องใช้ตัวอย่างในการทดลองมาก อีกทั้ง RPC ยังมีต้นทุนในการผลิตที่สูงกว่าคอนกรีตธรรมดามาก การค้นคว้าวิจัยจึงต้องกำหนดลำดับขั้นในการศึกษาอย่างละเอียดและชัดเจนเพื่อให้สามารถนำผลที่ได้มาเป็นข้อมูลในการวิจัยในระดับสูงต่อไป อีกทั้งช่วยให้สามารถควบคุมงบประมาณในการวิจัยและพัฒนาได้ ขั้นตอนการศึกษาและวิจัยได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลำดับขั้นตอนการพัฒนา RPC

ระยะที่	โครงการ	วัตถุประสงค์
1	พัฒนา Ultra High Performance Concrete (UHPC)	UHPC ในการพัฒนานี้คือ RPC ที่ไม่มีการใส่เส้นใยเหล็กและไม่ได้บ่มด้วยวิธีการพิเศษใดๆ การศึกษา UHPC จะทำให้เข้าใจถึงโครงสร้างระดับจุลภาคของ UHPC และสามารถที่จะพัฒนาเป็น RPC ต่อไปได้ การศึกษา UHPC จะทำให้ประหยัดงบประมาณเนื่องจาก UHPC ไม่มีเส้นใยเหล็กที่มีราคาสูงมากเป็นส่วนประกอบ
2	พัฒนา Reactive Powder Concrete (RPC)	ใช้ฐานข้อมูลจากการพัฒนา UHPC มาพัฒนา RPC ตามสูตรดั้งเดิมให้ได้สมรรถนะที่ดีที่สุดและศึกษาคุณสมบัติในด้านต่างๆ ของ RPC ที่พัฒนาได้ ซึ่ง RPC ที่พัฒนาได้นี้จะเป็นเสมือนต้นแบบในการศึกษาเพื่อพัฒนาหรือดัดแปลงสูตรต่อไป

4.1 ขอบเขตของงานวิจัย

4.1.1 การพัฒนา UHPC

ประกอบด้วยการทดสอบวัสดุและการทดสอบ UHPC ตามรายละเอียดตามตารางที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 การทดสอบวัสดุ

วัสดุ	แหล่ง	คุณสมบัติที่ศึกษา
ปูนซีเมนต์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด(มหาชน)	- องค์ประกอบทางเคมี - ความละเอียด - ความถ่วงจำเพาะ
ซิลิกาฟูม	จากผู้ผลิตอย่างน้อย 2 ราย	- องค์ประกอบทางเคมี - ความละเอียด
สารลดน้ำยั้งยวด	-จากผู้ผลิตอย่างน้อย 2 ราย	- ความถ่วงจำเพาะ - ความสามารถในการลดน้ำ
มวลรวมละเอียด	- ทรายแม่น้ำคัดขนาด	- ขนาดคละ

ตารางที่ 4.3 การทดสอบ UHPC

คุณสมบัติที่ศึกษา	Plastic State	Hardened State
	- ความสามารถในการทำงาน - ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย - ฟองอากาศภายใน	- กำลังรับแรงอัด - โมดูลัสยืดหยุ่น - กำลังรับแรงดัด - การหดตัว - การซึมผ่านของน้ำ - การทนต่อการกรดและซัลเฟต - ความพรุนของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุ 28 วัน ตาม ASTM C642

หมายเหตุ - การศึกษา UHPC ที่ Hardened State จะศึกษาด้วยวิธีการบ่มที่อุณหภูมิห้องเท่านั้น

4.1.2 การพัฒนา RPC

ประกอบด้วยการทดลองหาสัดส่วนผสมของ RPC ตามรายละเอียดดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การพัฒนาและการทดสอบ RPC

คุณสมบัติที่ศึกษา	Plastic State	Hardened State
	- ความสามารถในการทำงาน - ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย - ฟองอากาศภายใน	- กำลังรับแรงอัด - โมดูลัสยืดหยุ่น - กำลังรับแรงดัด - กำลังรับแรงดึง - การหดตัว - สัมประสิทธิ์การยืดขยายตัวเนื่องจากความร้อน - การซึมผ่านของน้ำ - การทนต่อการกรดและซัลเฟต - ความพรุนของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วันตาม ASTM C642

หมายเหตุ - ที่ Hardened State จะใช้วิธีการบ่มที่อุณหภูมิห้องและบ่มที่อุณหภูมิ 90 และ 160 องศาเซลเซียส

4.2 ขั้นตอนและรายละเอียดวิธีการทดสอบ

4.2.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาส่วนผสมของ RPC แต่อย่างไรก็ตาม ต้องการมีการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุโดยยึดตามมาตรฐานดังนี้

4.2.1.1 มวลรวม

- ทดสอบหาหน่วยน้ำหนักและช่องว่างระหว่างมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C29
- ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซับน้ำของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C128
- ทดสอบหาขนาดคละและโมดูลัสความละเอียดของมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C136

4.2.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และ 5

- ทดสอบหาส่วนประกอบทางเคมีและความละเอียด

4.2.1.3 ซิลิกาฟูม

- ทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี XRF

4.2.2 การพัฒนา UHPC และ RPC

เมื่อทราบถึงคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการพัฒนา UHPC แล้วก็จะสามารถนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในกระบวนการวิจัยในการพัฒนาหาสัดส่วนผสมและเทคนิควิธีการผลิต RPC โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ร่วมกับมวลรวมละเอียดคือทรายคัดขนาดและควอทซ์บดที่ผ่านการทดสอบหาช่องว่างต่ำสุดหรือคำนวณและทดลองด้วยเทคนิควิธีการอัดแน่น (Dense packing) โดยปฏิบัติตามขั้นตอนตามตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 รายละเอียดการพัฒนา UHPC

ลำดับ	เรื่องที่ศึกษา	ตัวแปรที่ศึกษา	ปัจจัยที่ควบคุม	ผลที่ได้จากการทดสอบ
1.1	อิทธิพลของน้ำยาลดน้ำยิ่งยวดต่อซีเมนต์ที่มีต่อ UHPC	สัดส่วนน้ำยาลดน้ำยิ่งยวดต่อซีเมนต์ที่ร้อยละ 1.5, 2.5, 3.5, 4.0 และ 4.5 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.14, 0.16, 0.18 และ 0.20	สัดส่วนผสมของ UHPC ที่อัตราส่วนซีเมนต์เพสต์ต่อช่องว่างร้อยละ 120 และ	สัดส่วนที่เหมาะสมของน้ำยาลดน้ำยิ่งยวดต่อซีเมนต์ที่ให้ Workability และกำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุด
1.2	ความเข้ากันได้ของน้ำยาลดน้ำยิ่งยวดกับปูนซีเมนต์ + ซิลิกาฟูม	สารน้ำยาลดน้ำยิ่งยวดจากต่างแหล่งผลิตที่แตกต่างกัน 2 แห่งที่สัดส่วนซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์ ร้อยละ 10, 20 และ 30	สัดส่วนของน้ำยาลดน้ำยิ่งยวดต่อปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	น้ำยาลดน้ำยิ่งยวดที่เหมาะสมในการนำมาใช้ผลิต UHPC
1.3	ผลของอัตราส่วนร้อยละของซีเมนต์เพสต์ต่อช่องว่างที่มีต่อ UHPC ปริมาณฟองอากาศ	อัตราส่วนซีเมนต์เพสต์ต่อช่องว่างที่ร้อยละ 110, 115, 120, 125 และ 130 และการเพิ่มซิลิกาฟูมลงในสัดส่วนผสมที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 ของปูนซีเมนต์		อัตราส่วนผสมที่ให้กำลังอัดสูงสุดของ UHPC และปริมาณซิลิกาฟูมที่เหมาะสม ปริมาณอากาศภายใน UHPC

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) รายละเอียดการพัฒนา UHPC

ลำดับ	เรื่องที่ศึกษา	ตัวแปรที่ศึกษา	ปัจจัยที่ควบคุม	ผลที่ได้จากการทดสอบ
1.4	การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ใน UHPC	ศึกษาการก่อตัวของ UHPC ที่อายุ 3,7 และ 28 วัน เปรียบเทียบกับคอนกรีตสมรรถนะสูง คอนกรีตไหลตัวได้ และคอนกรีตธรรมดาด้วย SEM	UHPC ตามสัดส่วนผสมที่ได้จากการศึกษาตาม 1.3	ภาพถ่ายจาก SEM ของพัฒนาการของซีเมนต์เพสต์ใน คอนกรีตสมรรถนะสูง คอนกรีตไหลตัวได้ และคอนกรีตธรรมดา
1.5	คุณสมบัติของ UHPC ในสภาวะ Plastic	- การก่อตัวระยะเริ่มต้น - การก่อตัวระยะปลาย - การสูญเสีย workability		ระยะเวลาก่อตัวต้น ระยะเวลาการก่อตัวปลาย และ การสูญเสีย workability
1.6	คุณสมบัติทางกลของ UHPC เทียบกับวัสดุอื่น	- กำลังรับแรงอัด - กำลังรับแรงดัด - กำลังรับแรงดึง ที่อายุ 1,3,7,28 - โมดูลัสยืดหยุ่น - อัตราส่วนปัวซอง ที่อายุ 28 วัน โดยเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยที่เคยมีผู้วิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติทางด้านต่างๆ ของคอนกรีตสมรรถนะสูง คอนกรีตไหลตัวได้ และคอนกรีตธรรมดา		ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของ UHPC เทียบกับคอนกรีตสมรรถนะสูง คอนกรีตไหลตัวได้ และคอนกรีตธรรมดา

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) รายละเอียดการพัฒนา UHPC

ลำดับ	เรื่องที่ศึกษา	ตัวแปรที่ศึกษา	ปัจจัยที่ควบคุม	ผลที่ได้จากการทดสอบ
1.7	คุณสมบัติทางกายภาพของ UHPC เทียบกับวัสดุอื่น	- การหดตัวแบบแห้ง - การหดตัวออโตจีเนียส - สัมประสิทธิ์การยืดหดตัวจากอุณหภูมิ - ความต้านทานกรดและซัลเฟต - การซึมผ่านของน้ำ - ความพรุนด้วยวิธี MIP ตาม ASTM C642 โดยเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยที่เคยมีผู้วิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติทางด้านต่างๆ ของคอนกรีตสมรรถนะสูง คอนกรีตไหลตัวได้ และคอนกรีตธรรมดา		ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของ UHPC เทียบกับคอนกรีตสมรรถนะสูง คอนกรีตไหลตัวได้ และคอนกรีตธรรมดา

หมายเหตุ

1. คุณสมบัติเชิงกลของ UHPC จะศึกษาที่คอนกรีตอายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน
2. ตัวเลขในวงเล็บคือจำนวนตัวอย่างที่ศึกษาในสภาวะคอนกรีตสดหรือ Plastic State

ตารางที่ 4.6 รายละเอียดการพัฒนา RPC

ลำดับ	เรื่องที่ศึกษา	ตัวแปรที่ศึกษา	ปัจจัยที่ควบคุม	ผลที่ได้จากการทดสอบ
2.1	อิทธิพลของปริมาณเส้นใยเหล็กต่อสมรรถนะของ RPC - กำลังรับแรงอัด - กำลังรับแรงดัด - กำลังรับแรงดึง - โมดูลัสยืดหยุ่น - อัตราส่วนปัวซอง	สัดส่วนของปริมาณเส้นใยที่ใช้ในการผสมที่ร้อยละ 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 โดยปริมาตร	สัดส่วนผสมของ RPC ที่ปรับแก้จาก UHPC ตามขั้นตอนที่ 1.6	สัดส่วนที่เหมาะสมของเส้นใยเหล็กที่ใช้ในการผลิต RPC
2.2	ผลของอุณหภูมิในการบ่มต่อสมรรถนะของ RPC - กำลังรับแรงอัด - กำลังรับแรงดัด - กำลังรับแรงดึง - โมดูลัสยืดหยุ่น - อัตราส่วนปัวซอง - การหดตัวจากการแห้ง - การหดตัวออโตจีเนียส - สัมประสิทธิ์การยืดหดตัวจากอุณหภูมิ - ความทนต่อการกัดและซัลเฟต - การซึมผ่านของน้ำ	อุณหภูมิในการบ่มที่อุณหภูมิห้องเทียบกับอุณหภูมิที่ 90 °C และ 160 °C ทดสอบที่ 3, 7, 28 วัน	สัดส่วนผสมของ RPC ที่ได้จาก 2.1	ทราบถึงคุณสมบัติของ RPC ที่ได้จากการบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ กัน

บทที่ 5

ผลการวิจัยและสรุปผลการศึกษา

5.1 การศึกษาทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ RPC

แนวความคิดในการออกแบบ RPC โดยผู้แรกเริ่มคิดค้นคือ Richard และ Cheyrezy (1995) มีความแตกต่างอย่างสิ้นเชิงจากการออกแบบคอนกรีตปกติตามวิธีการของ ACI การออกแบบ RPC จะอาศัยแนวคิด Packing Density หรือ Dense Packing ซึ่งปัจจุบันมีอยู่ 3 วิธีการคือ

5.1.1 Linear Packing Density Model for grain mixtures (LPDM)

5.1.2 Solid Suspension Model (SSM)

5.1.3 Compressible Packing Model

งานวิจัยของ Richard และ Cheyrezy (1995) ได้ใช้หลักการของ Solid Suspension Model(SSM) ในการออกแบบ SSM เป็นแบบจำลองที่พิจารณาองค์ประกอบที่เป็นผงทั้งหมด เช่น ซีเมนต์ ซิลิกาฟูม ทราย เป็นสารแขวนลอยในของเหลว และวัดความสามารถทำงานได้ออกมาในรูปของความหนืด โดยจำเป็นต้องทราบขนาดอนุภาค (particle size) ของวัสดุทั้งหมด แต่เนื่องจากซิลิกาฟูมที่มีจำหน่ายและใช้กันอย่างแพร่หลายโดยทั่วไปจะเป็นแบบอัดแน่น ทำให้ไม่สามารถทราบถึงขนาดอนุภาคที่แท้จริงของซิลิกาฟูมได้ เมื่อไม่ทราบถึงการกระจายขนาดของอนุภาคของซิลิกาฟูมทำให้ไม่สามารถคำนวณออกแบบ RPC โดยใช้แบบจำลอง Model Solid Suspension ได้ การทดลองหาสัดส่วนผสมของ RPC จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการทดลองโดยการ trial ส่วนผสมที่ค่า γ คือค่าอัตราส่วนของซีเมนต์เฟสต่อช่องว่างของมวลรวมแทน

5.2 คุณสมบัติของวัสดุ

5.2.1 ซีเมนต์และซิลิกาฟูม

การทดลองในเบื้องต้นได้ทดลองกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง ส่วนซิลิกาฟูมในการทดลองได้เลือกใช้ซิลิกาฟูมจากผู้ผลิตสองรายคือ

1. Force 10,000D ของบริษัท ดับบลิว อาร์ เกรซ (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งสามารถหาส่วนผสมทางเคมีของซิลิกาฟูมและซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.1
2. Rheomac SF100 ของบริษัท Degussa Construction Chemicals (Thailand) Ltd. ซึ่งส่วนผสมทางเคมีของ Rheomac SF100 อยู่ระหว่างการทดลองหาในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 5.1 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซิลิกาฟูม
Force 10,000D ที่ใช้ในการวิจัย

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ (ร้อยละ)	ซิลิกาฟูม (Force 10,000D) (ร้อยละ)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	20.68	84.44
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	5.21	2.88
ไอรอน(III)ออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.37	4.52
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.68	1.76
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.18	0.48
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.08	0.13
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.42	1.69
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.47	0.78
ต่าง ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$)	0.36	1.25
แคลเซียมอิสระ (Free CaO)	0.73	NA
น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา	1.42	2.30
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	61.32	NA
ไดแคลเซียมซิลิเกต	13.03	NA
ไตรแคลเซียมอลูมินेट	8.09	NA
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์	10.26	NA
ค่าความถ่วงจำเพาะ	3.15	NA
ค่าความละเอียด (Blaine Fineness)	3,400	NA

หมายเหตุ NA คือ Not Applicable

จากผลการวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูมพบว่า ซิลิกาฟูมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าซิลิกอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 84.44 ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานขั้นต่ำของ ASTM C1240 ที่กำหนดไว้ที่ร้อยละ 85 อยู่เล็กน้อยและมีค่าไอรอน (III) ออกไซด์ (Fe_2O_3) สูงถึงร้อยละ 4.52

5.2.2 สารลดน้ำ

สำหรับซิลิกาฟุ้งของบริษัท ดับบลิว อาร์ เกรซ (ประเทศไทย) จำกัดจะใช้ร่วมกับสารลดน้ำประเภท Polycarboxylate ของบริษัท ดับบลิว อาร์ เกรซ (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น ADVA 105 ซึ่งจัดเป็นสารผสมเพิ่มประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.02 ปริมาณใช้งานปกติที่ผู้ผลิตแนะนำในการใช้งานคือ ร้อยละ 0.2 – 1.5 โดยน้ำหนักของซีเมนต์

ส่วนซิลิกาฟุ้งของบริษัท Degussa จะใช้ร่วมกับสารลดน้ำประเภท Polycarboxylate ของบริษัท Degussa รุ่น Glenium ACE 32 ซึ่งจัดเป็นสารผสมเพิ่มประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494 ปริมาณใช้งานปกติที่ผู้ผลิตแนะนำคือ ร้อยละ 0.5-2.5 โดยน้ำหนักของซีเมนต์

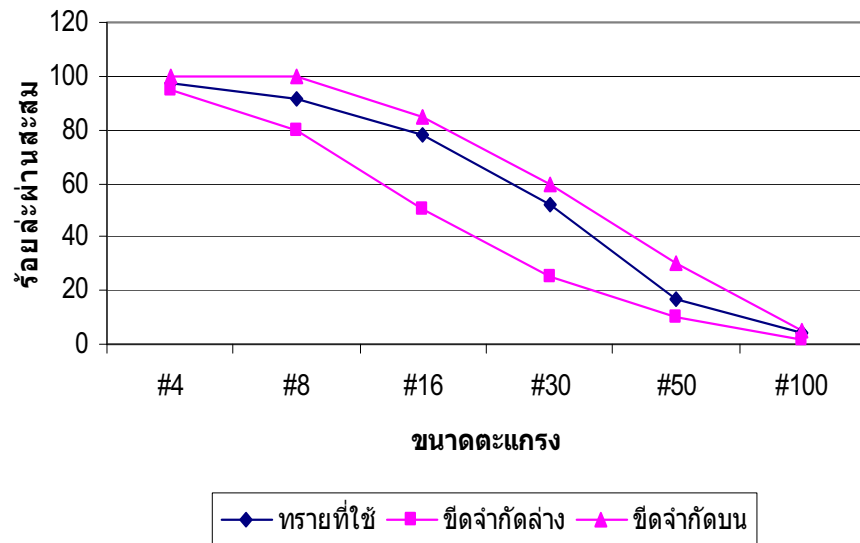
สารลดน้ำนี้อยู่ในรูปของของเหลว ซึ่งผู้ผลิตไม่ได้ระบุถึงปริมาณของแข็ง จึงได้ทำการทดลองหาโดยนำสารลดน้ำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเพื่อให้น้ำระเหยออกไปและชั่งน้ำหนักโดยสังเกตจนน้ำหนักไม่มีการเปลี่ยนแปลง พบว่าสารลดน้ำ ADVA 105 นี้มีส่วนของของแข็งโดยเท่ากับร้อยละ 28.2 และพิจารณาว่าส่วนที่ระเหยออกไปเป็นน้ำทั้งหมดปริมาณร้อยละ 71.8 แล้วนำปริมาณน้ำนี้มารวมกับน้ำใช้ในการผสมมาคำนวณเป็นปริมาณน้ำทั้งหมดในคอนกรีต

5.2.3 ทราย

ใช้ทรายแม่น้ำที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมีขนาดคละก่อนคัดแยกขนาดดังแสดงในตารางที่ 5.2 และมีขนาดคละตาม ASTM C136 ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.6 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C136 ซึ่งกำหนดให้มวลรวมละเอียดควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดอยู่ระหว่าง 2.3 – 3.2 และทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของทรายได้เท่ากับ 2.65 ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.85 ทรายที่ใช้ในการทดลองนี้จะถูกอบให้แห้งจนไม่มีความชื้นอยู่ภายในทราย โดยการคำนวณปริมาณน้ำทั้งหมดในคอนกรีตจะต้องบวกรวมปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับโดยทรายเพื่อให้เกิดสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) เข้าไปด้วย

ตารางที่ 5.2 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดก่อนคัดขนาด

ขนาดตะแกรง	ร้อยละผ่านสะสมของ ทรายที่ใช้	ขีดจำกัด ล่าง	ขีดจำกัด บน	ร้อยละค้างสะสม
# 4	97.45	95	100	2.55
# 8	91.05	80	100	8.95
# 16	77.75	50	85	22.25
# 30	52.10	25	60	47.90
# 50	17.00	10	30	83.00
# 100	4.00	2	5	96.00
Fineness Modulus				2.61

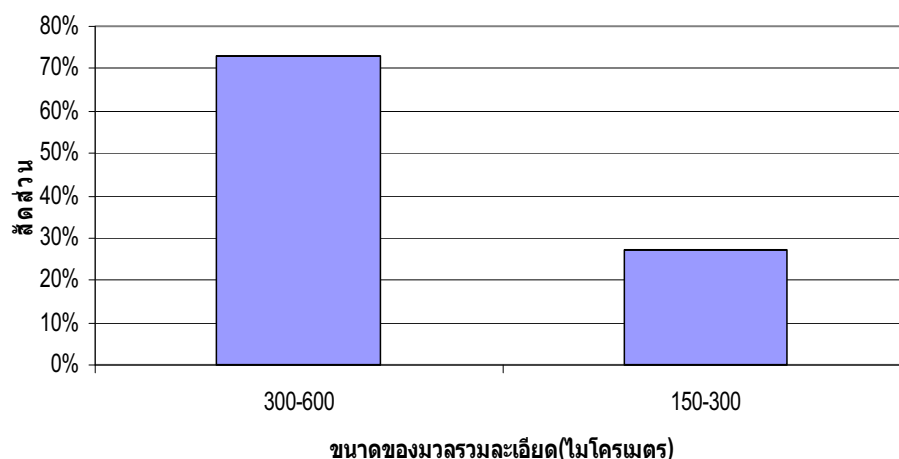


รูปที่ 5.1 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ใช้ก่อนร่อน

กระบวนการผลิต RPC ตามแนวคิดของ Richard และ Cherezy (1995) ได้ใช้ทรายขนาด 150-600 ไมโครเมตรในการผลิต ดังนั้นจึงต้องนำทรายที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตทั่วไปมาร่อน ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และเบอร์ 100 โดยเลือกใช้เฉพาะทรายที่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 100 เพื่อคัดแยกขนาดเฉพาะมวลรวมที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 150-600 ไมโครเมตร และสามารถหาสัดส่วนขนาดคละของมวลรวมที่ใช้ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.3 แผนภูมิแสดงสัดส่วนขนาดคละได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.2 จะเห็นว่ามวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดลองนี้มีสัดส่วนขนาดของอนุภาคระหว่าง 300-600 ไมโครเมตรอยู่ร้อยละ 73 และขนาดอนุภาคระหว่าง 150-300 ไมโครเมตร มีอยู่ร้อยละ 27

ตารางที่ 5.3 สัดส่วนของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดลอง

ขนาดของมวลรวมละเอียด (ไมโครเมตร)	สัดส่วน (ร้อยละ)
300-600	73
150-300	27



รูปที่ 5.2 ขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียดที่ผ่านการร่อนและนำมาใช้ในงานวิจัย

5.3 การแบ่งกลุ่มการทดลองและสัญลักษณ์ของส่วนผสม

เพื่อให้ง่ายต่อการอ่านผลการวิจัยจึงได้กำหนดตัวอักษรย่อสำหรับชื่อส่วนประกอบไว้ดังนี้

XX XX XX XX _ XXX
12 34 56 78 9-11

หลักที่ 1 และ 2 - ใช้บอกกลุ่มของซีเมนต์ ชิลิกาฟุ่ม และสารลดน้ำซึ่งได้แยกไว้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.4 ประกอบด้วย 1A 1B 5A และ 5B โดยตัวเลขในหลักที่ 1 จะใช้บอกประเภทของซีเมนต์ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ในการทดลอง และตัวอักษรในหลักที่ 2 จะแสดงถึงผู้ผลิต ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้ผลิต A คือ บริษัท ดับบลิว อาร์ เกรซ (ประเทศไทย) จำกัด ผู้ผลิต B คือ บริษัท เดกัสซา คอนสตรัคชั่น เคมีคอลส์(ประเทศไทย) จำกัด

ตารางที่ 5.4 ประเภทของซีเมนต์และผู้ผลิตชิลิกาฟุ่มและสารลดน้ำที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุ	ชิลิกาฟุ่ม + สารลดน้ำ ยี่ห้อของผู้ผลิต A	ชิลิกาฟุ่ม + สารลดน้ำ ยี่ห้อของผู้ผลิต B
ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	1A	1B
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	5A	5B

หลักที่ 3 และ 4 – ใช้บอกสัดส่วนร้อยละปริมาณน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักหรือ w/c เช่น 23 หมายถึงคอนกรีตนั้นมีค่า $w/c = 0.23$ ในงานวิจัยนี้ใช้ค่า w/c อยู่ในช่วง 0.2-0.31

หลักที่ 5 และ 6 – ใช้บอกสัดส่วนร้อยละของปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักซึ่งอาจจะมี 1 หลักหรือ 2 หลัก เช่น 6 บอกถึงคอนกรีตนั้นใช้ปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์ที่ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 4-12

หลักที่ 7 และ 8 – ใช้บอกสัดส่วนร้อยละของปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์โดยน้ำหนัก เช่น 25 บอกถึงคอนกรีตนั้นมีสัดส่วนของปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 25 ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 15-35

หลักที่ 9 ถึง 11 – ใช้บอกค่า γ คือสัดส่วนปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวมอัดแน่น ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองกับ γ ที่มีค่าระหว่าง 160-260 สำหรับข้อสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ไม่แสดงค่า γ ไว้แสดงว่าไม่ได้นำค่า γ มาเป็นปัจจัยสำคัญในการทดลอง

ตัวอย่างข้อสัดส่วนผสมคอนกรีต เช่น 1A23625_260 หมายถึงส่วนผสมคอนกรีตนั้นใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร่วมกับซิลิกาฟุ่มและสารลดน้ำจากผู้ผลิต A โดยมีค่า w/c เท่ากับ 0.23 ใช้ปริมาณสารผสมที่ร้อยละ 6 ของซีเมนต์โดยน้ำหนัก มีสัดส่วนซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และมีค่า γ หรือปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวมอัดแน่นที่ 260

5.4 การผสม การทำคอนกรีตให้แน่น และการบ่มคอนกรีต

5.4.1 การผสมคอนกรีต

การผสมคอนกรีตทำโดยการใช้ส่วนมือติดกับใบกวนโดยในช่วงแรกของการทดลองในหัวข้อ 5.5 ถึง 5.6 ได้ใช้เครื่องส่วนรุ่น Hilti TE 25 ที่มีรอบการหมุนสูงสุดเท่ากับ 640 รอบต่อนาที แต่เนื่องจากส่วนรุ่นนี้มีก้านดอกที่ค่อนข้างเล็กทำให้เมื่อใช้งานไปได้ระยะหนึ่งจะก้านใบกวนจะถูกเฉือนขาดเนื่องจากก้านใบกวนไม่สามารถทนต่อแรงบิดที่เกิดขึ้นในขณะกวนได้ จากการทดสอบผสมคอนกรีตทั้งสิ้น 75 สูตร ก้านปั่นขาดไป 3 ก้าน อายุการใช้งานโดยเฉลี่ยเท่ากับ 25 สูตรต่อก้าน ส่วนรุ่น TE 25 นี้จะช่วยประหยัดเวลาในการผสมมากเนื่องจากใช้เวลาในการผสมเพียง 7 นาทีก็สามารถทำให้คอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกันได้

แต่เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดของก้านปั่นของส่วน TE25 ที่มีขนาดเล็ก ทำให้ก้านใบกวนมีอายุการใช้งานที่ค่อนข้างสั้น จึงได้เปลี่ยนมาใช้ส่วนรุ่น TE76 ที่มีก้านใบกวนขนาดใหญ่กว่าและมีรอบการหมุนสูงสุดเพียง 282 รอบต่อนาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเครื่องผสมมอร์ต้าตามมาตรฐาน ASTM C 305 ที่กำหนดให้ใบกวนหมุนรอบตัวเองที่ 285 ± 10 รอบต่อนาที

ขั้นตอนการผสมคอนกรีต

1. ผสมน้ำและสารลดน้ำให้เข้ากัน เติมสารละลายที่ได้ร้อยละ 90 ลงไปก่อนจากนั้นค่อยๆ เติมซิลิกาฟูมทั้งหมดพร้อมทั้งกวนให้เข้ากันจนเป็นเนื้อครีมเหลว ขั้นตอนนี้ใช้เวลา 3-5 นาที
2. เติมน้ำซีเมนต์ลงไปพร้อมทั้งค่อยๆ เติมน้ำส่วนที่เหลือจนได้เนื้อซีเมนต์เพสต์ที่มีความหนืดไปจนถึงเหลว ขั้นตอนนี้ใช้เวลา 3-5 นาที
3. ค่อยๆ เติมทรายลงไปพร้อมทั้งกวนผสมจนได้น้ำคอนกรีตที่เป็นเนื้อเดียวกัน ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที

5.4.2 การทำคอนกรีตให้แน่น

ในเบื้องต้นใช้เหล็กขนาด 1"x 1" ที่ใช้ในการดำสำหรับเก็บตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน BS 181 Part 3 ในการอัดคอนกรีตให้แน่นแต่เนื่องจากตัวอย่างที่เก็บเป็นขนาด 5 ซม. X 5 ซม. X 5 ซม. ต่อมาได้เปลี่ยนเป็นเหล็กกลมขนาด 1" ที่ใช้สำหรับอัดทรายเพื่อทดสอบการดูดซึมความชื้นของทรายในการอัดคอนกรีตแทน โดยแบ่งการดำเป็น 2 ชั้น ชั้นละ 10 ครั้ง และอัดให้แน่นด้วยเกรียง

5.4.3 การบ่มคอนกรีต

ในขั้นต้นใช้การบ่มโดยแช่ในน้ำหลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ

5.5 ผลของปริมาณซิลิกาฟูมและสารลดน้ำต่อระยะเวลาการก่อตัว

ซิลิกาฟูมและสารลดน้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญของ RPC ซึ่งจำเป็นต้องใช้ในปริมาณมาก ซิลิกาฟูมมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า จึงมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมและมีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต สารลดน้ำที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นสารลดน้ำที่ยังยวดยึดอยู่ใน ASTM C494 กลุ่ม F ซึ่งจำเป็นต้องใช้ในปริมาณที่สูงกว่าการใช้งานปกติเพื่อให้เกิด workability ทั้งนี้เนื่องจาก RPC ประกอบด้วยมวลรวมละเอียดเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีมวลรวมหยาบอีกทั้งยังประกอบด้วยซิลิกาฟูมที่มีขนาดอนุภาคละเอียดในปริมาณที่สูงกว่าการใช้งานทั่วไป

การศึกษานี้จะช่วยบอกให้เราทราบถึงข้อจำกัดในด้านระยะเวลาการก่อตัวของ UHPC อันเนื่องมาจากวัตถุดิบทั้งสองนี้ เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบสัดส่วนผสมและนำไปใช้งานจริงต่อไป

5.5.1 ผลของปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

ผลของปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตได้ถูกศึกษาโดยการทดลองใช้ปริมาณซีเมนต์คงที่ที่ 930 กิโลกรัม ปริมาณน้ำคงที่ที่ 214 กิโลกรัม ซึ่งมีค่า $w/c = 0.23$ ปริมาณของสารลดน้ำคงที่ที่ร้อยละ 6 โดยปรับเพิ่มและลดในส่วนของซิลิกาฟุ่มและมวลรวมละเอียดที่ใช้ ใช้ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ที่ร้อยละ 15, 20, 25, 30 และ 35 ส่วนผสมของคอนกรีตได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.5 ซึ่งสัดส่วนผสมมีค่าเท่ากันทั้ง 1A และ 1B เพียงแต่เปลี่ยนซิลิกาฟุ่มและสารลดน้ำเท่านั้น ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตกับสัดส่วนร้อยละของซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.6 – 5.15 และรูปที่ 5.3-5.11

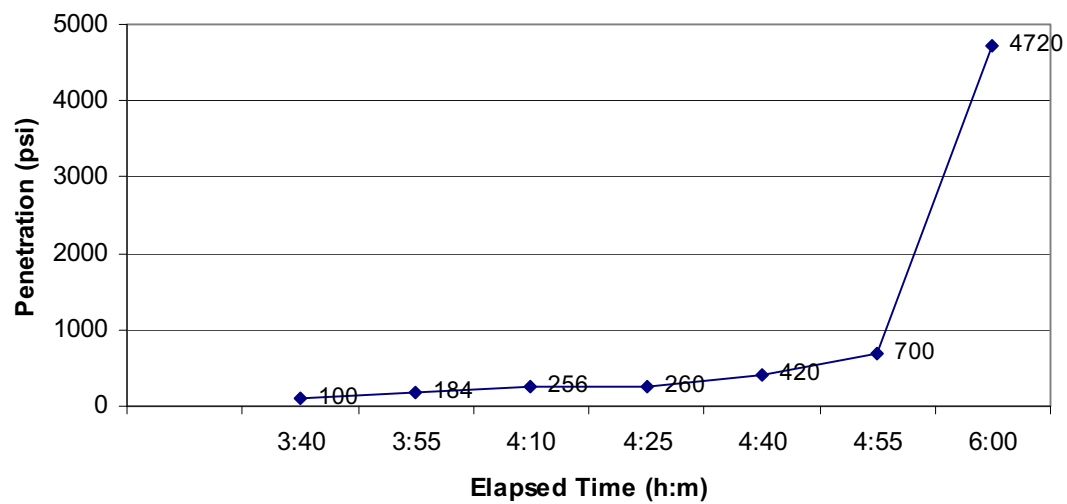
สรุปความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 5.16 และรูปที่ 5.12

ตารางที่ 5.6 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่สัดส่วนร้อยละซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ระหว่าง 0.15 - 0.35

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่าง ๆ				
	1A23615	1A23620	1A23625	1A23630	1A23635
ปูนซีเมนต์	930	930	930	930	930
ซิลิกาฟุ่ม	140	186	233	279	326
มวลรวมละเอียด	1100	1050	1000	960	905
สารลดน้ำ	56	56	56	56	56
น้ำจากสารลดน้ำ	40	40	40	40	40
น้ำที่ใช้ในการผสม	174	174	174	174	174
ปริมาณน้ำทั้งหมด	214	214	214	214	214
น้ำหนักรวม	2399	2396	2392	2399	2390
ร้อยละของปริมาณสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์	6%	6%	6%	6%	6%
w/c	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
w/b	0.20	0.19	0.18	0.18	0.17
ร้อยละของปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35

ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A23615

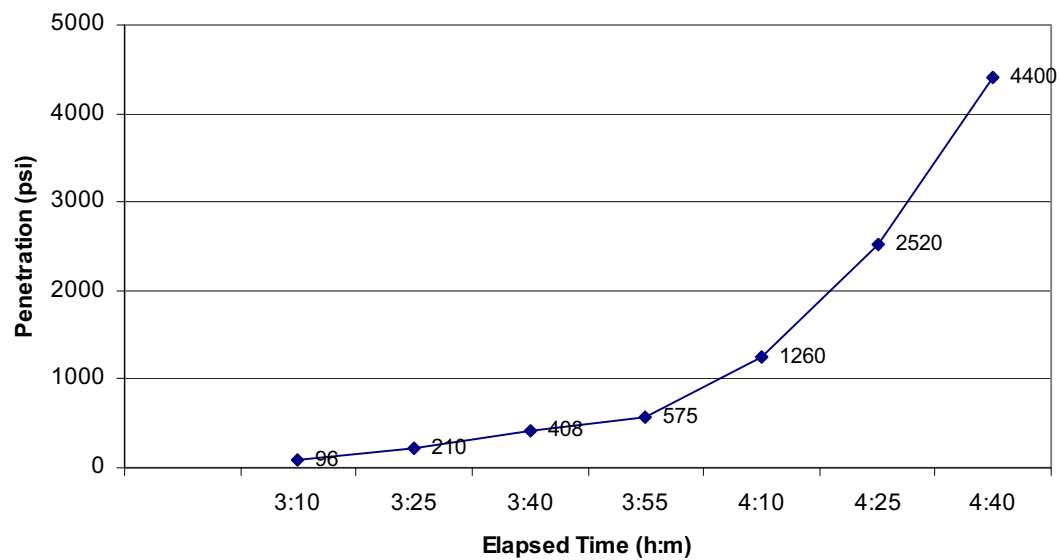
ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลุ (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
3:40:00	100	
3:55:00	184	
4:10:00	256	
4:25:00	260	
4:40:00	420	
4:55:00	700	การก่อดำระยะต้น = 4:44:00
6:00:00	4720	การก่อดำระยะสุดท้าย = 5:48:00



รูปที่ 5.3 ระยะเวลาก่อดำของสัดส่วนผสม 1A23615

ตารางที่ 5.8 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A23620

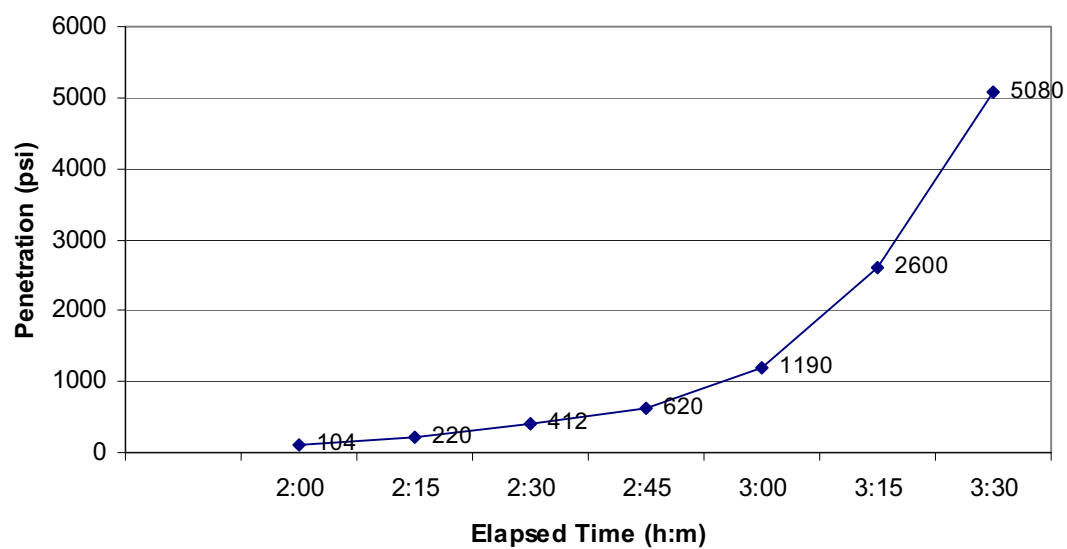
ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลวง (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
3:10:00	96	
3:25:00	210	
3:40:00	408	
3:55:00	575	การก่อดำระยะต้น = 3:48:00
4:10:00	1260	
4:25:00	2520	
4:40:00	4400	การก่อดำระยะสุดท้าย = 4:37:00



รูปที่ 5.4 ระยะเวลาก่อดำของสัดส่วนผสม 1A23620

ตารางที่ 5.9 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A23625

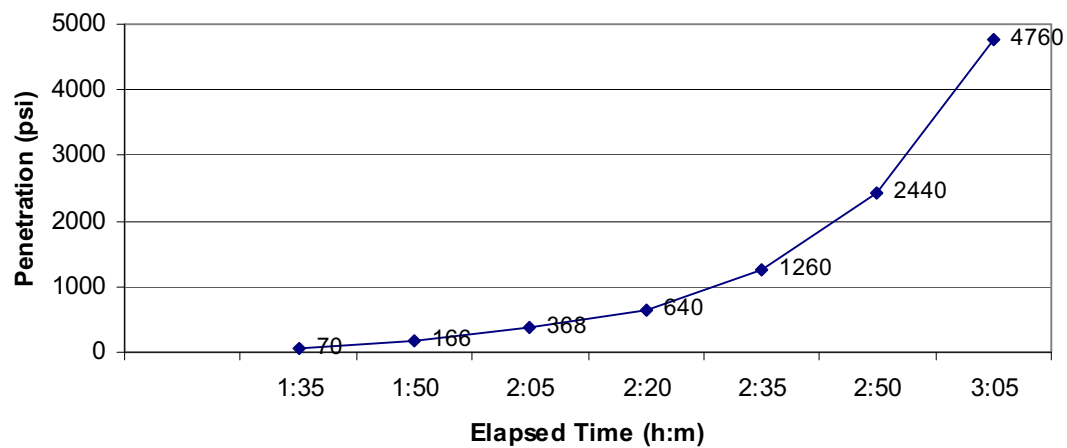
ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลวง (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
2:00:00	104	
2:15:00	220	
2:30:00	412	
2:45:00	620	การก่อดำระยะต้น = 2:34:00
3:00:00	1190	
3:15:00	2600	
3:30:00	5080	ก่อดำระยะสุดท้าย = 3:23:00



รูปที่ 5.5 ระยะเวลาก่อดำของส่วนผสม 1A23625

ตารางที่ 5.10 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A23630

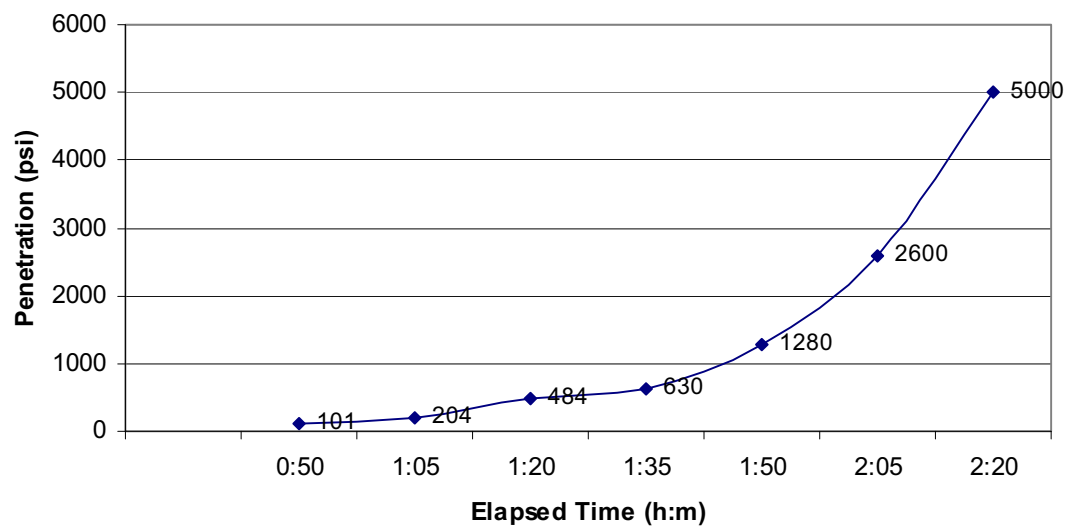
ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลวง (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
1:35:00	70	
1:50:00	166	
2:05:00	368	
2:20:00	640	การก่อดำระยะต้น = 2:12:00
2:35:00	1260	
2:50:00	2440	
3:05:00	4760	การก่อดำระยะสุดท้าย = 3:00:00



รูปที่ 5.6 ระยะเวลาก่อดำของสัดส่วนผสม 1A23630

ตารางที่ 5.11 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A23635

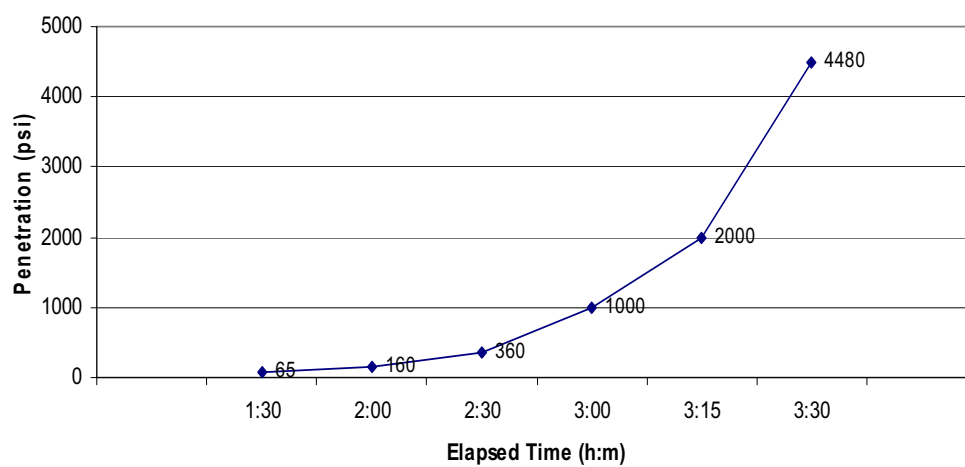
ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลวง (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
0:50:00	101	
1:05:00	204	
1:20:00	484	
1:35:00	630	การก่อดำระยะต้น = 1:22:00
1:50:00	1280	
2:05:00	2600	
2:20:00	5000	การก่อดำระยะสุดท้าย = 2:14:00



รูปที่ 5.7 ระยะเวลาก่อดำของสัดส่วนผสม 1A23635

ตารางที่ 5.12 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1B23615

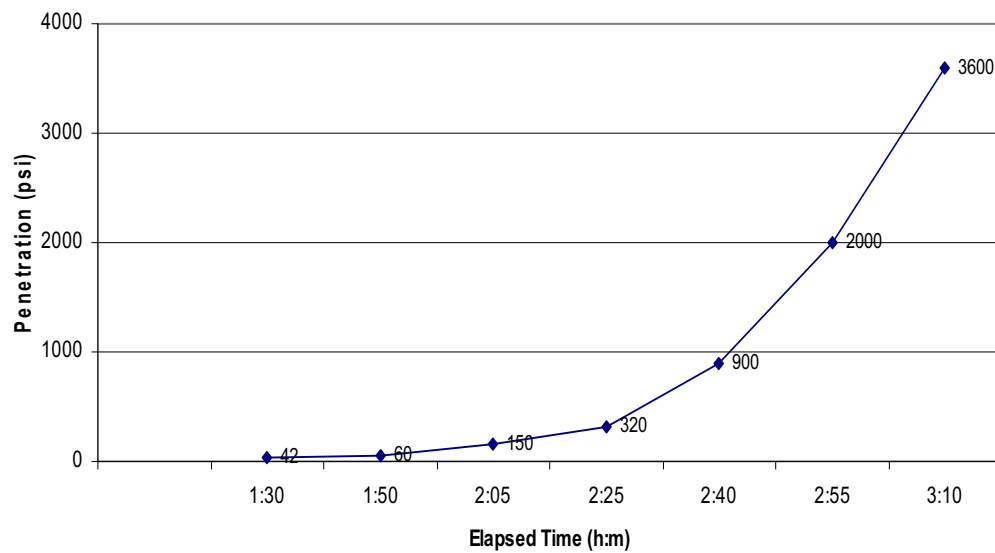
ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลุ (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
1:30:00	65	
2:00:00	160	
2:30:00	360	
3:00:00	1000	การก่อดำระยะต้น = 2:37:00
3:15:00	2000	
3:30:00	4480	การก่อดำระยะสุดท้าย = 3:27:00



รูปที่ 5.8 ระยะเวลาก่อดำของสัดส่วนผสม 1B23615

ตารางที่ 5.13 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1B23620

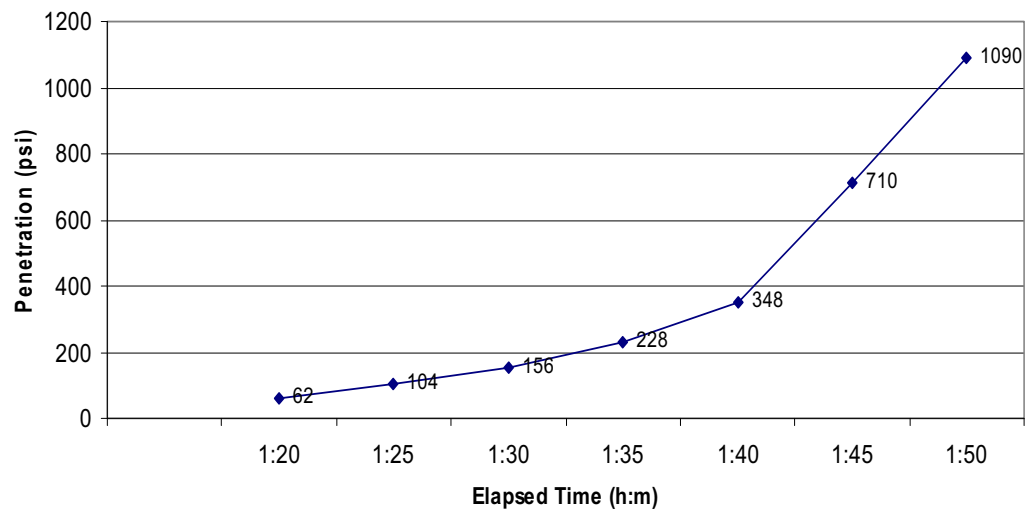
ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลวง (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
1:30:00	42	
1:50:00	60	
2:05:00	150	
2:25:00	320	
2:40:00	900	การก่อดำระยะต้น = 2:30:00
2:55:00	2000	
3:10:00	3600	
3:30:00	4320	การก่อดำระยะสุดท้าย = 3:22:00



รูปที่ 5.9 ระยะเวลาก่อดำของสัดส่วนผสม 1B23620

ตารางที่ 5.14 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1B23625

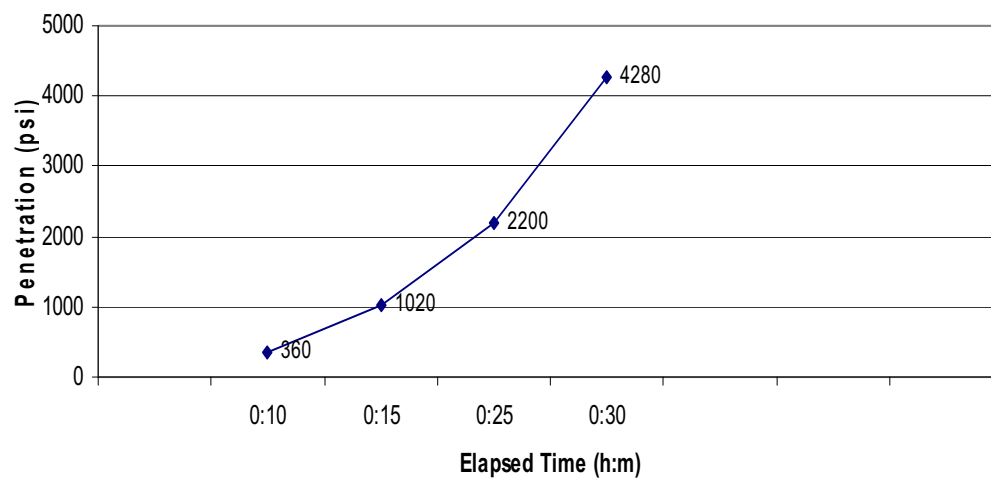
ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลวง (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
1:20:00	62	
1:25:00	104	
1:30:00	156	
1:35:00	228	
1:40:00	348	
1:45:00	710	การก่อดำระยะต้น = 1:42:00
1:50:00	1090	
1:55:00	1800	
2:00:00	2340	
2:05:00	5120	ก่อดำระยะสุดท้าย = 2:02:00



รูปที่ 5.10 ระยะเวลาก่อดำของสัดส่วนผสม 1B23625

ตารางที่ 5.15 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1B23630

ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลวง (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
0:10:00	360	
0:15:00	1020	การก่อดำระยะต้น = 0:11:00
0:25:00	2200	
0:30:00	4280	การก่อดำระยะสุดท้าย = 0:29:00

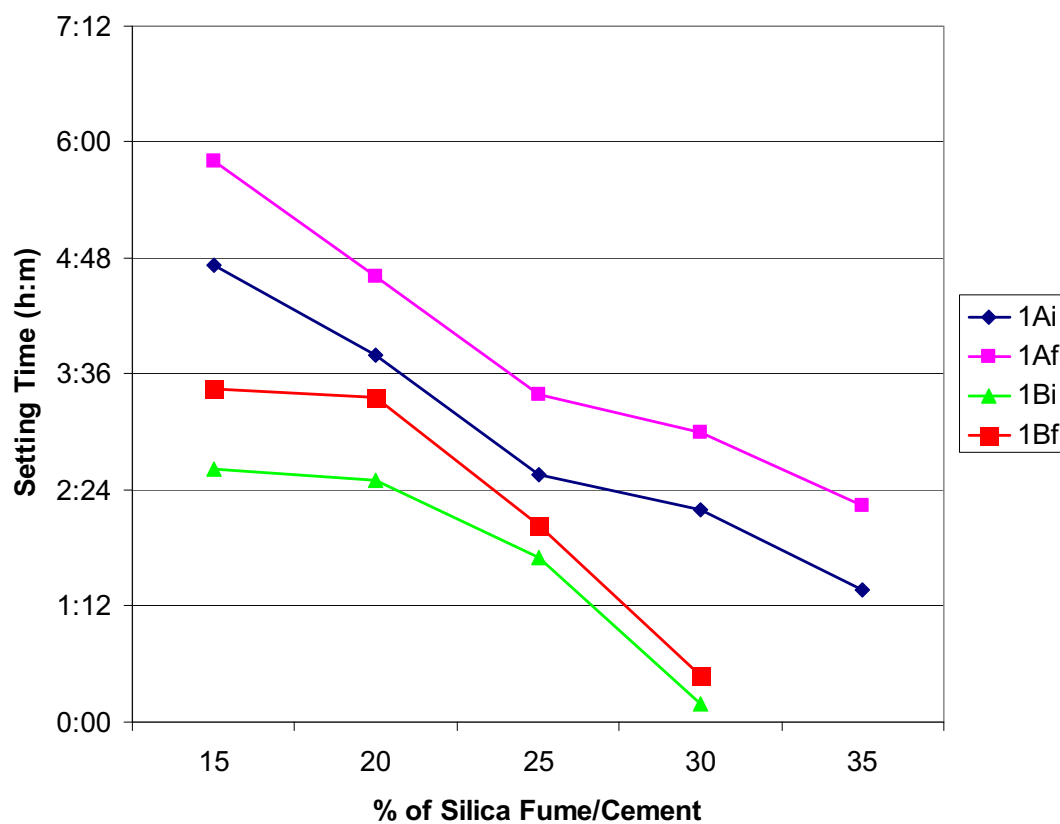


รูปที่ 5.11 ระยะเวลาก่อดำของสัดส่วนผสม 1B23630

ตารางที่ 5.16 สรุปผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่สัดส่วนร้อยละของ
ซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ค่าต่าง ๆ

ร้อยละของซิลิกาฟุ่ม ต่อปูนซีเมนต์	ระยะเวลาการก่อตัว (ชั่วโมง:นาที)			
	1Ai	1Af	1Bi	1Bf
15	4:44	5:48	2:37	3:27
20	3:48	4:37	2:30	3:22
25	2:34	3:23	1:42	2:02
30	2:12	3:00	0:11	0:29
35	1:22	2:14	NH	

NH = ไม่สามารถผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันได้ (Not Homogeneous)



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักต่อ
ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองหาค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นและการก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีตที่ควบคุมปริมาณสารลดน้ำไว้ที่ร้อยละ 6 และควบคุม w/c ให้เท่ากับ 0.23 โดยใช้ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 และ 0.35 ตามลำดับ พบว่าปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต โดยปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวสั้นลงทั้งการก่อตัวในระยะต้นและการก่อตัวในระยะสุดท้าย

จากการทดลองที่ใช้สารลดน้ำและซิลิกาฟุ่มของ WR Grace พบว่าการเพิ่มของสัดส่วนซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ทุก ๆ ร้อยละ 5 มีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายลดลงประมาณ 40-50 นาที

ส่วนการทดลองที่ใช้สารลดน้ำและซิลิกาฟุ่มของ Degussa พบว่าระยะเวลาการก่อตัวทั้งต้นและสุดท้ายมีระยะเวลาน้อยกว่าของ WR Grace มาก และเมื่อยิ่งเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่มระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตยิ่งลดลงในอัตราที่รวดเร็วกว่าของ WR Grace โดยที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.30 คอนกรีตจะมีระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายสั้นเพียง 29 นาทีเท่านั้น และเมื่อเพิ่มสัดส่วนซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ขึ้นไปเป็น 0.35 พบว่าไม่สามารถผสมคอนกรีตให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้

เมื่อต้องการควบคุมระยะเวลาการก่อตัวไว้ที่ 3 ชั่วโมง สำหรับสารลดน้ำและซิลิกาฟุ่มของ WR Grace สามารถใช้สัดส่วนซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ได้ไม่เกิน 0.30 และของ Degussa สามารถใช้สัดส่วนซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ได้ไม่เกิน 0.20 และเมื่อต้องการควบคุมระยะเวลาการก่อตัวไว้ที่ 2 ชั่วโมง สำหรับสารลดน้ำและซิลิกาฟุ่มของ WR Grace สามารถใช้สัดส่วนซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ได้ไม่เกินร้อยละ 35 และของ Degussa สามารถใช้สัดส่วนซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ได้ไม่เกิน 0.25

5.5.2 ผลของปริมาณสารลดน้ำต่อระยะเวลาการก่อตัว

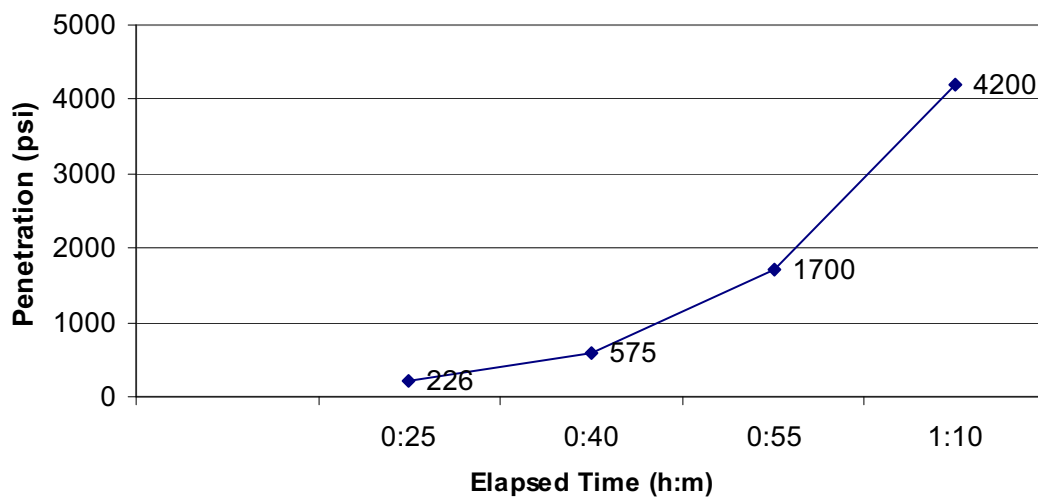
ผลของปริมาณสารลดน้ำต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตได้ศึกษาโดยเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณสารลดน้ำต่อคอนกรีตโดยน้ำหนักที่ร้อยละ 4 6 8 10 และ 12 โดยกำหนดให้ค่า w/c คงที่ที่ 0.23 ปริมาณซีเมนต์และซิลิกาฟุ่มคงที่ที่ 930 และ 233 กิโลกรัมตามลำดับ โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณสารลดน้ำ และทราย รายละเอียดของสัดส่วนผสมในการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 5.17 ซึ่งจะเหมือนกันทั้ง 1A และ 1B เพียงแต่เปลี่ยนสารลดน้ำและซิลิกาฟุ่มเท่านั้น ผลการทดลองหาระยะเวลาการก่อตัวที่ปริมาณสารลดน้ำต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.18 ถึง 5.26 และรูปที่ 5.13 – 5.21 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตกับสัดส่วนสารลดน้ำต่อซีเมนต์ที่ค่าต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.27 และ รูปที่ 5.22

ตารางที่ 5.17 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่สัดส่วนปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักที่
ร้อยละ 4 – 12

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาณสารลดน้ำต่าง ๆ				
	1A23425	1A23625	1A23825	1A231025	1A231225
ปูนซีเมนต์	930	930	930	930	930
ซิลิกาฟูม	233	233	233	233	233
มวลรวมละเอียด	1020	1010	980	970	950
สารลดน้ำ	37	56	74	93	112
น้ำจากสารลดน้ำ	27	40	53	67	80
น้ำที่ใช้ในการผสม	187	174	161	147	134
ปริมาณน้ำทั้งหมด	214	214	214	214	214
น้ำหนักรวม	2407	2402	2378	2373	2358
ร้อยละของปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์	4	6	8	10	12
w/c	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
w/b	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18

ตารางที่ 5.18 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A23425

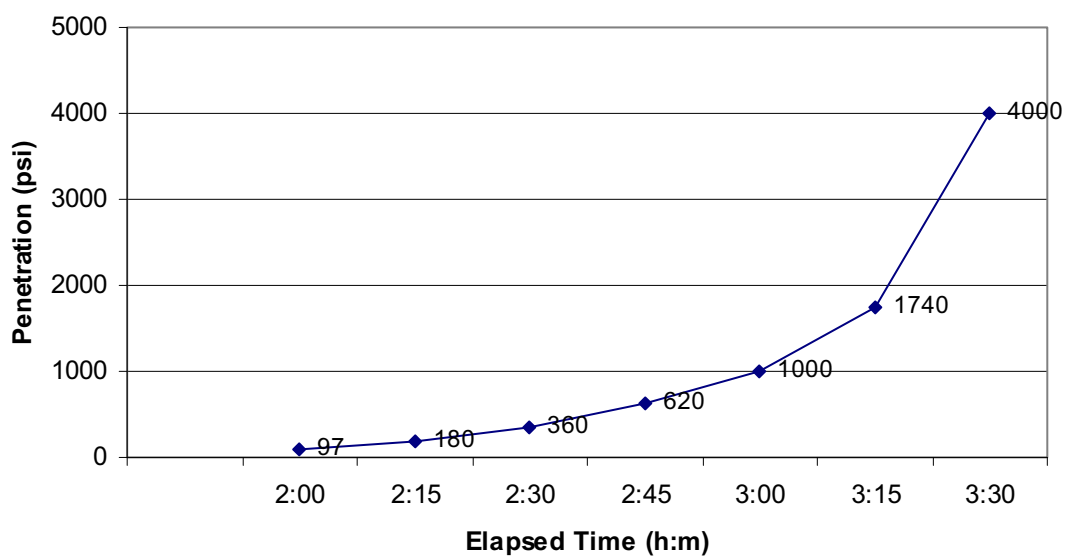
ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลุ (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
0:25:00	226	
0:40:00	575	การก่อดำระยะต้น = 0:37:00
0:55:00	1700	
1:10:00	4200	การก่อดำระยะปลาย = 1:09:00



รูปที่ 5.13 ระยะเวลาก่อดำของสัดส่วนผสม 1A23425

ตารางที่ 5.19 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A23625

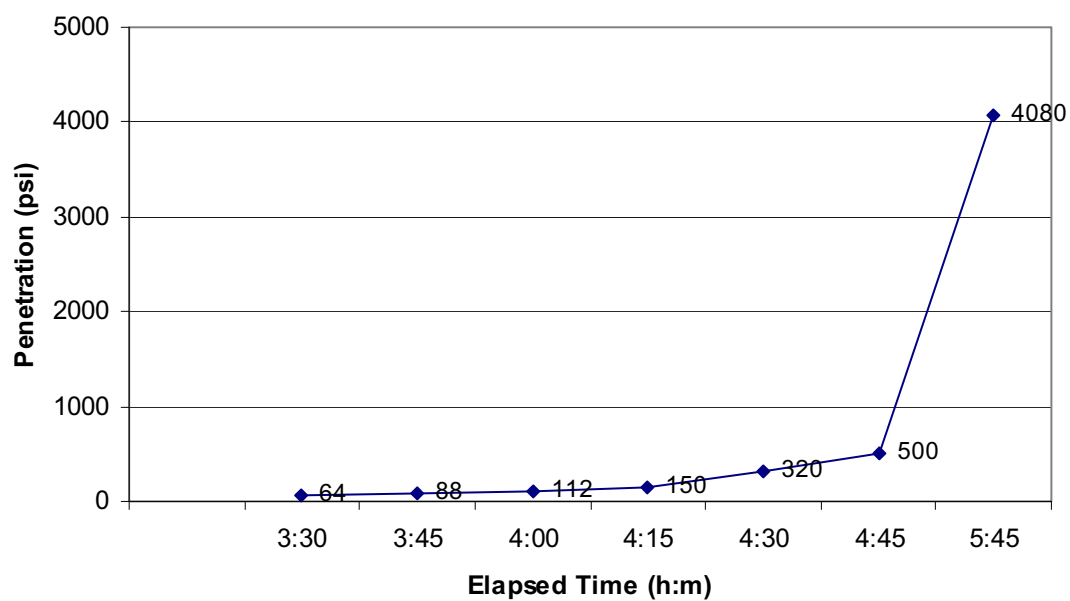
ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลวง (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
2:00:00	97	
2:15:00	180	
2:30:00	360	
2:45:00	620	การก่อดำระยะต้น = 2:38:00
3:00:00	1000	
3:15:00	1740	
3:30:00	4000	การก่อดำระยะปลาย = 3:30:00



รูปที่ 5.14 ระยะเวลาก่อดำของสัดส่วนผสม 1A23625

ตารางที่ 5.20 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A23825

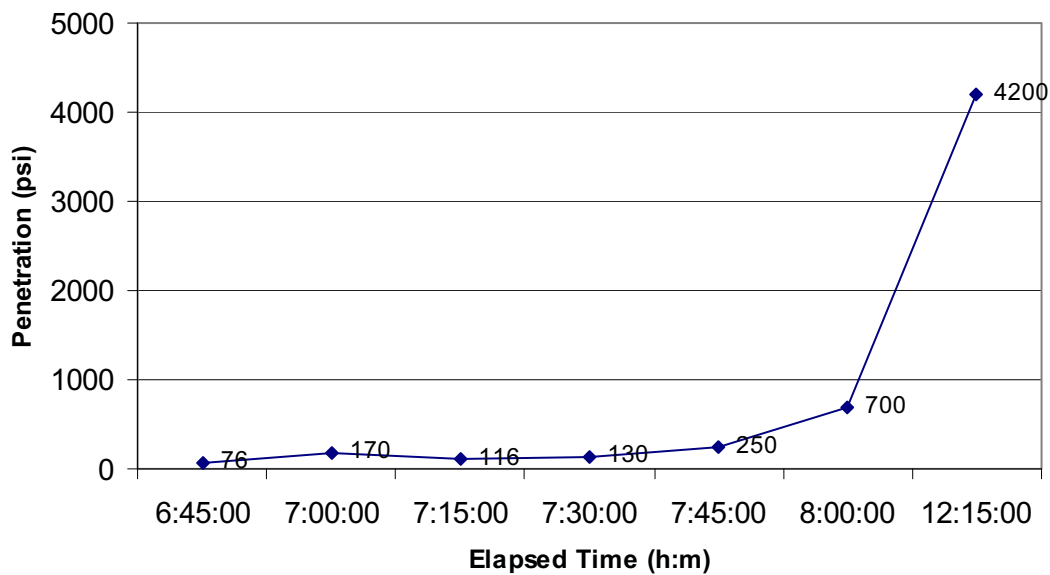
ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลุ (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
3:30:00	64	
3:45:00	88	
4:00:00	112	
4:15:00	150	
4:30:00	320	
4:45:00	500	การก่อดำระยะต้น = 4:45:00
5:45:00	4080	การก่อดำระยะปลาย = 5:45:00



รูปที่ 5.15 ระยะเวลาก่อดำของสัดส่วนผสม 1A23825

ตารางที่ 5.21 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1A231025

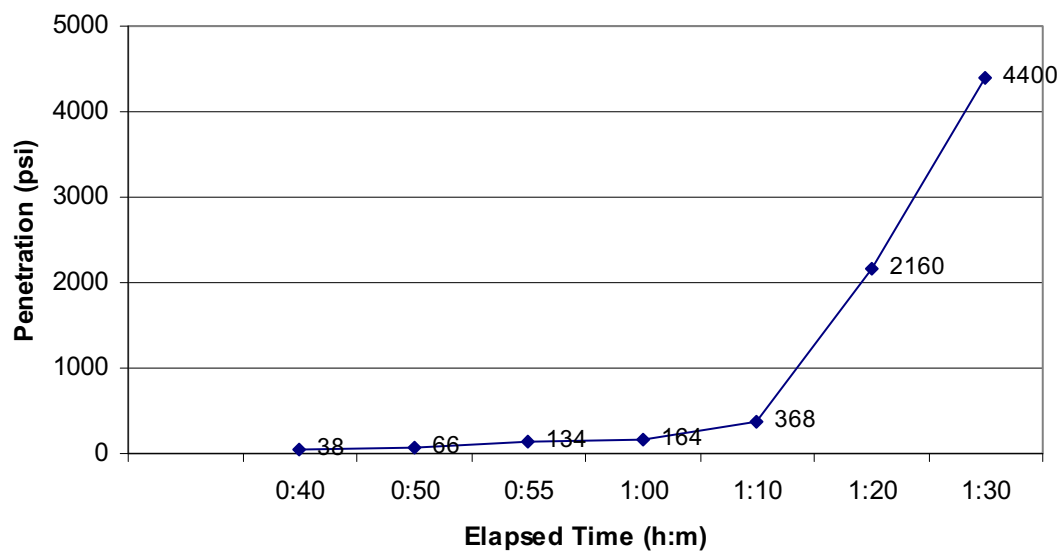
ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลุวง (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
6:45:00	76	
7:00:00	170	
7:15:00	116	
7:30:00	130	
7:45:00	250	
8:00:00	700	การก่อดำระยะต้น = 7:53
12:15:00	4200	การก่อดำระยะปลาย = 12:00



รูปที่ 5.16 ระยะเวลาก่อดำของสัดส่วนผสม 1A231025

ตารางที่ 5.22 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1B23625

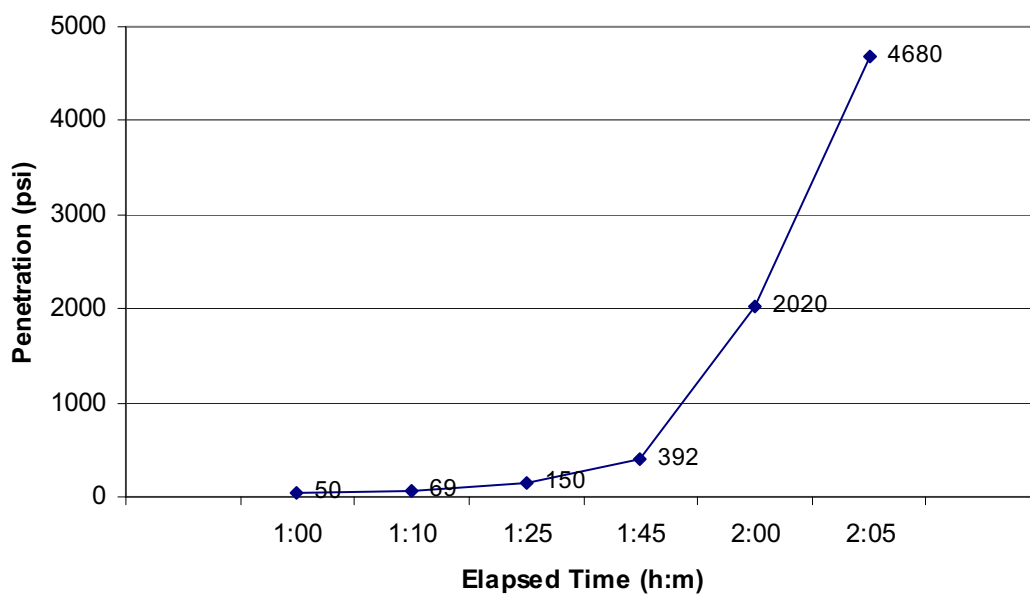
ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลุวง (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
0:40:00	38	
0:50:00	66	
0:55:00	134	
1:00:00	164	
1:10:00	368	
1:20:00	2160	การก่อดำระยะต้น = 1:11:00
1:30:00	4400	การก่อดำระยะปลาย = 1:30:00



รูปที่ 5.17 ระยะเวลาก่อดำของสัดส่วนผสม 1B23625

ตารางที่ 5.23 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1B23825

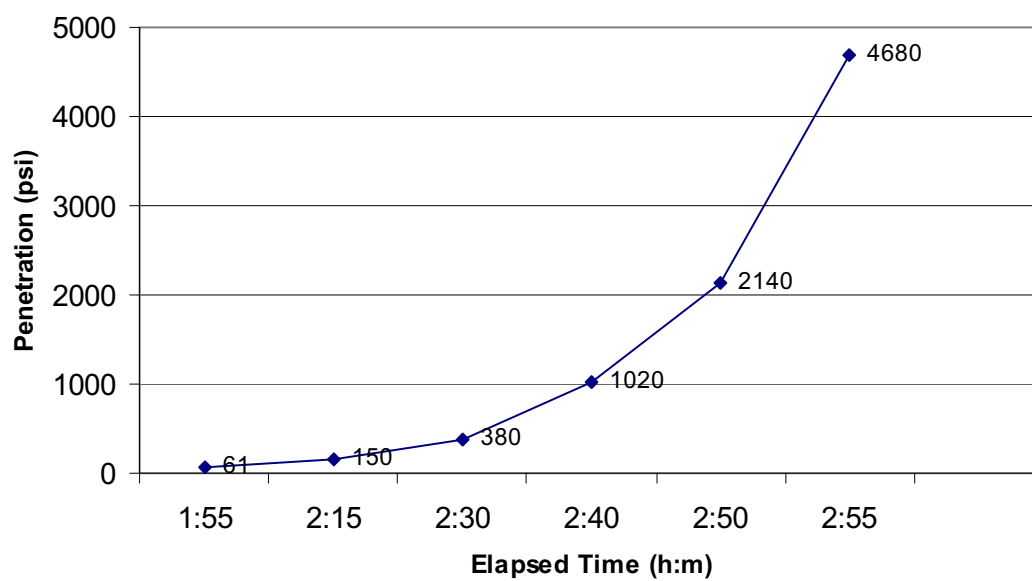
ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลุ (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
1:00:00	50	
1:10:00	69	
1:25:00	150	
1:45:00	392	
2:00:00	2020	การก่อดำระยะต้น = 1:46:00
2:05:00	4680	การก่อดำระยะปลาย = 2:04:00



รูปที่ 5.18 ระยะเวลาก่อดำของสัดส่วนผสม 1B23825

ตารางที่ 5.24 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1B231025

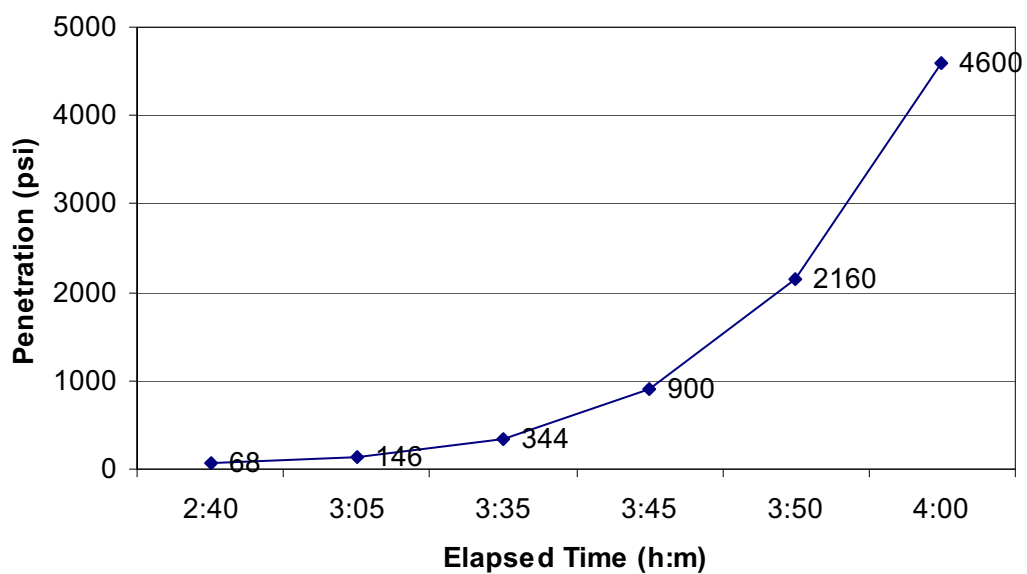
ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลวง (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
1:55:00	61	
2:15:00	150	
2:30:00	380	
2:40:00	1020	การก่อดำระยะต้น = 2:32
2:50:00	2140	
2:55:00	4680	การก่อดำระยะปลาย = 2:54



รูปที่ 5.19 ระยะเวลาก่อดำของสัดส่วนผสม 1B231025

ตารางที่ 5.25 ผลการทดลองหาระยะก่อดำของส่วนผสม 1B231225

ระยะเวลา (ชม.:นาที)	กำลังต้านทานการทะลวง (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ระยะเวลาก่อดำ (ชม.:นาที)
2:40:00	68	
3:05:00	146	
3:35:00	344	
3:45:00	900	การก่อดำระยะต้น = 3:38
3:50:00	2160	
4:00:00	4600	การก่อดำระยะปลาย = 3:57

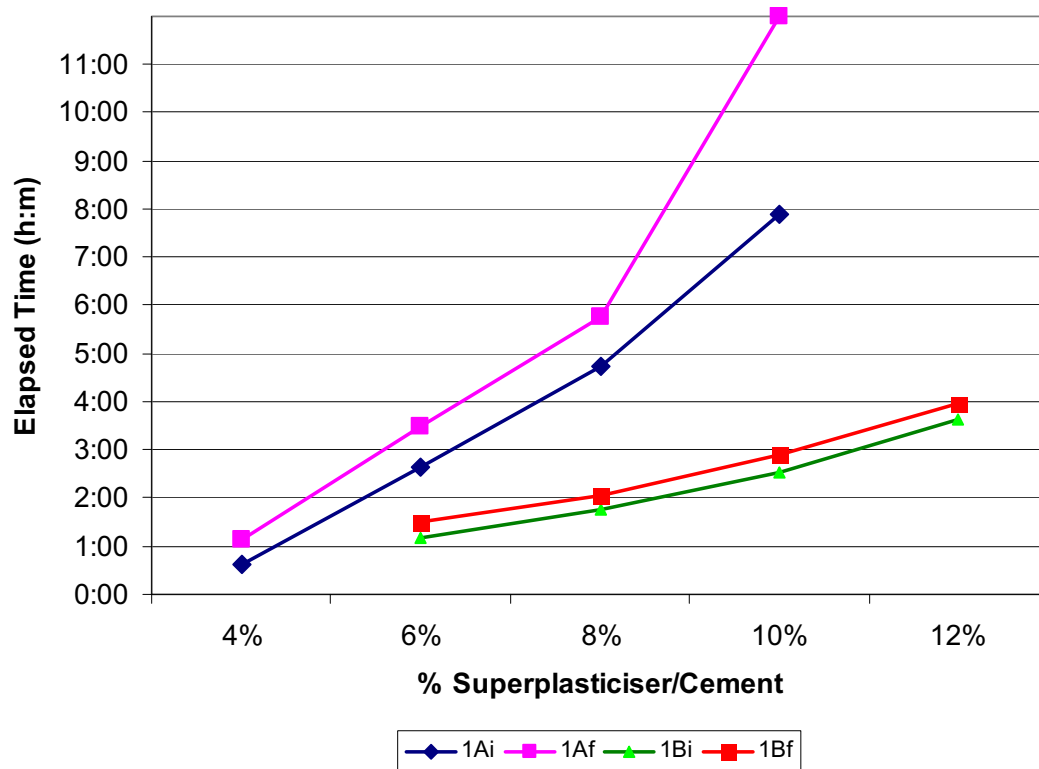


รูปที่ 5.20 ระยะเวลาก่อดำของสัดส่วนผสม 1B231225

ตารางที่ 5.26 สรุปผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่สัดส่วนร้อยละของสารลดน้ำตื้อซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ค่าต่างๆ กัน

ช่วงการก่อตัว	ระยะเวลาการก่อตัวที่ปริมาณสารลดน้ำตื้อต่างๆ (ชม:นาที)				
	4%	6%	8%	10%	12%
1Ai	0:37	2:38	4:45	7:53	> 24 hr
1Af	1:09	3:30	5:45	12:00	> 24 hr
1Bi	NH	1:11	1:46	2:32	3:38
1Bf		1:30	2:04	2:54	3:57

NH = ไม่สามารถผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันได้ (Not Homogeneous)



รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนสารลดน้ำตื้อซีเมนต์โดยน้ำหนักกับระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองหาความสัมพันธ์ของปริมาณสารลดน้ำที่มีผลระยะเวลาการก่อตัวของ UHPC โดยทดลองที่ปริมาณสารลดน้ำต่อน้ำหนักซีเมนต์ที่ร้อยละ 4 – 12 โดยเพิ่มสัดส่วนสารลดน้ำต่อซีเมนต์ครั้งละร้อยละ 2 และให้ส่วนผสมอื่น ๆ มีค่าคงที่ ซีเมนต์มีค่าคงที่ที่ 930 กิโลกรัม ซิลิกาฟุ้งมีค่าคงที่ที่ 233 กิโลกรัม (ร้อยละ 25 ของน้ำหนักซีเมนต์) w/c คงที่ที่ 0.23

ผลการทดลองกับสารลดน้ำและซิลิกาฟุ้งของ WR Grace พบว่าการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำมีผลอย่างมากต่อระยะเวลาการก่อตัวโดยเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวทั้งการก่อตัวระยะต้นและการก่อตัวระยะปลายเพิ่มขึ้น โดยหากต้องการระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายที่ 3 ชั่วโมงพบว่าควรใช้สารลดน้ำไม่เกินร้อยละ 6 ต่อน้ำหนักของซีเมนต์ และเมื่อเพิ่มสัดส่วนสารลดน้ำเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ พบว่าที่สัดส่วนสารลดน้ำต่อซีเมนต์ร้อยละ 12 พบว่าคอนกรีตไม่ก่อตัวภายใน 24 ชั่วโมง

ส่วนการทดลองกับสารลดน้ำและซิลิกาฟุ้งของ Degussa พบว่าที่ทุกปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตกับของ WR Grace แล้ว คอนกรีตที่ได้จะมีระยะเวลาการก่อตัวที่สั้นกว่ามาก ที่ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายที่ 3 ชั่วโมงจะต้องใช้ปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์ที่ร้อยละ 10 ที่ปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์ร้อยละ 6 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายมีค่า 1 ชั่วโมง 30 นาที ซึ่งสั้นกว่าของ WR Grace ถึงครึ่งหนึ่ง และที่ปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์ร้อยละ 4 ไม่สามารถผสมคอนกรีตให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้

การออกแบบสัดส่วนผสมของ UHPC จำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาณของสารลดน้ำที่ใช้ด้วย หากใช้สารลดน้ำสัดส่วนที่น้อยเกินไประยะเวลาการก่อตัวจะสั้นมากจนไม่สามารถทำงานได้ทัน หากใช้สารลดน้ำในสัดส่วนที่มากเกินไประยะเวลาการก่อตัวจะยาวมากจนทำให้ระยะเวลาการถอดแบบนานขึ้น เสียโอกาสในการหมุนเวียนแบบหล่อ และมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัด จากผลการทดลองจะเห็นว่าสารลดน้ำประเภทเดียวกัน แต่ต่างผู้ผลิตก็จะให้ระยะเวลาการก่อตัวที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมจริงจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสารลดน้ำทุกครั้ง

5.6 ผลของปริมาณซิลิกาฟูมและสารลดน้ำที่มีต่อกำลังรับแรงอัด

เพื่อพิจารณาหาสัดส่วนที่เหมาะสมของซิลิกาฟูมและสารลดน้ำที่ใช้ในการผลิต UHPC จึงศึกษาถึงผลของปริมาณซิลิกาฟูมและสารลดน้ำที่มีต่อกำลังรับแรงอัด โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณสารลดน้ำ ปริมาณซิลิกาฟูม รวมทั้ง w/c เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปริมาณของสารทั้งสอง

ค่า w/c ที่ใช้ในการทดลองมีค่าตั้งแต่ 0.21-0.25 โดยในขณะที่เพิ่ม w/c ก็ได้ลดสัดส่วนของสารลดน้ำลงเพื่อรักษาค่า workability ให้ใกล้เคียงกัน สัดส่วนผสมของคอนกรีตและค่ากำลังรับแรงอัดที่ 1, 3, 7 และ 28 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.27 ถึง 5.47 รูปที่ 5.22 ถึง 5.32 แสดงถึงการพัฒนา กำลังรับแรงอัดที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน

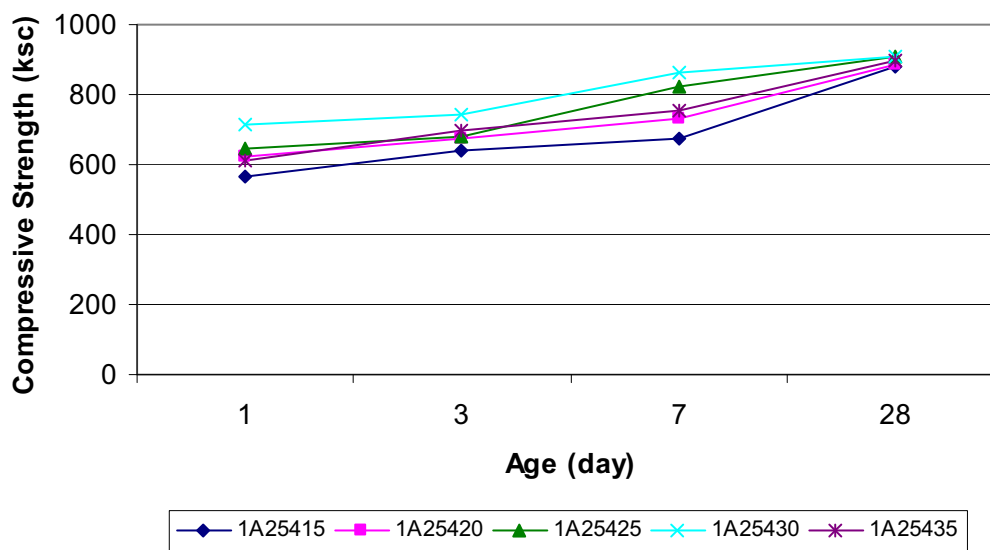
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับสัดส่วนสารลดน้ำได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.37 5.48 และรูปที่ 5.27 5.33

ตารางที่ 5.27 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.25 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 4

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาณซิลิกาฟูมต่าง ๆ				
	1A25415	1A25420	1A25425	1A25430	1A25435
ปูนซีเมนต์	930	930	930	930	930
ซิลิกาฟูม	140	186	233	279	326
มวลรวมละเอียด	1070	1020	970	920	860
สารลดน้ำ	37	37	37	37	37
น้ำจากสารลดน้ำ	27	27	27	27	27
น้ำที่ใช้ในการผสม	206	206	206	206	206
ปริมาณน้ำทั้งหมด	233	233	233	233	233
น้ำหนักรวม	2383	2379	2376	2372	2359
ร้อยละของปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์	4%	4%	4%	4%	4%
w/c	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
w/b	0.22	0.21	0.20	0.19	0.19
ร้อยละของปริมาณซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35

ตารางที่ 5.28 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.25 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 4

สูตร	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม)			
	1	3	7	28
1A25415	564	641	677	881
1A25420	622	676	734	887
1A25425	646	679	821	911
1A25430	715	743	862	909
1A25435	610	696	755	898



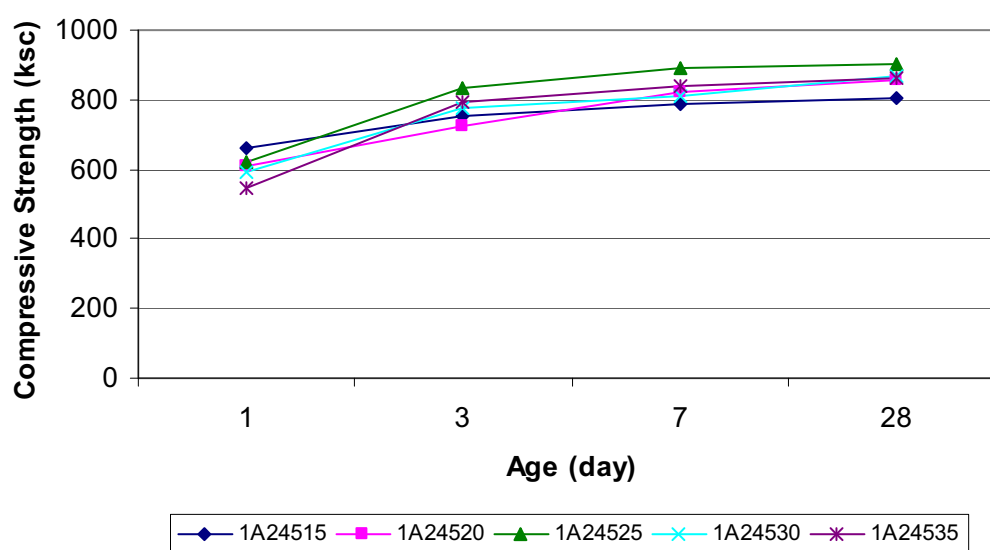
รูปที่ 5.22 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.25 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 4

ตารางที่ 5.29 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.24 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 5

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาณซิลิกาฟูมต่าง ๆ				
	1A24515	1A24520	1A24525	1A24530	1A24535
ปูนซีเมนต์	930	930	930	930	930
ซิลิกาฟูม	140	186	233	279	326
มวลรวมละเอียด	1090	1040	990	940	880
สารลดน้ำ	47	47	47	47	47
น้ำจากสารลดน้ำ	33	33	33	33	33
น้ำที่ใช้ในการผสม	190	190	190	190	190
ปริมาณน้ำทั้งหมด	223	223	223	223	223
น้ำหนักรวม	2396	2393	2389	2386	2372
ร้อยละของปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์	5%	5%	5%	5%	5%
w/c	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
w/b	0.21	0.20	0.19	0.18	0.18
ร้อยละของปริมาณซิลิกาฟูมต่อซีเมนต์	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35

ตารางที่ 5.30 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.24 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 5

สูตร	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม)			
	1	3	7	28
1A24515	661	753	786	802
1A24520	611	724	821	858
1A24525	619	832	891	905
1A24530	592	778	811	869
1A24535	543	794	841	860



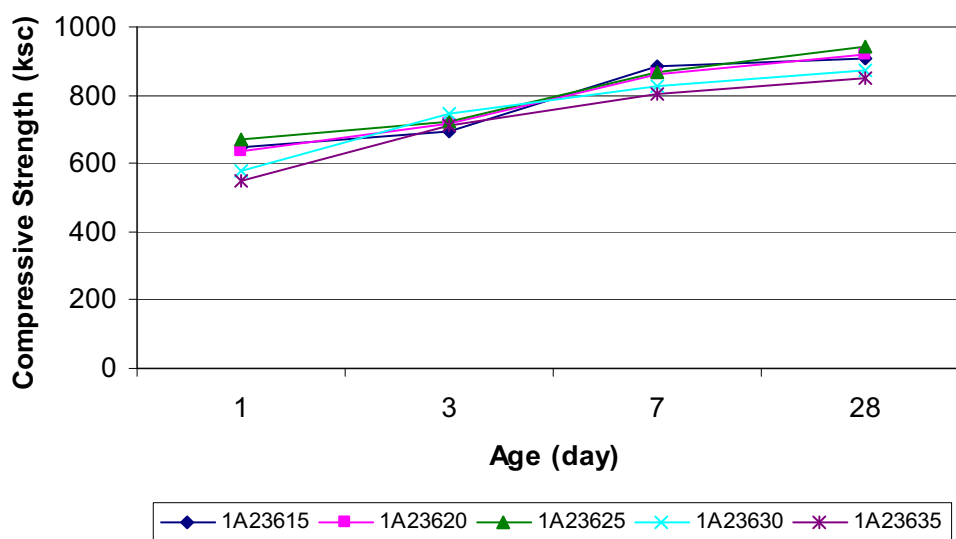
รูปที่ 5.23 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.24 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 5

ตารางที่ 5.31 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.23 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 6

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่าง ๆ				
	1A23615	1A23620	1A23625	1A23630	1A23635
ปูนซีเมนต์	930	930	930	930	930
ซิลิกาฟุ่ม	140	186	233	279	326
มวลรวมละเอียด	1100	1050	1000	960	905
สารลดน้ำ	56	56	56	56	56
น้ำจากสารลดน้ำ	40	40	40	40	40
น้ำที่ใช้ในการผสม	174	174	174	174	174
ปริมาณน้ำทั้งหมด	214	214	214	214	214
น้ำหนักรวม	2399	2396	2392	2399	2390
ร้อยละของปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์	6%	6%	6%	6%	6%
w/c	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
w/b	0.20	0.19	0.18	0.18	0.17
ร้อยละของปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35

ตารางที่ 5.32 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.23 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 6

สูตร	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม)			
	1	3	7	28
1A23615	646	691	886	907
1A23620	634	714	862	921
1A23625	671	723	865	942
1A23630	581	746	826	873
1A23635	550	711	803	849



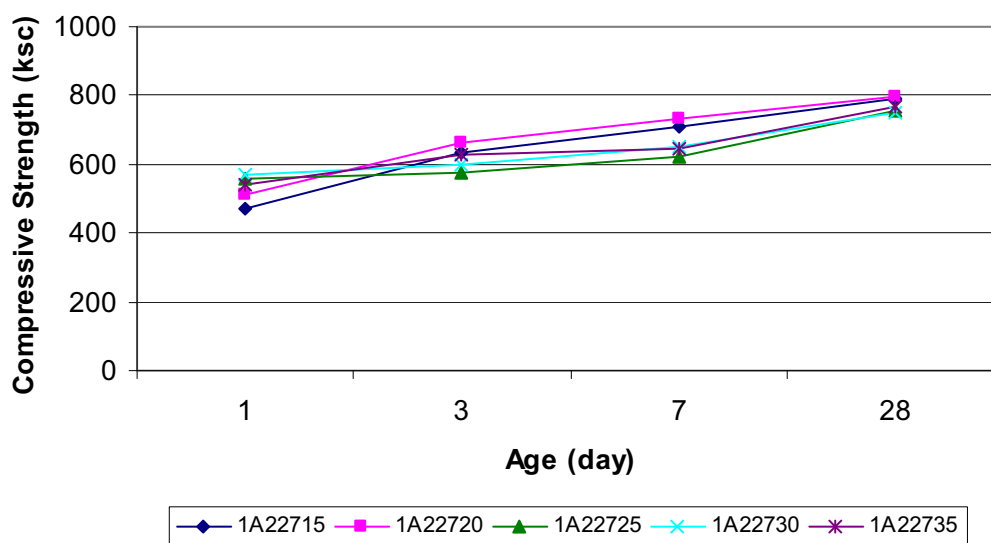
รูปที่ 5.24 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.23 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 6

ตารางที่ 5.33 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.22 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 7

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่าง ๆ				
	1A22715	1A22720	1A22725	1A22730	1A22735
ปูนซีเมนต์	930	930	930	930	930
ซิลิกาฟุ่ม	140	186	233	279	326
มวลรวมละเอียด	1120	1070	1030	970	920
สารลดน้ำ	65	65	65	65	65
น้ำจากสารลดน้ำ	47	47	47	47	47
น้ำที่ใช้ในการผสม	158	158	158	158	158
ปริมาณน้ำทั้งหมด	205	205	205	205	205
น้ำหนักรวม	2413	2409	2416	2402	2399
ร้อยละของปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์	7%	7%	7%	7%	7%
w/c	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
w/b	0.19	0.18	0.18	0.17	0.16
ร้อยละของปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35

ตารางที่ 5.34 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.22 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 7

สูตร	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม)			
	1	3	7	28
1A22715	469	633	707	788
1A22720	511	663	733	795
1A22725	559	575	623	756
1A22730	567	596	654	747
1A22735	542	629	643	766



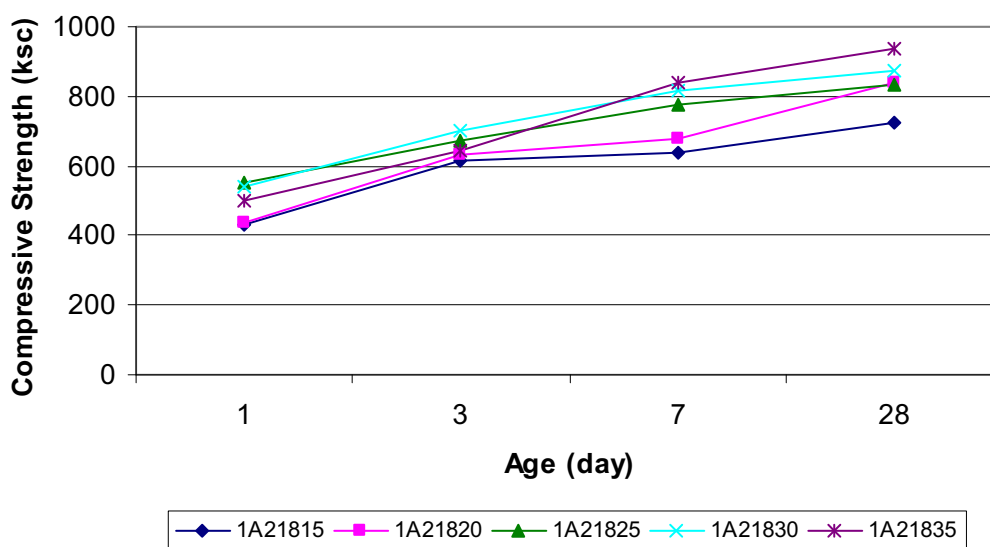
รูปที่ 5.25 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.22 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 7

ตารางที่ 5.35 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.21 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 8

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่าง ๆ				
	1A21815	1A21820	1A21825	1A21830	1A21835
ปูนซีเมนต์	930	930	930	930	930
ซิลิกาฟุ่ม	140	186	233	279	326
มวลรวมละเอียด	1140	1090	1040	990	940
สารลดน้ำ	74	74	74	74	74
น้ำจากสารลดน้ำ	53	53	53	53	53
น้ำที่ใช้ในการผสม	142	142	142	142	142
ปริมาณน้ำทั้งหมด	195	195	195	195	195
น้ำหนักรวม	2426	2422	2419	2415	2412
ร้อยละของปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์	8%	8%	8%	8%	8%
w/c	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
w/b	0.18	0.18	0.17	0.16	0.16
ร้อยละของปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35

ตารางที่ 5.36 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.21 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 8

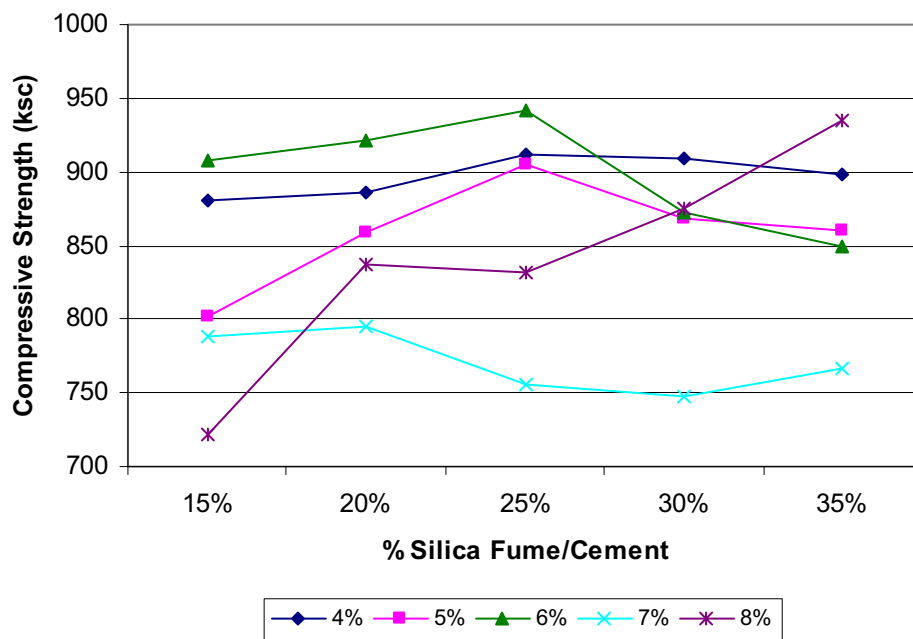
สูตร	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม)			
	1	3	7	28
1A21815	433	617	640	722
1A21820	435	633	680	837
1A21825	554	672	777	831
1A21830	539	700	817	875
1A21835	498	642	837	935



รูปที่ 5.26 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.21 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 8

ตารางที่ 5.37 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต 1A ที่ปริมาณสารลดน้ำและปริมาณซิลิกาฟุ่ม

ปริมาณซิลิกาฟุ่ม	ปริมาณสารลดน้ำ				
	4%	5%	6%	7%	8%
15%	881	802	907	788	722
20%	887	858	921	795	837
25%	911	905	942	756	831
30%	909	869	873	747	875
35%	898	860	849	766	935



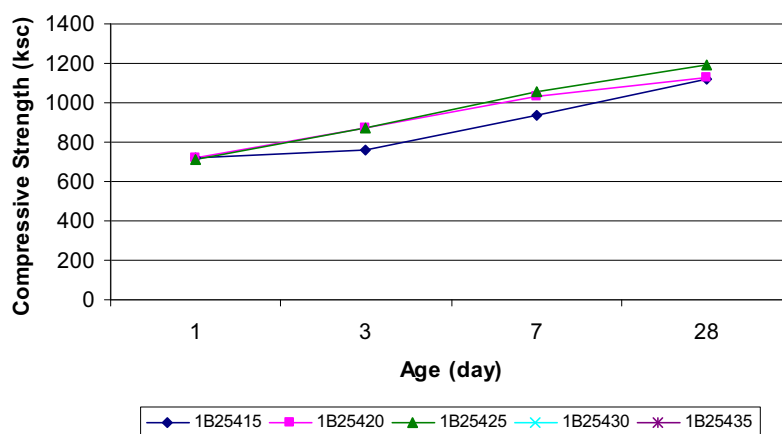
รูปที่ 5.27 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต 1B ที่ปริมาณสารลดน้ำและปริมาณซิลิกาฟุ่มต่างๆ กัน

ตารางที่ 5.38 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.25 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 4

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่าง ๆ				
	1B25415	1B25420	1B25425	1B25430	1B25435
ปูนซีเมนต์	930	930	930	930	930
ซิลิกาฟุ่ม	140	186	233	279	326
มวลรวมละเอียด	1070	1020	970	920	860
สารลดน้ำ	37	37	37	37	37
น้ำจากสารลดน้ำ	27	27	27	27	27
น้ำที่ใช้ในการผสม	206	206	206	206	206
ปริมาณน้ำทั้งหมด	233	233	233	233	233
น้ำหนักรวม	2383	2379	2376	2372	2359
ร้อยละของปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์	4%	4%	4%	4%	4%
w/c	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
w/b	0.22	0.21	0.20	0.19	0.19
ร้อยละของปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35

ตารางที่ 5.39 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.25 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 4

สูตร	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม)				% to 1A
	1	3	7	28	
1B25415	716	762	936	1123	127%
1B25420	718	869	1030	1131	128%
1B25425	715	871	1055	1192	131%
1B25430	Not homogeneous				
1B25435	Not homogeneous				



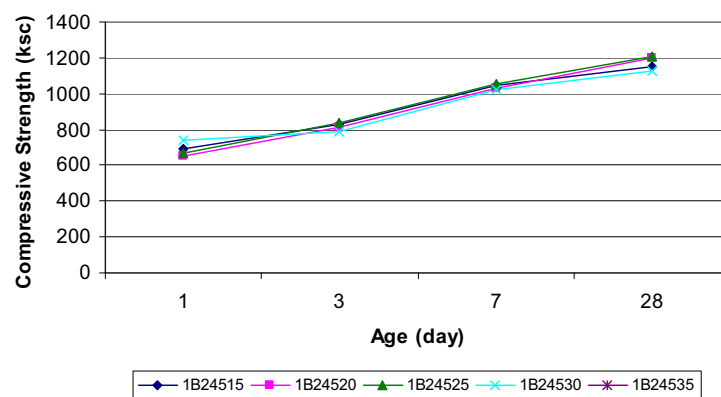
รูปที่ 5.28 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.25 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 4

ตารางที่ 5.40 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.24 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 5

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาณซิลิกาฟูมต่าง ๆ				
	1B24515	1B24520	1B24525	1B24530	1B24535
ปูนซีเมนต์	930	930	930	930	930
ซิลิกาฟูม	140	186	233	279	326
มวลรวมละเอียด	1090	1040	990	940	880
สารลดน้ำ	47	47	47	47	47
น้ำจากสารลดน้ำ	33	33	33	33	33
น้ำที่ใช้ในการผสม	190	190	190	190	190
ปริมาณน้ำทั้งหมด	223	223	223	223	223
น้ำหนักรวม	2396	2393	2389	2386	2372
ร้อยละของปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์	5%	5%	5%	5%	5%
w/c	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
w/b	0.21	0.20	0.19	0.18	0.18
ร้อยละของปริมาณซิลิกาฟูมต่อซีเมนต์	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35

ตารางที่ 5.41 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.24 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 5

สูตร	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม)				% to 1A
	1	3	7	28	
1B24515	693	830	1047	1152	144%
1B24520	650	814	1026	1196	139%
1B24525	668	836	1058	1211	134%
1B24530	740	791	1021	1126	130%
1B24535	Not homogeneous				



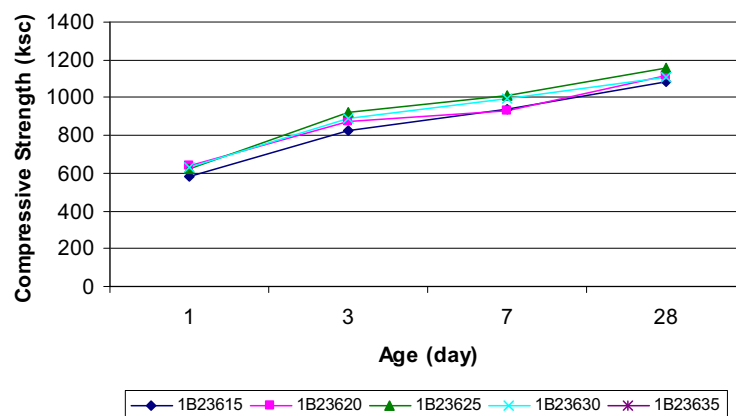
รูปที่ 5.29 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.24 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 5

ตารางที่ 5.42 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.23 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 6

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่าง ๆ				
	1B23615	1B23620	1B23625	1B23630	1B23635
ปูนซีเมนต์	930	930	930	930	930
ซิลิกาฟุ่ม	140	186	233	279	326
มวลรวมละเอียด	1100	1050	1000	960	905
สารลดน้ำ	56	56	56	56	56
น้ำจากสารลดน้ำ	40	40	40	40	40
น้ำที่ใช้ในการผสม	174	174	174	174	174
ปริมาณน้ำทั้งหมด	214	214	214	214	214
น้ำหนักรวม	2399	2396	2392	2399	2390
ร้อยละของปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์	6%	6%	6%	6%	6%
w/c	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
w/b	0.20	0.19	0.18	0.18	0.17
ร้อยละของปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35

ตารางที่ 5.43 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.23 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 6

สูตร	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม)				% to 1A
	1	3	7	28	
1B23615	585	829	935	1085	120%
1B23620	640	876	931	1114	121%
1B23625	623	921	1009	1160	123%
1B23630	628	887	998	1112	127%
1B23635	Not homogeneous				



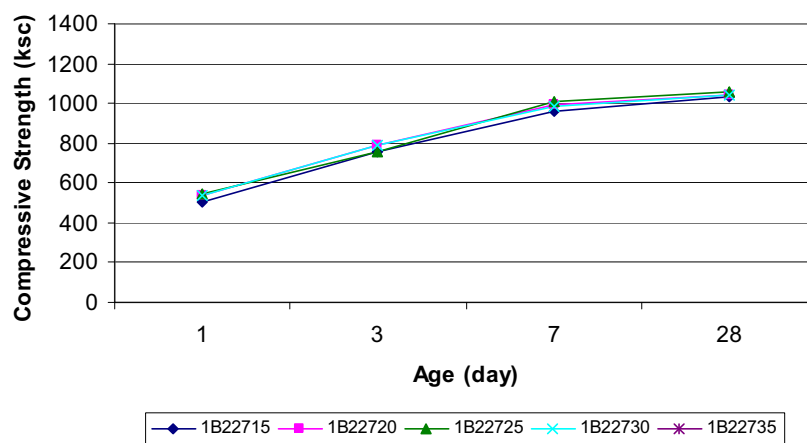
รูปที่ 5.30 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.23 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 6

ตารางที่ 5.44 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.22 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 7

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่าง ๆ				
	1B22715	1B22720	1B22725	1B22730	1B22735
ปูนซีเมนต์	930	930	930	930	930
ซิลิกาฟุ่ม	140	186	233	279	326
มวลรวมละเอียด	1120	1070	1030	970	920
สารลดน้ำ	65	65	65	65	65
น้ำจากสารลดน้ำ	47	47	47	47	47
น้ำที่ใช้ในการผสม	158	158	158	158	158
ปริมาณน้ำทั้งหมด	205	205	205	205	205
น้ำหนักรวม	2413	2409	2416	2402	2399
ร้อยละของปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์	7%	7%	7%	7%	7%
w/c	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
w/b	0.19	0.18	0.18	0.17	0.16
ร้อยละของปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35

ตารางที่ 5.45 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.22 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 7

สูตร	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม)				% to 1A
	1	3	7	28	
1B22715	507	757	961	1030	131%
1B22720	539	792	989	1038	131%
1B22725	544	758	1006	1060	140%
1B22730	535	787	988	1041	139%
1B22735	Not homogenous				



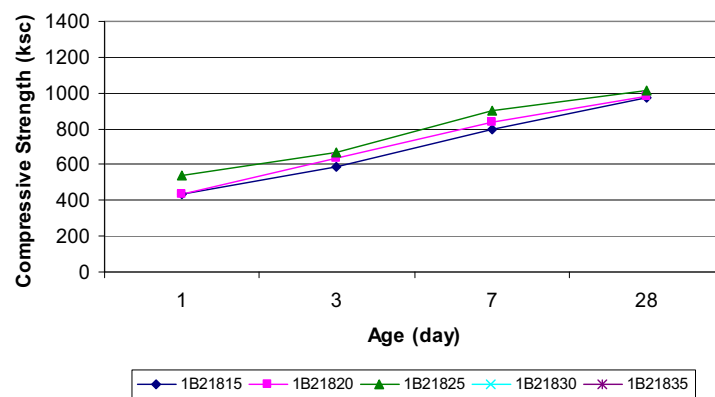
รูปที่ 5.31 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.22 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 7

ตารางที่ 5.46 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c 0.21 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 8

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่าง ๆ				
	1B21815	1B21820	1B21825	1B21830	1B21835
ปูนซีเมนต์	930	930	930	930	930
ซิลิกาฟุ่ม	140	186	233	279	326
มวลรวมละเอียด	1140	1090	1040	990	940
สารลดน้ำ	74	74	74	74	74
น้ำจากสารลดน้ำ	53	53	53	53	53
น้ำที่ใช้ในการผสม	142	142	142	142	142
ปริมาณน้ำทั้งหมด	195	195	195	195	195
น้ำหนักรวม	2426	2422	2419	2415	2412
ร้อยละของปริมาณสารลดน้ำต่อซีเมนต์	8%	8%	8%	8%	8%
w/c	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
w/b	0.18	0.18	0.17	0.16	0.16
ร้อยละของปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35

ตารางที่ 5.47 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.21 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 8

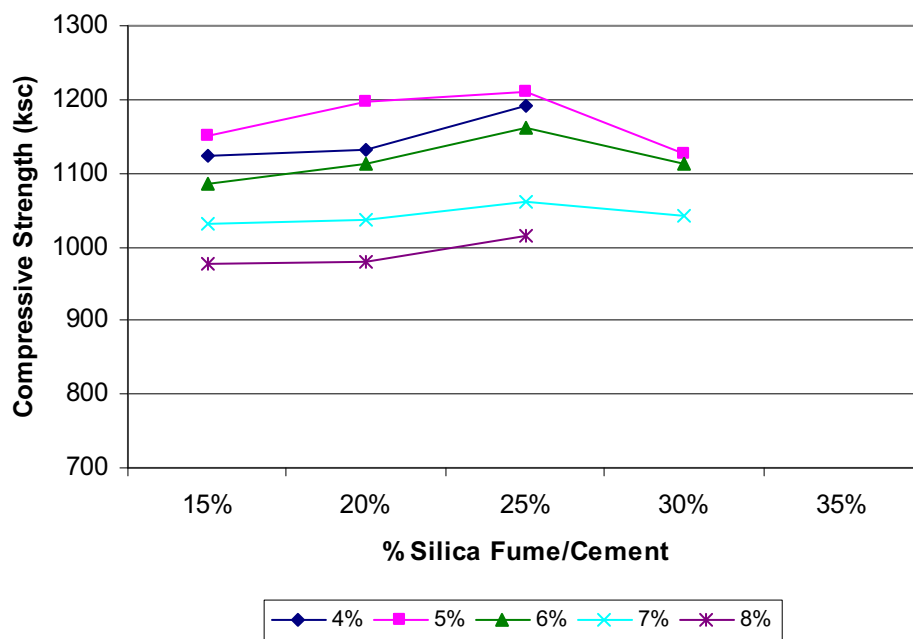
สูตร	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม)				% to 1A
	1	3	7	28	
1B21815	433	591	793	977	135%
1B21820	435	633	833	979	117%
1B21825	541	672	901	1015	122%
1B21830	Not homogenous				
1B21835	Not homogenous				



รูปที่ 5.32 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ w/c 0.21 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 8

ตารางที่ 5.48 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต 1B ที่ปริมาณสารลดน้ำและ
ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่างๆ กัน

ปริมาณซิลิกาฟุ่ม	ปริมาณสารลดน้ำ				
	4%	5%	6%	7%	8%
15%	1123	1152	1085	1030	977
20%	1131	1196	1114	1038	979
25%	1192	1211	1160	1060	1015
30%		1126	1112	1041	
35%					



รูปที่ 5.33 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต 1B
ที่ปริมาณสารลดน้ำและปริมาณซิลิกาฟุ่มต่างๆ กัน

วิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับคอนกรีต 1A ที่สัดส่วนสารลดน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 4,5, และ 6 พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน มีค่าสูงสุดที่สัดส่วนซิลิกาฟุ่มร้อยละ 25 โดยค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ค่าสารลดน้ำต่อซีเมนต์ร้อยละ 6 ส่วนที่สัดส่วนสารลดน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 7 และ 8 พบว่ารูปแบบความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดแตกต่างไปจากคอนกรีตที่สัดส่วนสารลดน้ำต่อซีเมนต์ร้อยละ 4 5 และ 6 โดยที่ปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 8 กำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์และโดยมีค่าสูงสุดที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 35

ที่สัดส่วนสารลดน้ำร้อยละ 4, 5 และ 6 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันเป็นรูปแบบเดียวกัน คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ร้อยละ 25 โดยที่สัดส่วนสารลดน้ำร้อยละ 6 ซึ่งมีค่า w/c เท่ากับ 0.23 สามารถทำกำลังรับแรงอัดที่ 28 วันได้สูงสุดเท่ากับ 942 กก./ตร.ซม ที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 25 ในขณะที่ที่สัดส่วนสารลดน้ำร้อยละ 8 ซึ่งมีค่า w/c เท่ากับ 0.23 สามารถทำกำลังรับแรงอัดที่ 28 วันได้สูงสุดเท่ากับ 935 กก./ตร.ซม ที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 35 ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้มีค่าที่แตกต่างกันไม่มากนักแต่ที่สัดส่วนสารลดน้ำร้อยละ 6 และปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 25 มีต้นทุนการผลิตที่ประหยัดกว่าจึงเลือกใช้สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 6 และปริมาณซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 25 ในการพัฒนา UHPC ต่อไป

สำหรับคอนกรีต 1B พบว่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันที่ปริมาณสารลดน้ำต่างๆ เป็นไปในรูปแบบคล้ายๆ กันคือ มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 28 วันที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 25 โดยที่ปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 4 ซึ่งมีค่า w/c 0.25 และ ปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 8 ซึ่งมีค่า w/c 0.21 พบว่า ที่ปริมาณซิลิกาฟุ่ม 30% และ 35% ไม่สามารถผสมคอนกรีตให้เป็นเนื้อเดียวกันได้ และที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 35 ของทุกส่วนผสมไม่สามารถผสมคอนกรีตให้เป็นเนื้อเดียวกันได้

กำลังรับแรงอัดสูงสุดของส่วนผสม 1B เกิดขึ้นที่ปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 5 ที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 25 โดยมีค่าสูงถึง 1211 กก./ตร.ซม และส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงรองลงมาคือที่ปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 6 ที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 25 เช่นกัน ซึ่งจะเห็นว่าทั้งคอนกรีต 1A และ 1B จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 25 สำหรับส่วนผสม 1B นี้ได้ลองทำการพัฒนา UHPC ที่ปริมาณสารลดน้ำทั้งร้อยละ 5 และ 6 ต่อไป

เป็นที่น่าสนใจว่าคอนกรีต 1B ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันสูงกว่าคอนกรีต 1 A ที่ทุกสัดส่วนผสมโดยมีค่าความแตกต่างระหว่างร้อยละ 17 - 44

5.7 ผลของสัดส่วนปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวมอัดแน่น

สัดส่วนของปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวมอัดแน่นหรือ γ ผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต เพื่อให้สามารถกำหนดช่วงของ γ ได้จึงได้ศึกษาถึงสัดส่วนผสมของ RPC และ UHPC ของ S.Colleparidi และคณะ(1997) F. de Larrard และ T. Sedran(1999) และ Piere Y. Blais และ Marco Couture(1999) ซึ่งใช้สัดส่วนผสมที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 5.49

ตารางที่ 5.49 สัดส่วนผสมของ RPC และ UHPC

วัตถุดิบ	หน่วย น้ำหนัก	RPC, Piere Y.Blais (1999)		UHPC,F.de Larrard (1994)		RPC,Colleparidi (1997)	
		Weight (kg)	Volume (litres)	Weight (kg)	Volume (litres)	Weight (kg)	Volume (litres)
ปูนซีเมนต์	3.15	710	225.40	1149	364.76	934	296.51
ซิลิกาฟูม	2.2	230	104.55	357	162.27	234	106.36
ทราย	2.65	1010	381.13	725	273.58	1030	388.68
ควอทซ์ละเอียด	2.65	210	79.25	-	-	-	-
สารลดน้ำ	1.02	19	18.63	22.1	21.64	13	12.75
น้ำ	1	200	200.00	200	200.00	215	215.00
เส้นใยเหล็ก	7.85	190	24.20	-	-	187	23.82
รวม		2569.00	1033.15	2453.08	1022.26	2613.00	1043.12
w/c		0.28		0.17		0.23	
w/b		0.21		0.13		0.18	
sp/c		0.027		0.019		0.014	
sf/c		0.32		0.31		0.25	

เพื่อหาค่า γ จำเป็นที่จะต้องทราบปริมาตรของช่องว่างของมวลรวมอัดแน่น ซึ่งสามารถหาได้โดยนำมวลรวมที่ใช้ในการทดลองใส่เข้าไปในภาชนะที่มีปริมาตรที่แน่นอนครึ่งละ 1/3 ของปริมาตร และทำการอัดแน่นด้วยการเขย่าด้วย Flow Table ที่ใช้ในการวัดการไหลแผ่ของมอร์ต้าด้วย Flow Table ตามมาตรฐาน ASTM C230 ทำการเคาะด้วย Flow Table 50 ครั้งต่อชั้น ซึ่งจะมีการเติมมวลรวมและการเคาะรวม 3 ครั้งจนเต็มภาชนะ จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักเปรียบเทียบกับความถ่วงจำเพาะของมวลรวม ก็จะได้ปริมาตรเนื้อแท้ของมวลรวมอัดแน่นและส่วนที่เหลือคือช่องว่างภายในมวลรวม จากการทดลองสามารถหาค่าความหนาแน่นอัดแน่นของมวลรวมที่ใช้ได้เท่ากับ 0.6054 ดังนั้นปริมาตรช่องว่างของมวลรวมที่ใช้ในการทดลองนี้จึงมีค่าเท่ากับ 0.3946

เพื่อความสะดวกในการหาค่า γ สำหรับทรายที่ใช้ในการทดลองจึงได้ทำเป็นตารางสำเร็จรูปขึ้นมาเพื่อความสะดวกในการใช้งาน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.50

ตารางที่ 5.50 น้ำหนักของทรายที่ค่า γ ต่าง ๆ เมื่อทรายมีความหนาแน่นอัดแน่น = 0.6054

Γ (1)	Vp (2)	Vs (3)	Vp+Vs (4)= (2)+(3)	Vp (5)=(2)/(4)	Vs (6)=(3)/(4)	Ws (7)=(6)*2.65
100	394.6	605.4	1000.0	394.6	605.4	1604.3
140	552.4	605.4	1157.8	477.1	522.9	1385.6
160	631.4	605.4	1236.8	510.5	489.5	1297.2
180	710.3	605.4	1315.7	539.9	460.1	1219.4
200	789.2	605.4	1394.6	565.9	434.1	1150.4
220	868.1	605.4	1473.5	589.2	410.8	1088.7
240	947.1	605.4	1552.4	610.0	390.0	1033.4
260	1026.0	605.4	1631.4	628.9	371.1	983.4
280	1104.9	605.4	1710.3	646.0	354.0	938.0
300	1183.8	605.4	1789.2	661.6	338.4	896.7
320	1262.7	605.4	1868.1	675.9	324.1	858.8
340	1341.7	605.4	1947.1	689.1	310.9	824.0
360	1420.6	605.4	2026.0	701.2	298.8	791.9
380	1499.5	605.4	2104.9	712.4	287.6	762.2
400	1578.4	605.4	2183.8	722.8	277.2	734.6
420	1657.3	605.4	2262.7	732.4	267.6	709.0
440	1736.3	605.4	2341.7	741.5	258.5	685.1
460	1815.2	605.4	2420.6	749.9	250.1	662.8

เมื่อพิจารณาส่วนผสมของ RPC ตามที่ S.Collepari และคณะ (1997) และ Piere Y. Blais และ Marco Couture (1999) ได้พัฒนามาพบว่าน้ำหนักของมวลรวมละเอียดจะอยู่ระหว่าง 1030 – 1220 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตารางจะพบว่าค่า γ ของทั้งสองอยู่ในช่วง 180-240 แต่งานทดลองของทั้งสองมีการใช้เส้นใยเหล็กกร่วมด้วย

การทดลองจึงได้เลือกใช้ค่า γ เท่ากับ 160, 190, 210, 230 และ 260 เพื่อให้ครอบคลุมค่า γ ของงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา

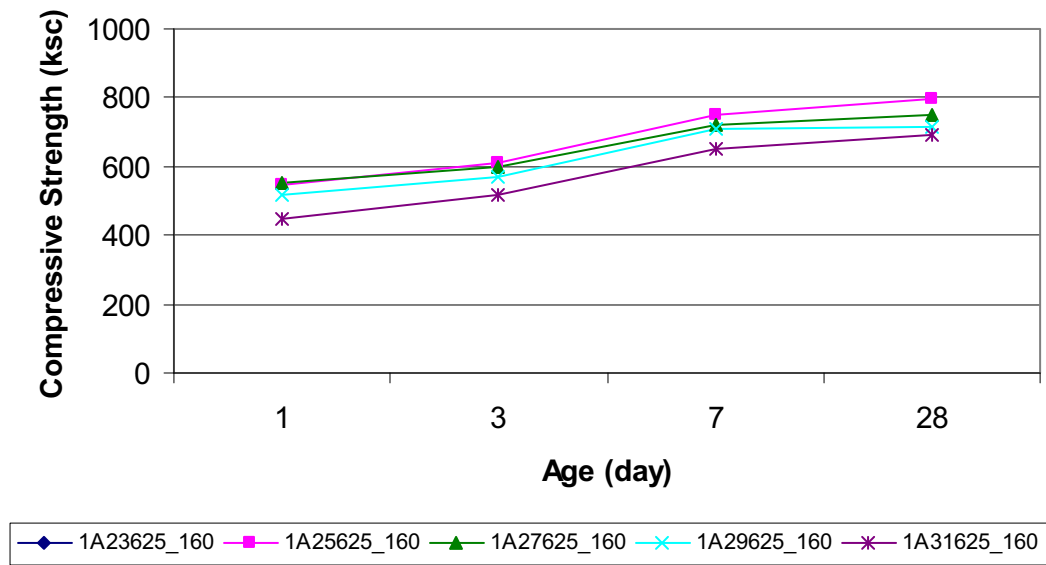
ปริมาณซิลิกาฟูมใช้ที่ร้อยละ 25 และสารลดน้ำใช้ที่ร้อยละ 6 พร้อมทั้งทดสอบที่ค่า w/c ตั้งแต่ 0.23, 0.25, 0.27 0.29 และ 0.31 เพื่อดูผลของปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นที่มีต่อกำลังรับแรงอัด พร้อมทั้งทำการวัดความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตด้วย Flow Table ตามมาตรฐาน ASTM C230 ในการคำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้จริงในการทดลองนี้ ได้บวกชดเชยน้ำส่วนที่ถูกด้วยซ้ำโดยมวลรวมไว้ที่ร้อยละ 1 สูงกว่าค่าการดูดซับน้ำของมวลรวมที่มีค่า 0.85 อยู่เล็กน้อย

ตารางที่ 5.51 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 160

ส่วนผสม	สูตร				
	1A23625_160	1A25625_160	1A27625_160	1A29625_160	1A31625_160
ปูนซีเมนต์	759	737	717	698	679
ซิลิกาฟูม	190	184	179	174	170
ทราย	1280	1280	1280	1280	1280
สารลดน้ำ	46	44	43	42	41
น้ำ	144	155	165	174	183
น้ำหนักรวม	2419	2401	2384	2368	2353
ชดเชยน้ำที่ถูกดูดซับด้วยทราย	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
ปริมาณน้ำทั้งหมด	157	168	178	187	196
น้ำหนักปรับแก้	2431	2414	2397	2381	2366
w/c	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31

ตารางที่ 5.52 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 160

สูตร	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม)			
	1	3	7	28
1A23625_160	Not homogeneous			
1A25625_160	547	612	750	799
1A27625_160	555	600	720	751
1A29625_160	516	570	709	716
1A31625_160	445	518	654	695



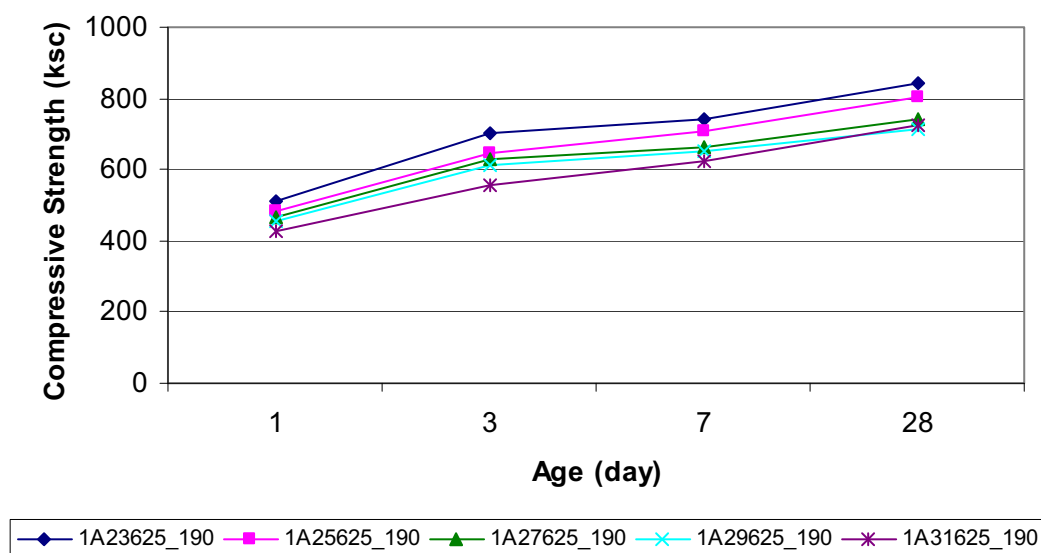
รูปที่ 5.34 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 160

ตารางที่ 5.53 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 190

ส่วนผสม	สูตร				
	1A23625_190	1A25625_190	1A27625_190	1A29_625_190	1A31625_190
ปูนซีเมนต์	809	786	764	743	724
ซิลิกาฟูม	202	196	191	186	181
ทราย	1190	1190	1190	1190	1190
สารลดน้ำ	49	47	46	45	43
น้ำ	154	165	176	186	195
น้ำหนักรวม	2403	2385	2367	2350	2334
ขดเชยน้ำที่ถูกดูดซับด้วยทราย	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9
ปริมาณน้ำทั้งหมด	166	177	188	198	207
น้ำหนักปรับแก้	2415	2396	2379	2362	2346
W/C	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31

ตารางที่ 5.54 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 190

สูตร	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม)			
	1	3	7	28
1A23625_190	513	703	741	841
1A25625_190	481	647	707	801
1A27625_190	465	628	663	744
1A29625_190	454	615	651	716
1A31625_190	426	556	621	723



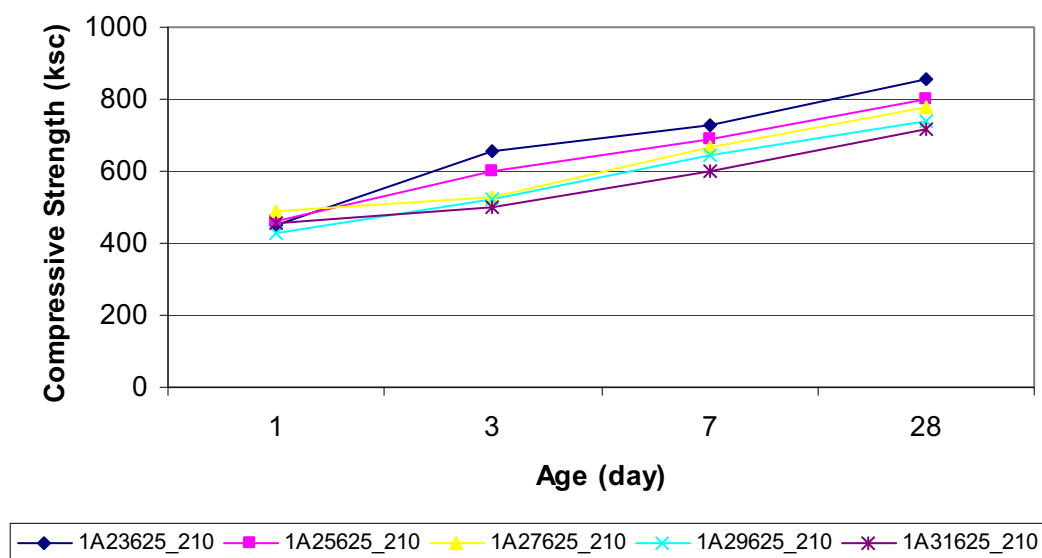
รูปที่ 5.35 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 190

ตารางที่ 5.55 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 210

ส่วนผสม	สูตร				
	1A23625_210	1A25625_210	1A27625_210	1A29625_210	1A31625_210
ปูนซีเมนต์	850	826	803	781	761
ซิลิกาฟูม	213	206	201	195	190
ทราย	1115	1115	1115	1115	1115
สารลดน้ำ	51	50	48	47	46
น้ำ	162	173	185	195	205
น้ำหนักรวม	2390	2370	2352	2334	2317
สัดส่วนน้ำที่ถูกดูดซับด้วยทราย	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2
ปริมาณน้ำทั้งหมด	173	185	196	207	217
น้ำหนักปรับแก้	2401	2381	2363	2345	2328
w/c	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31

ตารางที่ 5.56 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 210

สูตร	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม)			
	1	3	7	28
1A23625_210	451	656	727	858
1A25625_210	459	602	688	802
1A27625_210	487	529	665	781
1A29625_210	427	523	646	741
1A31625_210	453	501	600	717



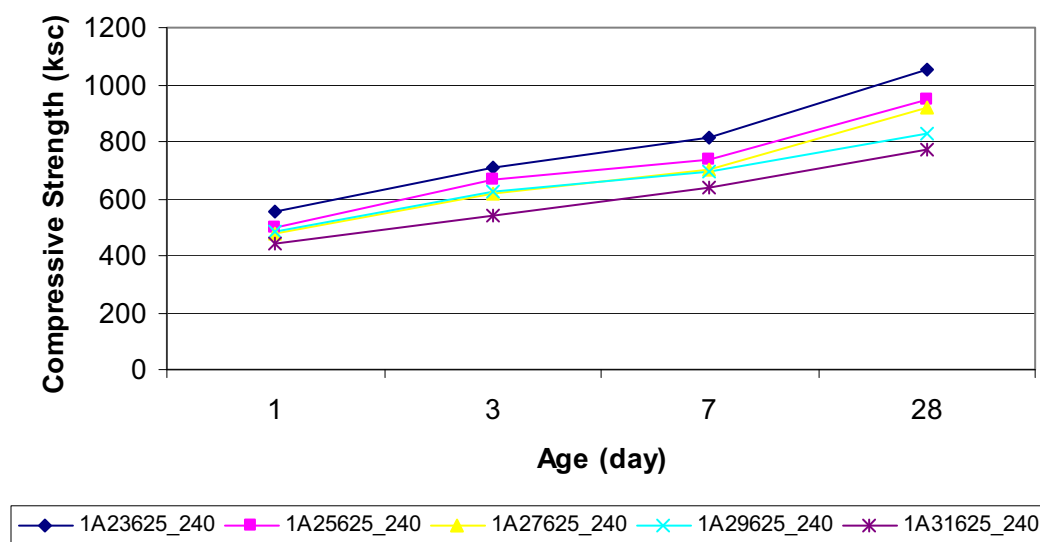
รูปที่ 5.36 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 210

ตารางที่ 5.57 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 240

ส่วนผสม	สูตร				
	1A23625_240	1A25625_240	1A27625_240	1A29635_240	1A31625_240
ปูนซีเมนต์	888	863	839	816	795
ซิลิกาฟูม	222	216	210	204	199
ทราย	1047	1047	1047	1047	1047
สารลดน้ำ	53	52	50	49	48
น้ำ	169	181	193	204	215
น้ำหนักรวม	2379	2359	2339	2321	2303
ชดเชยน้ำที่ถูกดูดซับด้วยทราย	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5
ปริมาณน้ำทั้งหมด	179	192	203	215	225
น้ำหนักปรับแก้	2390	2369	2350	2331	2313
W/C	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31

ตารางที่ 5.58 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 240

สูตร	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม)			
	1	3	7	28
1A23625_240	552	709	812	1053
1A25625_240	498	669	737	945
1A27625_240	479	619	703	923
1A29625_240	487	621	693	829
1A31625_240	439	542	639	773



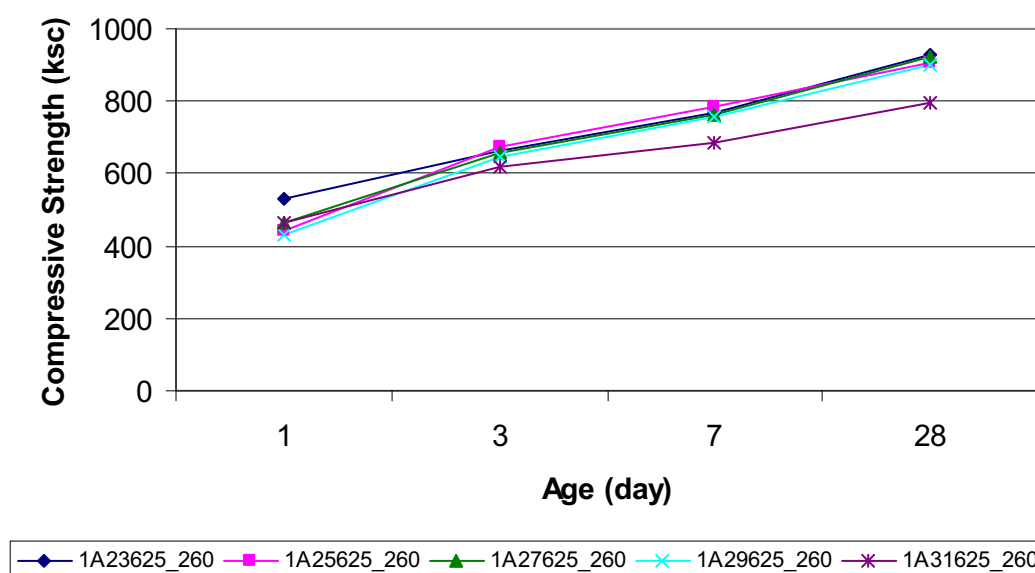
รูปที่ 5.37 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 240

ตารางที่ 5.59 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 260

ส่วนผสม	สูตร				
	1A23625_260	1A25625_260	1A27625_260	1A29625_260	1A31625_260
ปูนซีเมนต์	921	894	870	846	824
ซิลิกาฟูม	230	224	217	212	206
ทราย	988	988	988	988	988
สารลดน้ำ	55	54	52	51	49
น้ำ	175	188	200	212	222
น้ำหนักรวม	2369	2347	2327	2308	2290
สัดส่วนน้ำที่ถูกต้องด้วยทราย	9.88	9.88	9.88	9.88	9.88
ปริมาณน้ำทั้งหมด	185	198	210	221	232
น้ำหนักปรับแก้	2379	2357	2337	2318	2299
W/C	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31

ตารางที่ 5.60 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 260

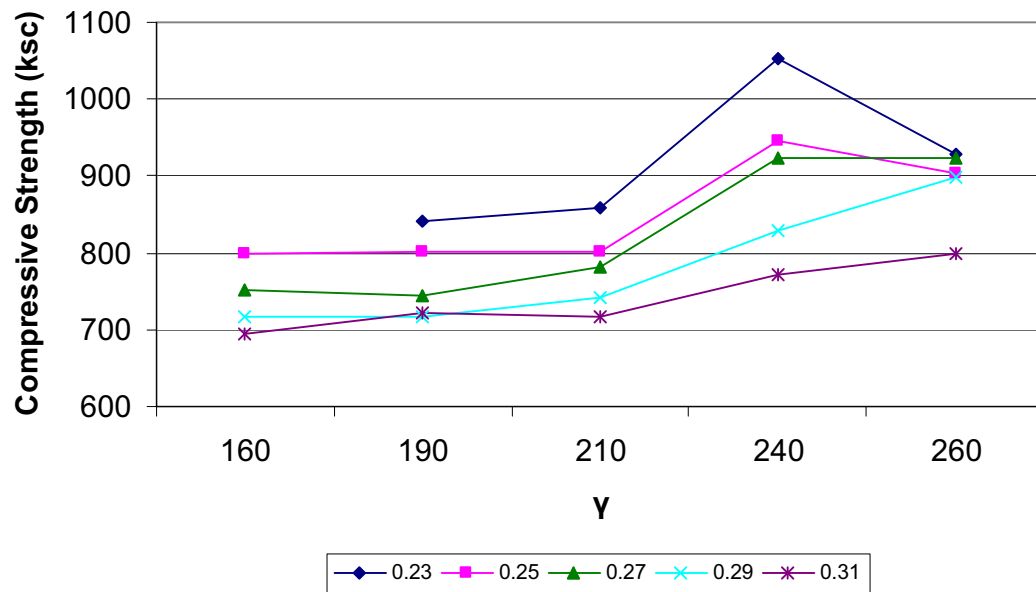
สูตร	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม)			
	1	3	7	28
1A23625_260	530	661	769	929
1A25625_260	442	675	782	904
1A27625_260	463	656	762	923
1A29625_260	432	645	756	898
1A31625_260	466	621	687	798



รูปที่ 5.38 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 260

ตารางที่ 5.61 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่ 28 วันกับ γ ที่ w/c ต่างๆ

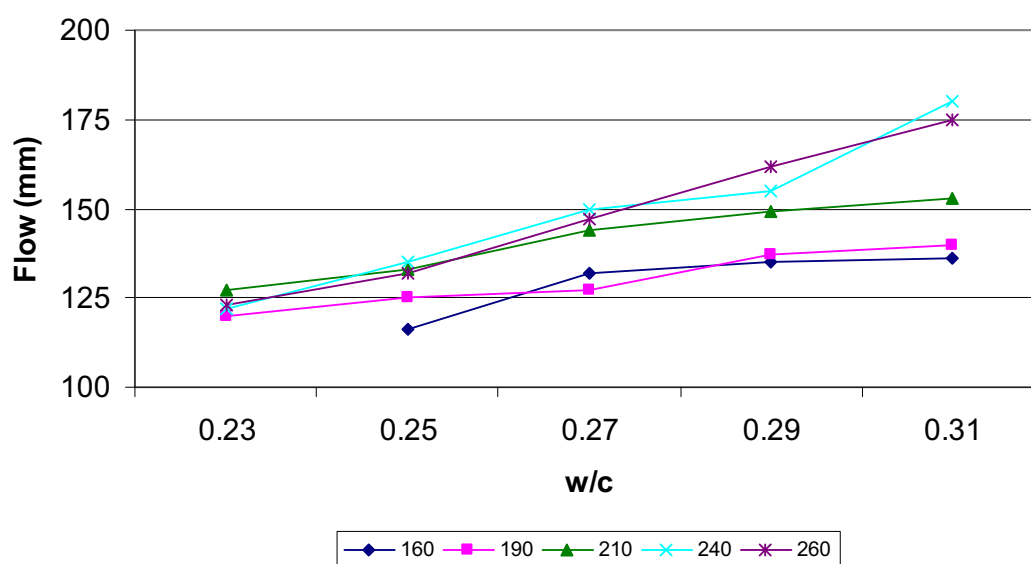
ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์	γ				
	160	190	210	240	260
0.23		841	858	1053	929
0.25	799	801	802	945	904
0.27	751	744	781	923	923
0.29	716	716	741	829	898
0.31	695	723	717	773	798



รูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่ 28 วันกับ γ ที่ w/c ต่างๆ

ตารางที่ 5.62 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลแผ่ (มม.) กับ w/c ที่ค่า γ ต่างๆ

ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์	γ				
	160%	190%	210%	240%	260%
0.23		120	127	122	123
0.25	116	125	133	135	132
0.27	132	127	144	150	147
0.29	135	137	149	155	162
0.31	136	140	153	180	175



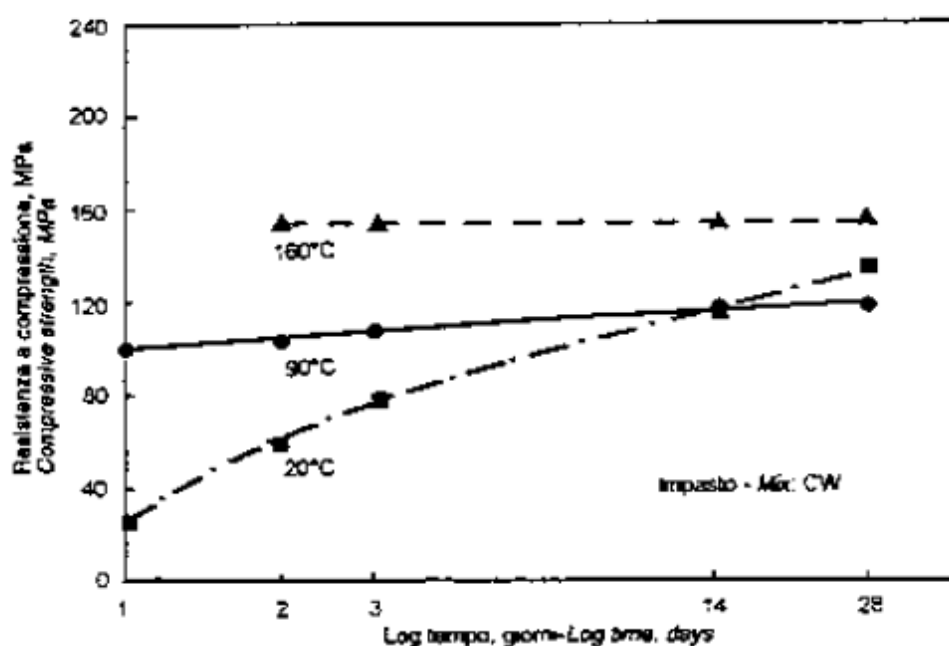
รูปที่ 5.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลแผ่ (มม.) กับ w/c ที่ค่า γ ต่างๆ

วิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับคอนกรีต 1A จากการทดลองหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ค่า w/c ที่ค่า γ ต่างๆ โดยควบคุมปริมาณสารลดน้ำที่ร้อยละ 6 และปริมาณซิลิกาฟูมที่ร้อยละ 25 พบว่าที่ค่า w/c 0.23, 0.25 และ 0.27 จะให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ γ เท่ากับร้อยละ 240 ในขณะที่เมื่อค่า w/c สูงขึ้นเป็น 0.29 และ 0.31 ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดจะอยู่ที่ γ เท่ากับ ร้อยละ 260 เป็นที่น่าสนใจว่า ถ้าหากเพิ่มค่า มากขึ้นไปอีกกำลังรับแรงอัดที่ 28 วันจะเพิ่มขึ้นตามหรือไม่

ได้ทดสอบหาค่าความสามารถทำงานได้ (workability) โดยการใช้ flow table ตาม ASTM C230 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ S.Collepari และคณะ(1997) ซึ่งควบคุมค่าการไหลแผ่ไว้ที่ 150 มม. พบว่าที่ส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดคือสูตร 1A23625_240 ซึ่งให้ค่า กำลังรับแรงอัดสูงสุด 1053 กก./ตร.ซม. มีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 122 มม. เท่านั้นซึ่งน้อยกว่า 150 มม. ส่วนผสมที่มีค่าการไหลแผ่ที่มากกว่า 150 มม. มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่สูตร 1A29625_260 ที่มีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 162 มม. และให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันเท่ากับ 898 กก./ตร.ซม.

เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Coppolla L. และคณะ (1996) ซึ่งได้ทดลองผลิต RPC กับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 3 และประเภทที่ 5 ซึ่งปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 3 ที่ใช้ในการทดลองมีสัดส่วนของ C_3A สูงถึงร้อยละ 11.2 และซิลิกาฟูมที่ใช้มีค่า SiO_2 มากกว่าร้อยละ 94 ขึ้นไป ได้ผลการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่อายุต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.27 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันมีค่าประมาณ 1,300 กก./ตร.ซม. โดยบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ $20^{\circ}C$ ในขณะที่การทดลองนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีสัดส่วนของ C_3A อยู่ที่ 8.09% จึงทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันที่ได้มีค่าที่แตกต่างกัน ส่วนคอนกรีต 1B อยู่ระหว่างการรอผลการทดลอง



รูปที่ 5.41 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 3 ที่การบ่มแบบต่างๆ

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษา

จากผลการวิจัยที่ได้ดำเนินการไปแล้วทั้งหมดสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. ปริมาณซิลิกาฟุ่มในส่วนผสมของ UHPC มีผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต โดยเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่มขึ้นจะมีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวสั้นลง
2. ปริมาณสารลดน้ำในส่วนผสมของ UHPC มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต โดยเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำจะมีผลในการยืดระยะเวลาการก่อตัวยาวขึ้น จนถึงจุดหนึ่งที่ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวยาวนานมากหรืออาจจะไม่ก่อตัวเลย
3. คอนกรีต 1A ที่ใช้สารลดน้ำและซิลิกาฟุ่มของ WR Grace มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 1053 กก./ตร.ซม. เมื่อใช้ค่า γ เท่ากับ 240 ที่ w/c 0.23 และใช้ปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 25 ปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 6 มีการก่อตัวระยะปลายที่ 3 ชั่วโมง 30 นาที
4. คอนกรีต 1B ที่ใช้สารลดน้ำและซิลิกาฟุ่มของ Degussa มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 1211 กก./ตร.ซม. โดยยังอยู่ในระหว่างรอผลการ trial ค่า γ ซึ่งอาจจะได้ผลกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่านี้อีก w/c 0.23 ปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 25 ปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 5 การก่อตัวระยะปลายที่ 2 ชั่วโมง 30 นาที โดย ประมาณจากค่าระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำร้อยละ 4 และ 6

บรรณานุกรม

- Collepari S., L. Coppola, R. Troli e M. Collepari, "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).
- Collepari 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.
- Collepari S., S.Monosi, G. Pignoloni, R. Troli and M. Collepari, 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. Collepari, "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. Collepari, A. Borsoi, T. Cerulli, M. Collepari, "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. Collepari, "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, "ผลกระทบของซิลิกาฟูมในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต
สมรรถนะสูง "วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา,
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2539