สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเปรียบเทียบผลของการใช้สารลดปริมาณน้ำบางชนิดที่มีต่อกำลังของคอนกรีต

EFFECT OF SOME SUPERPLASTICIZER ON CONCRETE STRENGTH

โดย

นายนยพงษ์ คทาพรสิริ

นายสานิต เพชรประเสริฐ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 36766
วัน, เดือน, ป. 2 8 ส.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF SOME SUPERPLASTICIZER ON CONCRETE STRENGTH

MR. NAYAPONG KATAPORNSIRI

MR. SANIT PETPRASIRT

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE

BACHELOR OF CONSTRUCTION ENGINEERING

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงงานพิเศษ

หัวข้อโครงงานพิเศษ การศึกษาเปรียบเทียบผลของการใช้สารลดปริมาณน้ำบางชนิดที่มีต่อกำลังของคอนกรีต

นักศึกษา	นายนยพงษ์ คทาพรสิริ	**รหัสประจำตัว** 37014185
	นายสานิต เพชรประเสริฐ	**รหัสประจำตัว** 39014565
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	**สาขาวิชา** วิศวกรรมการก่อสร้าง
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ศิริวัฒน์ ไชยชนะ	

คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ		**ลายมือชื่อ**
ดร.ศรีกริช	หิรัญมาศ	
อาจารย์ศิลป์ชัย	จานสุวรรณ	
รศ. ศิริวัฒน์	ไชยชนะ	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(ผศ.ดร.แดง เหรียญสุวรรณ)
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา
วันที่ 30 **เดือน** เมษายน **พ.ศ.** 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาเปรียบเทียบผลของการใช้สารลดน้ำปริมาณน้ำบางชนิดที่มีต่อกำลังของคอนกรีต EFFECT OF SOME SUPERPLASTICIZER ON CONCRETE STRENGTH
นักศึกษา	นายนยพงษ์ คทาพรสิริ นายสานิต เพชรประเสริฐ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ศิริวัฒน์ ไชยชนะ
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2542

บทคัดย่อ

สารลดน้ำพิเศษเป็นสารเคมีผสมเพิ่มประเภทหนึ่งที่ใช้ผสมกับคอนกรีต เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตเหลวให้มีความสามารถในการเทได้ดี และยังช่วยลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในส่วนผสมคอนกรีต ทำให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงขึ้น ซึ่งในโครงงานพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษบางชนิดได้แก่ RHEOBUILD1000,RHEOBUILD1000R, DARACEM,DARACEM100 โดยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ ค่าความยุบตัว, การสูญเสียค่าความยุบตัวและกำลังอัดของคอนกรีต และพิจารณาเปรียบเทียบราคากับคอนกรีตปรกติ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษมีค่าความยุบตัวสูงขึ้นทำให้มีความสามารถในการเทได้ดีและมีค่ากำลังอัดสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เมื่อพิจารณาทางด้านราคาพบว่า ที่กำลังรับแรงอัดเท่ากันคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษจะมีราคาถูกกว่าคอนกรีตปรกติเนื่องจากสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ให้น้อยลงจากคอนกรีตธรรมดาได้โดยที่ไม่สูญเสียค่ากำลังอัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	:	EFFECT OF SOME SUPERPLASTICIZER ON CONCRETE STRENGTH
Name	:	MR. NAYAPONG KATAPORNSIRI
	:	MR. SANTI PETPRASIRT
Field	:	CONSTRUCTION ENGINEERING
Department	:	CIVIL ENGINEERING
Faculty	:	ENGINEERING
Advisor	:	ASSOC. PROF. SIRIWAT CHAICHANA

ABSTRACT

SUPERPLASTICIZER IS THE ONE OF A CHEMICAL ADMIXTURE USED IN CONCRETE. FOR IMPROVING THE WORKABILITY AND REDUCED THE WATER CONTENT IN CONCRETE MIXTURE TO GAIN THE HIGHER OF COMPRESSIVE STRENGTH. IN SCOPE OF THE SPECIAL PROJECT , WE STUDY OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF SOME ADMIXTURES IN CONCRETE ,ETC. RHEOBUILD1000 , RHEOBUILD1000R , DARACEM AND DARACEM100 ABOUT SLUMP AND SLUMP LOSS , COMPRESSIVE STRENGTH INCLUDING THE COST COMPARE WITH CONCRETE WITHOUT ADMIXTURE. THE STUDY SHOWS THAT CONCRETE WITH ADMIXTURES HAS LARGER SLUMP, AND GOOD WORKABILITY WHICH LEAD TO GET THE HIGHER COMPRESSIVE STRENGTH. AND THE COST IS LOWER, WHEN COMPARE WITH CONCRETE WITHOUT ADMIXTURE.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การทำโครงงานวิจัยครั้งนี้ ข้าพเจ้าขอบคุณพระเจ้าผู้ซึ่งเป็นแหล่งแห่งความไว้วางใจเสมอมา อนึ่ง การทำโครงงานพิเศษนี้ ข้าพเจ้าได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูล รวมทั้งคำชี้แนะต่างๆ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ในการทำโครงงานพิเศษครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ข้าพเจ้าได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจาก

- ผศ. ศิริวัฒน์ ไชยชนะ อาจารย์ที่ปรึกษาคอยให้คำชี้แนะและคำปรึกษาระหว่างการทำโครงงานวิจัยและคำแนะนำในการตรวจสอบแก้ไขโครงงานฉบับนี้

- บิดา มารดา พี่และน้องของข้าพเจ้า ผู้เป็นกำลังใจและแบบอย่างแห่งแรงบันดาลใจเสมอมา

- เพื่อน ๆ และพี่น้องทุก ๆ ท่านในครอบครัวความหวังและภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดการทำโครงงานวิจัยฉบับนี้

- บริษัท ไทยมาสเตอร์ บิวเดอร์ส และ บริษัท ดับบลิว อาร์ เกรซ ผู้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและสารเคมี

- เจ้าหน้าที่ประจำโรงปฏิบัติงานวิศวกรรมโยธา ที่ได้ให้คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์การทดสอบ

ท้ายที่สุด ขอพระเกียรติทั้งสิ้นจงมีแด่พระเจ้า ผู้สถาปนาศาสตร์ต่าง ๆ และขอให้ความดีและประโยชน์ทั้งหลาย อันพึงที่จะมีได้ในโครงงานฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่ บิดา มารดา ครูอาจารย์และคริสตจักรที่ได้ให้การอบรมสั่งสอนและชี้แนะข้าพเจ้าตลอดมา

นายนยพงษ์ คทาพรสิริ

นายสานิต เพชรประเสริฐ

ผู้เขียนกิตติกรรมประกาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	ปกใน (ภาษาไทย)	ก
	ปกใน (ภาษาอังกฤษ)	ข
	หน้าอนุมัติ	ค
	บทคัดย่อภาษาไทย	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
	กิตติกรรมประกาศ	ฉ
	สารบัญ	ช-ญ
	สารบัญตาราง	ฎ-ฏ
	สารบัญภาพ	ฐ-ฑ
1	บทนำ	
	1.1. คำนำ	1
	1.2. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.3. วัตถุประสงค์และขอบเขตการทดลอง	2
	1.3.1. วัตถุประสงค์	2
	1.3.2. ขอบเขตของการวิจัย	2
2	ทฤษฎี	
	2.1. ปูนซีเมนต์	4
	2.1.1. กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์	5
	2.1.2. องค์ประกอบทางเคมี	9
	2.1.3. การก่อตัวและการแข็งตัว	13
	2.1.4. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	15
	2.1.5. การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์	19
	2.1.6. ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.7. ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 21
2.1.8. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่น 23
2.1.9 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 25
2.2. สารผสมเพิ่ม 31
2.2.1. คำจำกัดความ 31
2.2.2. ประเภทของสารผสมเพิ่ม 31
2.2.3. การใช้สารผสมเพิ่ม 32
2.2.4. ข้อระวังในการใช้งาน 35
2.2.5. สารกักกระจายฟองอากาศ 35
2.2.6. สารเคมีผสมคอนกรีต 38
2.2.7. สารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม 49
2.2.8. สารผสมเพิ่มอื่นๆ 50

3 สารลดน้ำพิเศษ
3.1. ประเภทของสารลดน้ำพิเศษ 51
3.2. กลไกการทำงานของสารลดน้ำพิเศษ 52
3.3. ประโยชน์ของสารลดน้ำพิเศษ 52
3.4. คุณสมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ 53
3.4.1. ความต้องการน้ำและความสามารถทำงานได้ 53
3.4.2. การคายน้ำ 54
3.4.3. ระยะเวลาการก่อตัว 54
3.4.4. กำลังรับแรงอัด 54
3.4.5. กำลังรับแรงดึง 55
3.4.6. ความทนทาน 55
3.4.7. การขยายตัว 56
3.4.8. การหดตัว 56

4 การเตรียมวัสดุวิจัยและการหาปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต
4.1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย 58
4.2. การหาปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3. ตัวอย่างการหาปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต 60

5 การทดสอบวิจัย

5.1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวิจัย 70

5.2. ปริมาณที่ใช้ในการทดสอบวิจัย 71

5.3. วิธีการทดสอบวิจัย 72

5.3.1. การเตรียมวัสดุผสมและแบบหล่อ 72

5.3.2. การเตรียมตัวอย่างแท่งคอนกรีต 72

5.3.3. การทดสอบค่าการยุบตัว 72

5.3.4. การทดสอบค่าสูญเสียการยุบตัว 73

5.3.5. การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต 73

6 ผลการทดสอบวิจัยและการวิเคราะห์ผล

6.1. ผลการทดสอบด้านกำลังรับแรงอัด 75

6.2. ผลการทดสอบค่าความยุบตัว 77

6.3. ผลการทดสอบการสูญเสียค่าความยุบตัว 78

6.4. การวิเคราะห์ผลการทดสอบวิจัย 115

6.4.1. วิเคราะห์ผลด้านกำลังรับแรงอัด 115

6.4.2. วิเคราะห์ผลด้านความสามารถในการทำงาน 116

6.4.3. การวิเคราะห์ข้อบกพร่องเนื่องจากการทดสอบ 117

7 สรุปผลการทดสอบวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1. สรุปผลการทดสอบวิจัย 118

7.2. ข้อเสนอแนะ 119

7.3. ข้อเสนอแนะสำหรับผู้ประกอบการ 119

รูปภาพประกอบคำบรรยาย 121

ภาคผนวก ก ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด 137

ภาคผนวก ข ราคาของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ 151

บรรณานุกรม 163

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
2.1.	สัดส่วนออกไซด์ของธาตุต่างๆในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	8
2.2.	ค่าออกไซด์ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	9
2.3.	สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	10
2.4.	สรุปคุณสมบัติหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	11
2.5.	เวลาที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลัก สำเร็จ 80 %	19
2.6.	ปริมาณร้อยละของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ	23
2.7.	เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามมาตรฐาน มอก 15-2514	27
2.8.	เกณฑ์คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามมาตรฐาน มอก. 15- 2514	28
2.9.	คุณสมบัติที่ต้องการของปูนซีเมนต์ผสม	30
2.10.	การแบ่งประเภทของสารผสมเพิ่ม	33
2.11.	คุณสมบัติของคอนกรีตที่ถูกปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลง โดยสารผสมเพิ่มประเภทต่างๆ	34
2.12 .	สรุปคุณลักษณะของสารเคมีผสมคอนกรีตปรัเภทต่างๆ ตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน	48
4.1.	ค่าคงที่ k และร้อยละของกำลังอัดที่ต่ำกว่า fc'	63
4.2.	ค่าความยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการก่อสร้างประเภทต่างๆ	63
4.3.	ขนาดโตสุดของวัสดุผสมสำหรับงานก่อสร้างประเภทต่างๆ	64
4.4.	ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับความยุบตัวและวัสดุผสมขนาดต่างๆ	65
4.5.	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดโดยน้ำหนักที่ยอมให้สำหรับ คอนกรีตในสภาวะเปิดเผยรุนแรง	66
4.6.	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัย ของคอนกรีต	67
4.7.	ปริมาตรวัสดุผสมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8. หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดโดยประมาณ 69
5.1. ปริมาณส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบวิจัย
ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร 71
6.1. ตารางสรุปผลค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ 83
6.2. การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเทียบกับระยะเวลาการบ่มแท่งตัวอย่างทดสอบ 84
6.3. กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆเปรียบเทียบ
กับคอนกรีตธรรมดาที่ระยะเวลาการบ่มตามกำหนด 85
6.4. แสดงผลการวัดค่า Slump Loss ของคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ 86
ผ.ก. ก.1 - ก.13 137-149
ผ.ก. ข.1 ราคาส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ 151
ผ.ก. ข.2 เปรียบเทียบราคาและกำลังที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารลดน้ำพิเศษ 153
ผ.ก. ข.3 ตัวอย่างการเปรียบเทียบด้านราคาและกำลังของคอนกรีต 154
ที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
2.1.	วัตถุดิบของปูนซีเมนต์	5
2.2.	กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์	7
2.3.	การพัฒนากำลังของสารประกอบหลัก	12
2.4.	ขั้นตอนการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต	14
2.5.	แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต	16
2.6.	ขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A	17
2.7.	ภาพขยาย Monosulphate และ Ettringite	18
2.8.	แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์	20
2.9.	อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	21
2.10.	ผลของการกักกระจายฟองอากาศต่อกำลังและความคงทน	37
2.11.	ประโยชน์ของการใช้สารลดปริมาณน้ำ	39
2.12.	คอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำมากเกินไป	41
2.13.	ลักษณะการทำงานของสรลดปริมาณน้ำ	41
2.14.	a) อนุภาคของซีเมนต์จะจับอยู่เป็นกลุ่มก่อนการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำ	42
	b) การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาคซีเมนต์หลังการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำ	42
3.1.	แสดงประจุไฟฟ้าที่ล้อมรอบเม็ดซีเมนต์เมื่อผสมสารลดน้ำพิเศษ	53
3.2.	ความสัมพันธ์ระหว่างสารลดปริมาณน้ำพิเศษกับการลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	55
3.3.	ความสัมพันธ์ระหว่างการลดน้ำและกำลังรับแรงอัดกับปริมาณ Sulphonate Melamine Formaldehyde Concensate	56
3.4.	ความสัมพันธ์ระหว่างการลดน้ำและกำลังรับแรงอัดกับปริมาณ Sulphonate Napthalene Formaldehyde Concensate	57
6.1. – 6.7.	รูปกราฟแสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา	87-93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.8. - 6.14. แผนภูมิแท่งแสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา 94-100
6.15. – 6.21. กราฟแสดงค่าเปอร์เซนต์กำลังที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ 101-107
6.22. – 6.28. กราฟแสดงค่าสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา 108-114
1 –27 รูปประกอบคำบรรยาย 121-136
ผ.ก. ข.1– ข.7 แผนภูมิแท่งแสดงราคาของวัสดุผสมในคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ 155-161
ผ.ก. ข.8 แผนภูมิแท่งแสดงเปอร์เซนต์ราคาที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา 162

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1. คำนำ

สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) เป็นสารที่นำมาผสมเพิ่มในคอนกรีตเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในด้านการทำงาน และด้านการรับกำลัง เหมาะสำหรับงานคอนกรีตผสมเสร็จที่ต้องการคอนกรีตที่เหลวมากๆ เช่นในงานฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ หรือ เสา คานและชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมจำนวนมาก คอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำพิเศษนี้จะมีค่ายุบตัวมากกว่า 15 ซม.ทำให้สามารถลื่นไหลเข้าไปในทุกซอกทุกมุมของเหล็กเสริมและไม้แบบ โดยไม่ต้องทำการจี้เขย่าไม้แบบมากนักและด้วยคุณสมบัติเช่นนี้ทำให้สามารถพัฒนาคอนกรีตที่มีกำลังสูงมากขึ้น โดยการลดปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตทั่วไปลงโดยที่ความสามารถในการเทคอนกรีตไม่น้อยลง จึงเป็นประโยชน์อย่างมากในการก่อสร้างที่ต้องการคอนกรีตที่มีกำลังสูง

ในปัจจุบันสารลดน้ำพิเศษที่ใช้ในท้องตลาดส่วนใหญ่มีอยู่ 2 ชนิดหลัก ๆ คือสารลดปริมาณน้ำจำนวนมาก (High Range Water Reducing) และสารลดปริมาณน้ำจำนวนมากและยืดเวลาการก่อตัว (High Range Water Reducing and Retarding) เนื่องจากสารลดน้ำพิเศษชนิดแรกนั้น มักก่อให้เกิดปัญหาในการใช้ คือ คอนกรีตที่ผสมสารตัวนี้จะต้องรีบใช้ให้หมดภายใน 30 นาที เนื่องจากค่าสูญเสียการยุบตัวเกิดขึ้นเร็วมากจึงได้มีการคิดค้นสารลดน้ำพิเศษที่ผสมสารยืดการก่อตัวขึ้นเพื่อให้เกิดความสะดวกในการทำงานมากขึ้น

1.2. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันสารลดปริมาณน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในงานคอนกรีต ซึ่งจัดว่าเป็นสิ่งสำคัญในการก่อสร้างเพราะสารลดน้ำพิเศษนี้มีจุดเด่นในด้านการช่วยยืดระยะเวลาการก่อตัวและการลดน้ำได้อย่างมาก แต่ในท้องตลาดนั้นมีสารลดปริมาณน้ำพิเศษอยู่หลายชนิด ซึ่งมีคุณสมบัติ วิธีใช้ที่ต่างกันรวมทั้งราคาที่อาจแตกต่างกันด้วย และเมื่อพิจารณาสภาพเศรษฐกิจในปัจจุบันแล้วจะเห็นได้ว่า การตัดสินใจเลือกใช้สารลดน้ำพิเศษมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าและประโยชน์สูงสุด ดังนั้นโครงงานพิเศษฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของสารลดปริมาณน้ำพิเศษบางชนิดในด้านของปริมาณที่ใช้ กำลังของคอนกรีต ความสะดวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานและเรื่องของราคาเพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกใช้สารลดปริมาณน้ำพิเศษให้เหมาะสมกับงานก่อสร้าง

1.3. วัตถุประสงค์และขอบเขตการทดลอง

1.3.1. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของการใช้สารลดปริมาณน้ำพิเศษบางชนิด ที่มีผลต่อการสูญเสียค่าความยุบตัว (Slump Loss) และกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength)

2. เพื่อเปรียบเทียบกำลังของคอนกรีตที่ใช้สารลดปริมาณน้ำพิเศษต่างชนิดในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน

3. เพื่อศึกษาแนวทางในการตัดสินใจเลือกใช้สารลดปริมาณน้ำพิเศษให้เหมาะสมกับความต้องการ

1.3.2. ขอบเขตของการวิจัย

1. ขอบเขตของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- ปูนซีเมนต์ เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ประเภทที่ 1
- สารลดปริมาณน้ำพิเศษ (Superplasticizer) โดยใช้ 4 ชนิด ชนิดละ 3 ปริมาณที่ต่างกัน
- หิน เป็นหินปูนขนาดเบอร์ 1 ที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไป
- ทราย เป็นทรายแม่น้ำที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไป
- น้ำ เป็นน้ำประปา โดยจะทำการทดสอบที่ 180 กก./ลบ.เมตรของคอนกรีต

2. ขอบเขตของวิธีทดสอบที่ใช้ในการวิจัย

- ทดสอบกำลังรับแรงอัด
- ทดสอบค่าความยุบตัว (Slump)
- ทดสอบการสูญเสียค่าความยุบตัว (Slump Loss)

(การทดสอบทั้งหมด ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM)

3. ขอบเขตของระยะเวลาการบ่มตัวอย่างทดสอบ

- 3 , 7 และ 28 วัน

4. ขอบเขตของอัตราส่วนผสมในคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คอนกรีตธรรมดาใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.43
- คอนกรีตผสมสารลดน้ำพิเศษใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.39
- สารลดน้ำพิเศษแต่ละชนิดจะใช้ใน 3 ปริมาณที่แตกต่างกัน คือ
    - 2790 cc. / คอนกรีต 1 ลบ.เมตร (600 cc./ ซีเมนต์ 100 กก.)
    - 4650 cc. / คอนกรีต 1 ลบ.เมตร (1000 cc./ ซีเมนต์ 100 กก.)
    - 9300 cc./ คอนกรีต 1 ลบ.เมตร (2000 cc./ ซีเมนต์ 100 กก.)

รวมทั้งสิ้น 13 ส่วนผสม

รวมตัวอย่างที่ต้องทำการทดสอบวิจัย = 5*3*13 = 195 ตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ปูนซีเมนต์

2.1. ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ เป็นผงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่าง ๆ (หิน ปูน หรือ ดินปูนขาว กับ ดินเหนียว หรือ หินดาน) จนรวมตัวผสมกันสุกพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์นั้น การทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) อัตราการก่อตัวและแข็งตัวตลอดจนปริมาณความร้อนที่เกิด ขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูน ความแข็งแรงและความทนทานเมื่อแข็งตัวแล้ว ขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมและการให้ความชื้นในขณะที่เริ่มแข็งตัว ตำรับของชื่อปูนซีเมนต์ที่เรียกกันในทางวิชาการว่า "ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)" ได้มาจากการตั้งชื่อของนายโจเซฟ แอสปดิน โดยในปี ค.ศ. 1824 นายโจเซฟได้ทำการจดทะเบียนลิขสิทธิ์ของวิธีการผลิตปูนซีเมนต์อย่างหนึ่ง ซึ่งได้จากการเผาส่วนผสมระหว่างหินปูนและดินเหนียว เมื่อนำมาบดจะได้ผงปูนซีเมนต์ หลังจากผสมรวมกับน้ำและแข็งตัวจะมีสีเหลือง – เทา คล้ายกับหินในเกาะของเมืองปอร์ตแลนด์ ประเทศอังกฤษ นายโจเซฟจึงตั้งชื่อว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ในขณะนั้นยังมีคุณภาพต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเผาส่วนผสมดังกล่าวใช้ความร้อนต่ำ ซึ่งทำให้หินปูนกับดินเหนียวยังรวมตัวกันไม่ดี

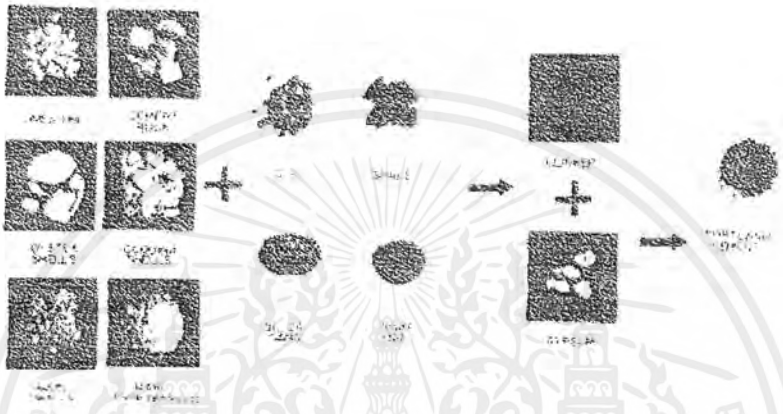
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรมปัจจุบัน เพราะเมื่อนำไปผสมรวมกับทราย และน้ำ จะได้เป็นมอร์ตา (mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็น ปูนก่อสำหรับงานก่ออิฐหรือหิน หรือ ปูนฉาบ สำหรับงานฉาบปูน เป็นต้น หากนำไปผสมรวมกับ หิน กรวด ทรายและน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีตซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งและทนทานคล้ายหิน ตัวอย่างสิ่งก่อสร้างคอนกรีตได้แก่ ฐานรากตอม่อ เขื่อน กำแพงกันดิน พื้นและถนน ซึ่งเมื่อเสริมด้วยเหล็กเส้นจะเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับพื้น หลังคา สะพาน อาคาร อุโมงค์ และอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1. กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์ (Manufacture of Portland Cement)

2.1.1.1. วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่สำคัญซึ่งใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์อาจจำแนกเป็น 2 ประเภท คือ



รูปที่ 2.1 วัตถุดิบของปูนซีเมนต์

1. ประเภทที่ให้ธาตุคัลเซียมเป็นส่วนใหญ่ (Calcareous Materials) ซึ่งอยู่ในรูปของ $CaCo_3$ ได้แก่ หินปูน (Limestone) ดินสอพองหรือชอร์ค (Chalk) ดินปูนขาว (Marl)

2. ประเภทที่ให้ออกไซด์ของธาตุซิลิกอน (SiO_2) และอลูมิเนียม (Al_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ (Argillaceous Materials) ได้แก่ ดินดานหรือหินเชล (Shale) ดินดำหรือดินเหนียว (Clay) หินชนวน (Slate)

แต่ในบางครั้ง วัตถุดิบทั้งสองประเภทข้างต้นอาจมีปริมาณของธาตุที่ต้องการน้อยไปหรือมีปริมาณของธาตุอื่นเพิ่มเติมมากเกินกว่าที่จำเป็น จึงจำเป็นต้องปรับส่วนผสมให้พอเหมาะเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามต้องการ เช่น (ก) เพิ่มปริมาณแร่เหล็ก (Iron Ore) ซึ่งมีอยู่มากในศิลาแลง (Laterite) เมื่อหินเชลหรือดินเหนียวที่จะใช้มีปริมาณของเหล็กต่ำ (ข) เลือกใช้วัตถุดิบที่มีธาตุเหล็กน้อยลง เพื่อผลิตปูนซีเมนต์ขาว (ค) เติมยิบซัม (Gypsum) เมื่อใช้เป็นสารหน่วงการก่อตัวโดยผสมรวมกับปูนเม็ดจากเตาเผา เป็นต้น

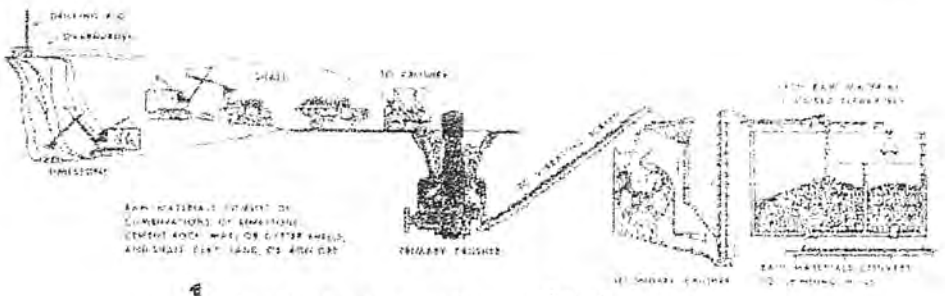
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2..1.1.2. กรรมวิธีการผลิต

กรรมวิธีในการผลิตอาจแบ่งเป็นการผลิตแบบแห้ง (Dry Process) หรือการผลิตแบบเปียก (Wet Process) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 กล่าวคือ วัตถุดิบก่อนการเผาอาจให้ผ่านกระบวนการแห้งหรือเปียก ในกระบวนการแห้ง วัตถุดิบซึ่งได้แก่ หินปูน ดินดาน แร่เหล็ก ได้รับการทำให้แห้งก่อนการบดและการผสม ส่วนในกระบวนการเปียก วัตถุดิบซึ่งได้แก่ ดินสอพอง ดินเหนียว ได้รับการบดและการผสมเปียก การเลือกกระบวนการผลิตจะต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบ น้ำที่จะจ่ายให้โรงงาน ราคาของเชื้อเพลิง แหล่งกำลังไฟฟ้า วิธีเก็บฝุ่น ตลอดจนความสม่ำเสมอของวัตถุดิบก่อนที่จะป้อนเข้าสู่เตาเผา ถ้าวัตถุดิบที่มีอยู่เป็นหินซีเมนต์และหินปูนซึ่งแห้งตามธรรมชาติ หรือมีความชื้นอยู่น้อยก็อาจทำให้แห้งก่อนโดยใช้ความร้อนที่ออกจากเตาเผา แล้วจึงนำไปบดและผสมกันในภาวะแห้งได้ โดยมีราคาการผลิตต่ำ ซึ่งในลักษณะนี้กระบวนการผลิตแบบแห้งเสียค่าใช้จ่ายน้อย อย่างไรก็ดีถ้าส่วนผสมหนึ่งของสารผสมอยู่ในภาวะเปียก ค่าใช้จ่ายในการทำให้วัตถุดิบแห้งในกระบวนการผลิตแบบแห้งจะเพิ่มขึ้นและอาจสูงกว่าค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตแบบเปียก ในด้านการควบคุมส่วนประกอบของวัตถุดิบทางเคมี กระบวนการทั้งสองจะไม่แตกต่างกันนัก กระบวนการผลิตแบบเปียกจะซับซ้อนน้อยกว่าและเหมาะกว่า แต่ในการปรับปรุงคุณภาพและการเพิ่มชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากวัตถุดิบที่มีอยู่ กระบวนการผลิตแบบแห้งสามารถควบคุมให้มีประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการผลิตแบบเปียก

เมื่อนำวัตถุดิบมาบดละเอียดและผสมเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะแล้ว ส่วนผสมนี้จะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเตาเผา (Kiln) เตาเผาเปรียบเสมือนหัวใจของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เป็นเครื่องจักรที่ใหญ่และแพงที่สุด ทำงานตลอด 24 ชั่วโมงโดยไม่มีการหยุดพัก เตาเผาส่วนใหญ่ในปัจจุบันนี้ใช้เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) ซึ่งเป็นเหล็กกล้ามีลักษณะรูปทรงกระบอกยาวประมาณ 50 – 150 เมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 ถึง 4 เมตร ภายในบุด้วยอิฐทนไฟเพื่อเก็บความร้อนไว้ภายใน หมุนรอบตัวในแนวเอียงอย่างช้า ๆ ประมาณนาทีละ 1.3 รอบ อุณหภูมิที่ใช้เผาประมาณ 1400 – 1600 ^{o}c วัตถุดิบที่ผสมรวมกันและถูกเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำปฏิกิริยาทางเคมี เกิดการรวมตัวของออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ และจับกันเป็นเม็ดเล็ก ๆ เรียกว่า ปูนเม็ด (Clinker) ถูกส่งออกมาข้างนอกทางด้านล่างของเตา ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณออกไซด์หลักของธาตุต่าง ๆ ที่มีในปูนเม็ด ซึ่งจะเห็นว่ามีปริมาณรวมกันประมาณ 90 % ของปริมาณทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



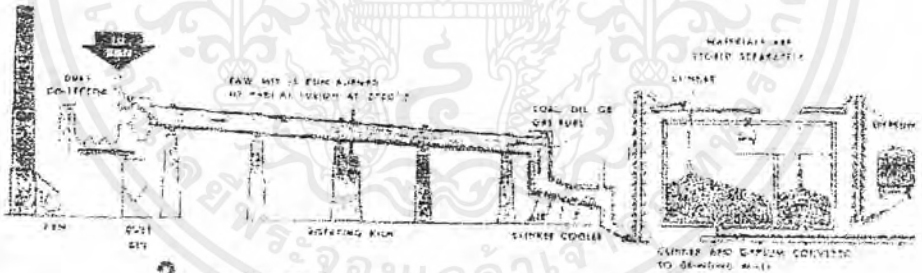
1 ย่อยวัตถุดิบต่าง ๆ แล้วแยกเก็บไว้ไม่ปะปนกัน

(ย่อยครั้งแรกเหลือขนาด 5 นิ้ว และย่อยอีกครั้งเหลือขนาด 3/4 นิ้ว)

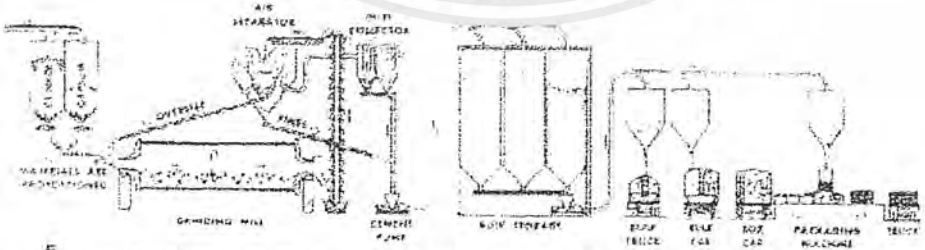
2 หรือ กระบวนการเปียก กระบวนการแห้ง

บดวัตถุดิบให้เป็นผงละเอียดและผสมเข้าด้วยกัน

บดวัตถุดิบให้เป็นผงละเอียด ผสมรวมกับน้ำและกวนให้เข้ากัน



3 เผาวัตถุดิบในเตาเผา จนกลายเป็นปูนเม็ด



4 บดปูนเม็ดรวมกับยิปซัม ได้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และส่งออกจำหน่าย

รูป 2.2 กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีและรูปร่างของปูนเม็ดจะบ่งถึงการเผาว่าเป็นไปอย่างถูกต้องหรือไม่ ถ้าเผาได้ที่ดีปูนเม็ดจะมีสีดำปนเขียวเหมือนแก้วใส เมื่อเย็นตัวจะแวววาวเป็นจุด ๆ ก้อนใหญ่ส่วนมากจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) ปูนเม็ดที่ยังเผาไม่ได้ที่ จะมีสีน้ำตาล หรือสีน้ำตาลเป็นหย่อม ๆ ไม่เป็นมันเหมือนที่เผาได้ที่แล้ว ปูนเม็ดที่เผาเกินพอจะมีสีน้ำตาลเข้มเป็นหย่อม ๆ การเผาเกินพอไม่เป็นการเสียหายแต่อย่างใด เพียงแต่สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบดปูนเม็ดทั้งนี้เพราะปูนเม็ดที่เผาเกินพอมีความแข็งมาก

ปูนเม็ดที่ได้จากเตาเผาจะร้อนมาก ต้องได้รับการลดอุณหภูมิให้เหมาะสมก่อนนำไปบด การลดอุณหภูมิกระทำได้โดยพ่นลมหรือน้ำเข้าไปในยุ้งลดความเย็น (Clinker Cooler) ซึ่งอาจจะเป็นแบบหมุน (Rotary Cooler) หรือแบบตะแกรง การทำให้ปูนเม็ดเย็นลงต้องมีการควบคุมอย่างดี เพราะมีผลต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์ ถ้าปูนเม็ดถูกทำให้เย็นตัวเร็วจะบดง่าย และความแข็งแรงภายใน 7 วันดีขึ้น แต่ถ้าปูนเม็ดถูกทำให้เย็นลงอย่างช้า ๆ ความแข็งแรงในระยะหลังจะสูงขึ้น ปูนเม็ดที่เย็นตัวแล้วจะถูกนำไปบดละเอียดในหม้อบดปูน (Grinding Mill) หากปูนเม็ดมีปริมาณของยิปซัมผสมอยู่น้อย ก็ต้องใส่ยิปซัมเพิ่มเข้าไปด้วย โดยให้มีปริมาณของยิปซัมผสมรวมอยู่ประมาณ 5 % ปูนเม็ดที่บดละเอียดแล้วส่วนมากจะผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 200 ได้เกือบหมด การผสมยิบซัมลงไปด้วยก็เพื่อทำให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติก่อตัวช้าลงเมื่อผสมกับน้ำ เพราะถ้าไม่มียิบซัม เมื่อปูนซีเมนต์ได้ผสมกับน้ำจะก่อตัวเร็วเกินไป จนไม่มีเวลานานพอที่จะเอาไปเทลงแบบได้ ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากกว่า จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อตัวและแข็งตัวให้กำลังรับแรงได้เร็วกว่า ส่วนปูนซีเมนต์ที่หยาบอาจทำให้เกิดการเยิ้มหรือการคายน้ำได้มากกว่าปูนซีเมนต์ที่ละเอียด ผงปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้นี้จะถูกปั้มโดยลมนำไปเก็บไว้ในยุ้งเก็บปูนซีเมนต์ (Bulk Storage) ซึ่งเป็นถังทรงกระบอกใหญ่ตั้ง มีผนังปกคลุมมิดชิดกันความชื้น เพื่อนำไปบรรจุใส่ถุงและจำหน่ายต่อไป ในประเทศไทยจะบรรจุในถุงกระดาษมีเนื้อปูนจริง ๆ 50 กิโลกรัม

ออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ปูนขาว (CaO)	60-65
ซิลิก้า (SiO_2)	20-24
อลูมิน่า (Al_2O_3)	4-8
เหล็ก (Fe_2O_3)	2-5

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ ในปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2. องค์ประกอบทางเคมี

เมื่อวัตถุดิบต่าง ๆ ถูกเผาในหม้อเผา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1) น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพอง เหลือไว้เพียง CaO

ขั้นตอนที่ 3) เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ ระหว่าง CaO จากหินปูนและดินสอพอง , ซิลิก้า , อลูมิน่า และเหล็กออกไซด์ จากดินดำหรือดินเหนียว และดินดาน

ขั้นตอนที่ 4) เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่าง ๆ และตามด้วยขบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัวลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณ 90 % ของน้ำหนักซีเมนต์
- ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 และยิบซั่ม ปริมาณออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 2.2

ออกไซด์	เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60-67
Sio_2	17-25
Al_2O_3	3-8
Fe_2O_3	0.5-6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1-5.5
$Na_2O + K_2O$	0.5-1.3
TiO_2	0.1-0.4
P_2O_5	0.1-0.2
SO_3	1-3

ตารางที่ 2.2 ค่าออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญอย่าง 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรคัลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3\,CaO \cdot SiO_2$	C_3S
ไดคัลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\,CaO \cdot SiO_2$	C_2S
ไตรคัลเซียม อลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3\,CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
เตตราคัลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF

ตารางที่ 2.3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.1.2.1. สารประกอบหลัก

1. ไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S)

C_3S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม ดังแสดงในรูป 2.2 คุณสมบัติของ C_3S เหมือนกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_3S ถูกกระทบโดยปริมาณยิบซั่ม ปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 35-55 %

2. ไดคัลเซียมซิลิเกต (C_2S)

C_2S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายรูปแบบ มีเพียง βC_2S เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป βC_2S มีคุณสมบัติยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้า ๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ปริมาณ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 15 – 35 %

3. ไตรคัลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

C_3A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Flash Set ทำได้โดยการเติมยิบซั่มลงระหว่างการบดซีเมนต์กำลังอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ในปริมาณ 7-15%

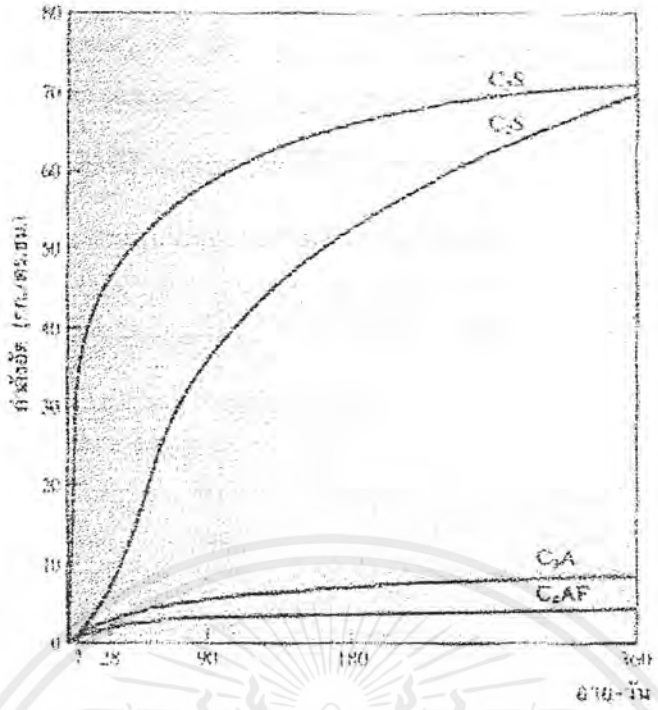
4. เตตราคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

C_4AF ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในปริมาณ 5-10% คุณสมบัติที่สำคัญของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ดังตารางที่ 2.4 และกราฟรูปที่ 2.3

คุณสมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (อาทิตย์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	ปานกลาง (500 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)
5. คุณสมบัติอื่น ๆ	คุณสมบัติเหมือนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

ตารางที่ 2.4 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การพัฒนากำลังของสารประกอบหลัก

2.1.2.2. สารประกอบรอง

1. ยิบซั่ม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)

ยิบซั่มถูกใส่เข้าไปในระหว่างบดปูนเม็ด เพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิบซั่มที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์เกิดกำลังอัดสูงที่สุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิบซั่มที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ

1) อัลคาไลท์ออกไซด์ อันได้แก่ Na_2O และ K_2O

2) ปริมาณ C_3A

3) ความละเอียดของปูนซีเมนต์

2. Free Lime (CaO)

Free Lime เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

1) เมื่อวัตถุดิบมี Lime มากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยา SiO_2, AI_2O_3 และFe_2O_3 ได้หมด

2) ปริมาณ Lime มีไม่มาก แต่จะทำปฏิกิริยากับ Oxide ต่าง ๆ ไม่สมบูรณ์

Free Lime นี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้า ๆ หลังจากที่ซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ซึ่งอาจก่อให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ หรือที่เรียกว่า ซีเมนต์ไม่อยู่ตัวเนื่องจาก Lime

3. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่ จะมี $MgCO_3$ ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้ MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ด ที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะเหมือนกับ CaO คือปริมาตรจะเพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดการไม่อยู่ตัว

การขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

1) ปริมาณของ MgO ในปูนซีเมนต์

2) ขนาดของ MgO ถ้าขนาดเล็กมาก ๆ จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้เร็ว โดยจะไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์ที่แข็งตัว

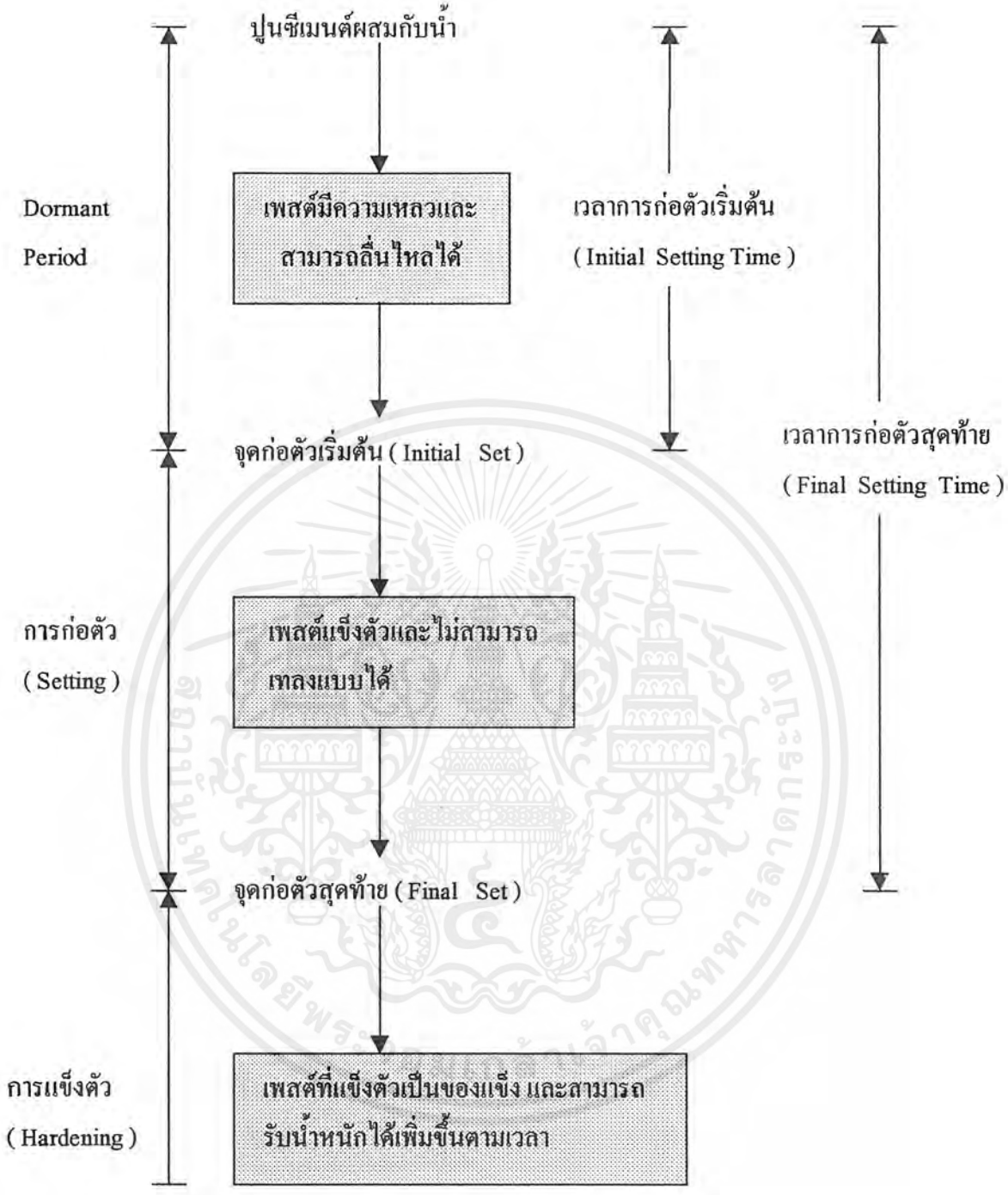
4. อัลคาไลท์ออกไซด์ (Na_2O, K_2O)

อัลคาไลท์ออกไซด์ ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบาประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลท์มาผสมเป็นคอนกรีต ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย ยากต่อการแก้ไข ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลท์ ควรจะเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลท์ต่ำ

2.1.3. การก่อตัวและการแข็งตัว

ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ ก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวช่วงเวลาหนึ่ง โดยคุณสมบัติของเพสต์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงเราเรียกช่วงนี้ว่า "Dormant Period" หลังจากนั้น เพสต์จะเริ่มแข็งตัวถึงแม้ว่ามันยังนิ่มอยู่ แต่ไม่สามารถลื่นไหลเข้าแบบได้แล้ว จุดนี้เราเรียกว่า "จุดก่อตัวเริ่มต้น" (Initial Set) เวลาตั้งแต่ซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดแข็งตัวเริ่มต้น เรียกว่า "เวลาการก่อตัวเริ่มต้น" (Initial Setting Time) การก่อตัวของเพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปจนถึงสภาพที่เป็นของแข็ง หรือ "จุดก่อตัวสุดท้าย" (Final Set) และเวลาที่ทำให้เพสต์ถึงช่วงนี้เรียกว่า"เวลาการก่อตัวสุดท้าย" (Final Setting Time) เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไป และสามารถรับน้ำหนักได้ ขบวนการทั้งมดนี้เราเรียกว่า "การแข็งตัว" (Hardening) ขั้นตอนต่าง ๆ ของการก่อตัวและการแข็งตัวของคอนกรีต แสดงไว้ในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ

1. **อาศัยสารละลาย** ซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด Ions ในสารละลายและ Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

2. **การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง** ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า "Solid State Reaction"

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท

- ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคัลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S)

คัลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด Ca(OH) และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และสมการการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้

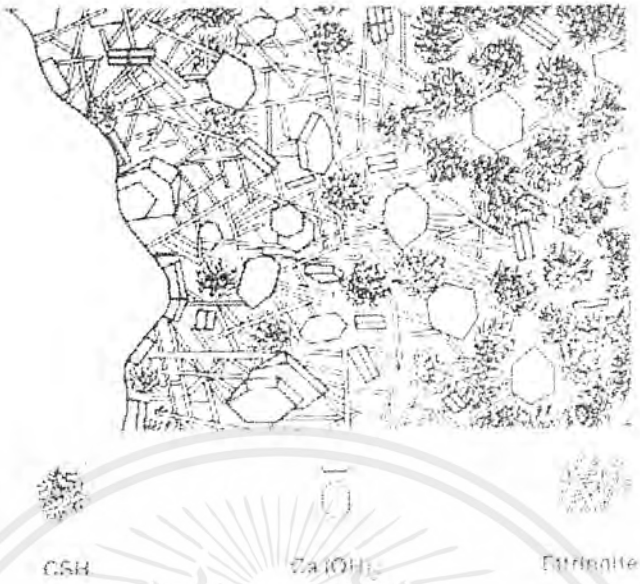
$$2(3CaO\ Sio_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO\,.\,2SiO_2\ 3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

หรือ $$2C_3S + 6H_2O \longrightarrow C_3S_2H_3 + 3CaO(OH)_2$$

$$2(2CaO\,.\,SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO\,.\,2SiO_2\,.\,3H_2O + Ca\,(OH)_2$$

หรือ $$2C_2S + 4H_2O \longrightarrow C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของคัลเซียมซิลิเกต

จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นนี้ จะเกิด Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในที่นี้จะใช้ตัวย่อ CSH แทน Calcium Silicate Hydrate ที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะมีองค์ประกอบและโครงสร้างเป็นอย่างไร

$Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือมี P.H. ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

- ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรคัลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H2O \longrightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$$

หรือ $$C_3A + 6H_2O \longrightarrow 3C_3AH_6$$

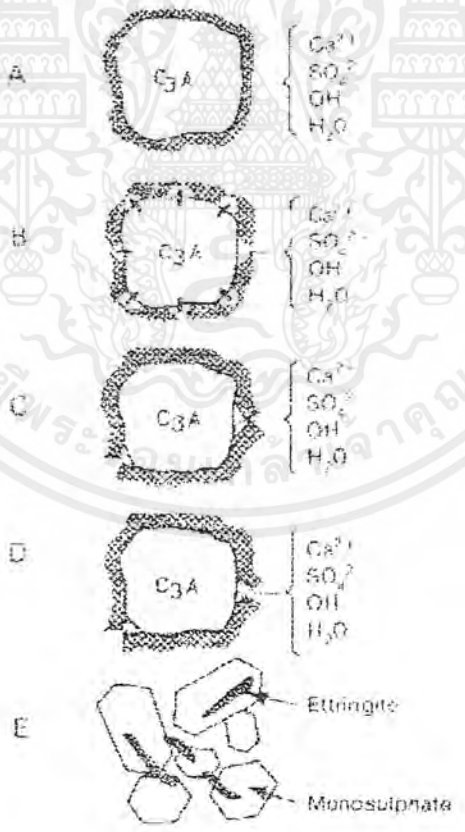
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิบซั่ม ($CaSO_4 . 2H_2O$) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิบซั่มจะทำปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการ

$$C_3A + CaSO_4 . 2H_2O \longrightarrow 3CaO . Al_2O_3 . 3CaSO_4 . 31H_2O \text{ (Ettringite)}$$

ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3S และ C_2S เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 ขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดชั่นของ C_3A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
36766

รูปที่ 2.7 ภาพขยาย Monosulphate และ Ettringite

- ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราคัลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิบซั่ม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการ

$$4\,CaO\,.\,Al_2O_3\,.\,Fe_2O_3\,.\,+\,CaSO_4\,.\,2\,H_2O\,+\,Ca\,(OH)_2 \longrightarrow 3\,Ca(Al_2O_3.Fe_2O_3)\,.\,3\,CaSO_4$$

เวลาที่ใช้เพื่อให้บรรลุ 80 % ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักทั้ง 4 แสดงในตารางที่ 2.5

สารประกอบหลัก	เวลา (วัน)
C_3S	10
C_2S	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบหลัก	เวลา (วัน)
C_3A	6
C_4AF	50

ตารางที่ 2.5 เวลาที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลัก สำเร็จ 80 %

2.1.5. การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

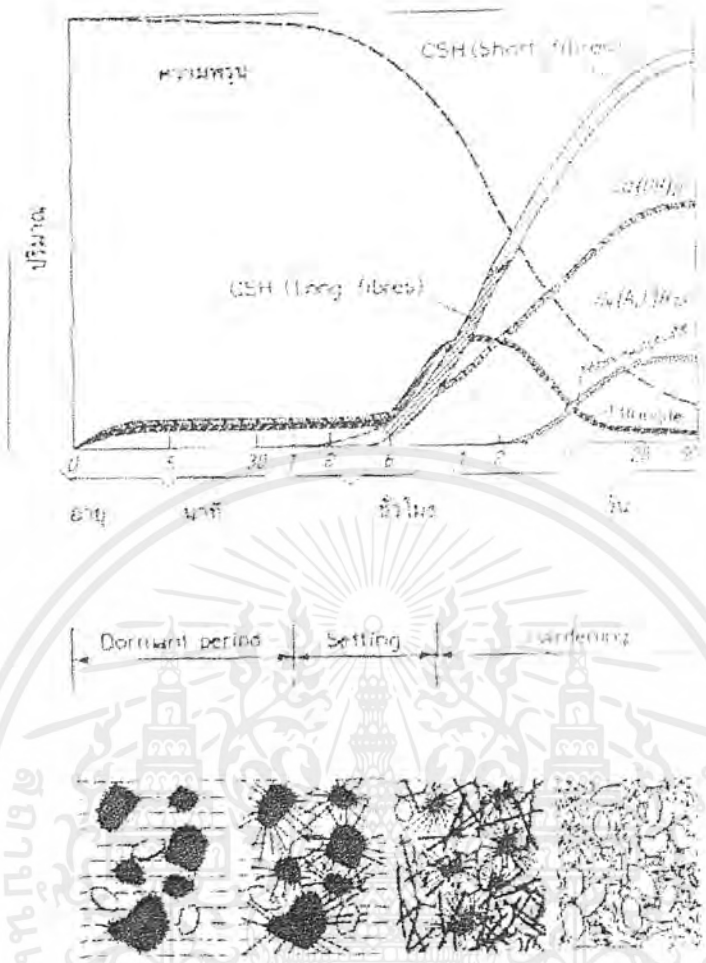
ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยรวมของสารประกอบหลักทั้ง 4 นั้น จะเกิด CSH gel และ Ettringite เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์ จะเป็นการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งอธิบายการเกิด "Dormant Period" อันเป็นช่วงเวลาที่ค่อนข้างจะไม่มีอะไรเกิดขึ้นเป็นเวลา 1 – 2 ชั่วโมง ในขณะนั้น ซีเมนต์เพสต์ยังคงเหลวและมีความสามารถเทได้

เมื่อสิ้นสุดช่วง " Dormant Period " ก็จะเข้าสู่จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Set) ซึ่งเป็นช่วงที่ CSH ที่เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์แตกตัวออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่อไป ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะมีขนาดใหญ่กว่า 2 เท่าของซีเมนต์ก่อนปฏิกิริยา ผลก็คือ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นนี้จะเข้าอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ และเกิดผิวสัมผัสก่อให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ เวลาผ่านไป ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมาก ก่อให้เกิดความเข้มข้นของจุดสัมผัส จำกัดการเคลื่อนที่ของเม็ดซีเมนต์ ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์กลายเป็นของแข็ง นั่นคือ การเข้าสู่จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Set) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

แผนภาพแสดงขบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และโครงสร้างของเพสต์ แสดงในรูปที่ 2.8 โดยซีเมนต์จะแสดงด้วยเม็ดสีดำในขณะที่ $Ca(OH)_2$ จะแสดงด้วยรูปเหลี่ยม ผลึกของ Ettringite แสดงโดยเส้นบาง ๆ สั้น ๆ และ CSH เส้นเข้มมีความยาวพอสมควร จากรูปที่ 2.8 จะพบว่าระหว่าง Dormant Period เม็ดซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Ettringite เป็นส่วนใหญ่ หลังจาก 1 ชั่วโมง CSH gel เริ่มเกิดขึ้นโดยมีรูปร่างเป็นเส้นใยยาว การเกิดและการขยายตัว CSH gel นี้ก่อให้เกิดการก่อตัว ในขณะที่ปริมาณเพิ่มขึ้น ความพรุนของเพสต์จะลดลง และกำลังเริ่มพัฒนาขึ้น

หลังจาก 24 ชั่วโมงไปแล้ว Sulphate Ions ถูกใช้หมดไป อลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์เริ่มก่อตัว และ Ettringite ถูกเปลี่ยนไปเป็น Monosulphate ส่วน C_3S และ C_2S จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่อไป ได้ CSH ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยนั้นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทั้งหมดนี้ จะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ ทำให้ความพรุนของเพสต์ลดลงในระยะยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

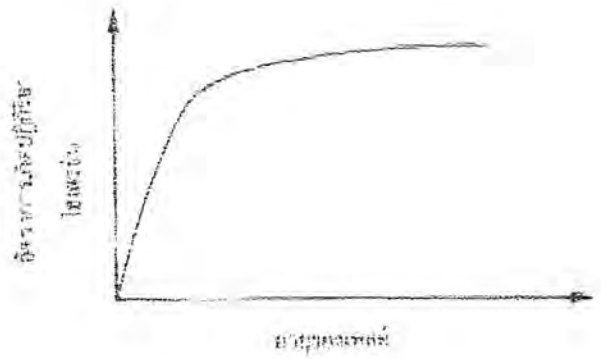
2.1.6. ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะมีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ได้แก่

1. อายุของเพสต์ ยกเว้นช่วง Dormant Period อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมากที่สุดในช่วงแรก และอัตราการลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นดังแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2. องค์ประกอบของซีเมนต์ จากตารางที่ 2.6 พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักแต่ละตัวในซีเมนต์จะแตกต่างกัน

3. ความละเอียดของซีเมนต์ ซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูง จะมีพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับน้ำได้มาก ผลก็คือปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดในอัตราที่เร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของปฏิกิริยา

4. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในช่วงต้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงหลังอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะลดลง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ลดลง ผลก็คือ ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยเฉลี่ยและดีกรีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะลดลง

5. อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของเพสต์

6. น้ำยาผสมคอนกรีต น้ำยาหน่วงหรือน้ำยาเร่งการก่อตัวจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยจะลดและเพิ่มอัตราตามลำดับ

2.1.7. ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ASTM C 150) และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (ม.อ.ก. 15) แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท คือ

ประเภทหนึ่ง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีต หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และสำหรับใช้ในการทำคอนกรีต หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และสำหรับใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไป ที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศที่รุนแรง หรือในที่มีอันตรายจากซัลเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นพิเศษ หรือความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวกับน้ำจะไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงขั้นอันตรายที่คอนกรีตจะแตกร้าวเสียหาย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพญานาคสีเขียวและตราเพชรเม็ดเดียว

ประเภทสอง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานสร้างเขื่อนคอนกรีต กำแพงกันดินหนา ๆ หล่อท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ ตอม่อสะพาน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังรับแรงช้ากว่าปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาคเจ็ดเศียร

ประเภทสาม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็ว (High-early Strength Portland Cement) หรือที่เรียกว่าซูเปอร์ซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ให้กำลังรับแรงสูงในระยะแรก เร็วกว่าปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง มีเนื้อเป็นผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ผลิตโดยการเปลี่ยนสัดส่วนผสม (เพิ่ม C_3S และลด C_2S) หรือโดยการเติมสารอื่น โดยการบดให้ละเอียดยิ่งขึ้น หรือโดยการเผาให้ดีขึ้น มีประโยชน์สำหรับทำคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็ว หรือรื้อแบบเร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต ถนน พื้นและคานที่ต้องถอดแบบเร็ว เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ยังเหมาะกับการทำคอนกรีตในอากาศหนาว คอนกรีตที่หล่อด้วยปูนซีเมนต์ประเภทนี้เพียง 3 วัน จะมีกำลังเท่ากับคอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ธรรมดาที่หล่อแล้วได้ 28 วัน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราเอราวัณ ตราพญานาคสีแดงและตราสามเพชร

ประเภทสี่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low-Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำสุด อัตราการเกิดกำลังของคอนกรีตเป็นไปอย่างช้า ๆ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ใช้มากในการก่อสร้างคอนกรีตหลา เช่น เขื่อน เนื่องจากให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นขณะก่อตัวและแข็งตัว

ประเภทห้า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulphate - Resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ต้านทานซัลเฟตได้สูงกว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่น ๆ (มี C_3A ต่ำสุด) สำหรับใช้กับโครงสร้างที่อยู่ในที่ที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น น้ำหรือดินที่มีด่าง (Alkaline) สูง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีระยะเวลาการแข็งตัวช้ากว่าประเภทหนึ่ง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้างฟ้า ตราปลาฉลาม

ในต่างประเทศ ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทดังกล่าวข้างต้นอาจมีทั้งชนิดกระจายกักฟองอากาศ หรือไม่กระจายกักฟองอากาศ ปูนซีเมนต์ชนิดกระจายกักฟองอากาศจะมีสารสำหรับกระจายกักฟองอากาศผสมอยู่ด้วย สารดังกล่าวทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากกระจายอยู่ในเนื้อคอนกรีต ช่วยต้านทานมิให้น้ำในคอนกรีตแข็งตัวก่อนที่คอนกรีตก่อตัว จึงเหมาะกับงานหล่อคอนกรีตในภูมิประเทศที่มีอากาศหนาวจัด นอกจากนี้ยังทำให้ใช้น้ำผสมน้อยลง เพราะฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะช่วยให้เทคอนกรีตง่าย ลดการแยกตัว เป็นผลให้กำลังคอนกรีตดีตามไปด้วย สมาคมทดสอบ วัสดุอเมริกันให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนดสำหรับปูนซีเมนต์ชนิดกระจายกักฟองอากาศไว้ 3 ประเภท คือ IA , IIA , IIIA ซึ่งตรงกับประเภทหนึ่ง สอง และสาม ตามลำดับ

สารประกอบ	ประเภทหนึ่ง	ประเภทสอง	ประเภทสาม	ประเภทสี่	ประเภทห้า
ไตรคัลเซียมซิลิเกต : C_3S	49	46	56	30	43
ไดคัลเซียมซิลิเกต : C_2S	25	29	15	46	36
ไตรคัลเซียมอลูมิเนียม : C_3A	12	6	12	5	4
เทตราคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ : C_4AF	8	12	8	13	12

ตารางที่ 2.6 ปริมาณร้อยละของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ

จากตารางที่ 2.6 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน จะเห็นความแตกต่างของปริมาณสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่ละประเภท ดังนี้

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งและสาม มีปริมาณของอลูมิเนตและเฟอร์ไรท์เท่ากัน แต่ปูนซีเมนต์ประเภทสามใช้ปริมาณ C_3S มากกว่า แต่ใช้ปริมาณ C_2S น้อยกว่าประเภทหนึ่ง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสองและห้า มีปริมาณ C_3A น้อย ทำให้มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตได้สูง ส่วนปริมาณ C_3S จะถูกลดลง โดยเพิ่มปริมาณ C_2S มากขึ้นทำให้การก่อตัวและแข็งตัวดำเนินไปอย่างช้า ๆ (ช้ากว่าประเภทหนึ่ง)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสี่ ซึ่งเป็นประเภทเกิดความร้อนต่ำ มีปริมาณของ C_3S กับ C_3A น้อยกว่าประเภทอื่น การเกิดแรงอัดในระยะแรกจึงช้ากว่าปูนประเภทหนึ่ง

2.1.8. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่น

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กากเตาถลุง (Portland Blast-Furnace-Slag Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ทำขึ้นโดยการบดกากหรือเม็ดตะกรันเตาถลุง (blas-furnace slag) กับปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาเข้าด้วยกันจนเป็นผงละเอียด และมียิบซัมผสมอยู่ด้วยจำนวนหนึ่งเพื่อควบคุมการก่อตัวและแข็งตัว

กากตะกรันเตาถลุง เป็นของเหลือที่ได้จากขบวนการผลิตเหล็กโดยใช้เตาหลอม เช่น GGBS (Ground Granular Blast Furnace Slag) ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิเกตของคัลเซียม มักเน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซียม และอลูมิเนียม สัดส่วนของกากตะกรันเตาถลุงใช้ประมาณ 25-65 % โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ทั้งหมด คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ชนิดนี้จึงขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณสมบัติของกาก (slag) ที่ใช้

โดยทั่วไปปูนซีเมนต์ชนิดนี้ก่อตัวและแข็งตัวช้า ทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดในระยะแรก (3-7 วัน) อาจน้อยกว่า หรือเกือบเท่ากับที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (ประเภทหนึ่ง) แต่ในระยะหลังอาจให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าเล็กน้อย (หากได้รับการบ่มอย่างดี) ทนต่อซัลเฟต เหมาะสำหรับใช้กับงานก่อสร้างทั่วไป โดยเฉพาะงานคอนกรีตหลาเพราะให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อย

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานา (Portland Pozzolana Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ทำขึ้นโดยการบดปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ธรรมดากับวัสดุจำพวกปอซโซลานิก (Pozzolanic Materials) จนเป็นผงละเอียด

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) อาจได้มาจากธรรมชาติ หรือทำเทียมขึ้น ส่วนที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash หรือ pumice) ส่วนที่ทำเทียม ได้แก่ ดินเหนียวหรือดินดานเผา (burnt clay or shale) ผงถ่านหิน (PFA:Pulverized Fuel Ash) ซึ่งได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า โดยทั่วไปสารปอซโซลานประกอบด้วยออกไซด์ของธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ สัดส่วนของสารปอซโซลานที่ใช้อยู่ระหว่าง 15 – 50 % โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ทั้งหมด

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานาให้คอนกรีตที่มีการขยายตัวน้อย มีความทึบน้ำสูง ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยากับน้ำต่ำเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา จึงเหมาะสำหรับงานคอนกรีตหลา มีอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดช้า เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้า ๆ แต่ให้กำลังรับแรงอัดในระยะหลังเท่ากับหรืออาจมากกว่าเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาโดยบ่มชื้นให้นานกว่าปกติ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนของสารประกอบพวกซัลเฟตได้ดีอีกด้วย จึงเหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่อยู่ในน้ำเค็ม

ปูนซีเมนต์อลูมินาสูง (High Alumina Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ผลิตจากการหลอมส่วนผสมของหินปูนหรือชอล์คกับสารที่มีอลูมินามาก เช่น บอกไซท์ (Bauxite) จนกลายเป็นปูนเม็ด แล้วบดให้ละเอียด สัดส่วนของออกไซด์ในปูนชนิดนี้คือ $CaO = 35 – 44\ \%$ $Al_2O_3 = 33 – 44\ \%$ $SiO_2 = 3 - 11\ \%$ $Fe_2O_3 = 4 – 12\ \%$

ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดเร็วให้ความร้อนมาก คอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังรับแรงอัดภายในเวลา 24 ชั่วโมง ได้เท่ากับกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่อายุ 28 วัน การพัฒนากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ภายหลัง 24 ชั่วโมง จนถึงประมาณ 2 เท่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา นอกจากนี้ยังมีความทนทานสูงต่อการกัดกร่อนของสารประกอบพวกซัลเฟต จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นคอนกรีตในน้ำทะเลและในที่ต้องการกำลังความแข็งแรงในเวลาสั้น เช่นงานซ่อมคอนกรีต ข้อเสียของปูนชนิดนี้คือ ในบริเวณที่มีอากาศร้อนชื้น หรือเมื่อใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานไปนาน ๆ จะเกิดการสลายตัวในเนื้อการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ ทำได้โดยลดลง จึงไม่เหมาะสำหรับงานโครงสร้างอาคาร

ปูนซีเมนต์ซัลเฟตสูง (Super – sulphated Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากส่วนผสมของเม็ดตะกรันเตาถลุง คัลเซียมซัลเฟตหรือปูนขาว และปูนซีเมนต์หรือปูนเม็ดโดยบดรวมกัน หรือแยกบดแล้วผสมเข้าด้วยกัน มีคุณสมบัติทนทานต่อกรด น้ำมันและการกัดกร่อนของสารพวกซัลเฟตได้เป็นอย่างดี ให้ปริมาณความร้อนที่ได้จากการทำปฏิกิริยากับน้ำต่ำ แต่ต้องการน้ำผสมมาก และต้องผสมให้นานกว่าปกติ

ปูนซีเมนต์ขยายตัว (Expensive Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการบดส่วนผสมของปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา กับ ยิบซัม บอกไซด์ คัลไซด์ ซึ่งเป็นสารทำให้เกิดการขยายตัวเข้าด้วยกัน แตกต่างจากปูนซีเมนต์ชนิดอื่น ๆ ตรงที่เมื่อก่อตัวและแข็งตัวมันจะขยายตัวออกก่อนเป็นการลดรอยแตกร้าวอันเนื่องมาจากการหดตัวของคอนกรีต (drying shrinkage)

ปูนซีเมนต์งานก่อ (Masonry Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ทำขึ้นจากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา หรือปูนปอซโซลาน หรือปูนกากเตาถลุง กับสารอื่นๆ เช่น ยิบซัม ฝุ่นปูนขาว ดิน สอพอง ดิน ทาล์ค เป็นต้น เพื่อให้ได้ปูนก่อที่มีคุณสมบัติเหลวลื่น ปั้นง่าย เหมาะสำหรับงานก่อหิน ก่ออิฐ

ปูนซีเมนต์ผสม หรือปูนซีเมนต์ซิลิก้า (Silica Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการบดปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดากับทรายประมาณ 25 – 30 % จนละเอียด ปริมาณเนื้อซีเมนต์จึงมากขึ้น ราคาจึงถูกลง การก่อตัวและแข็งช้ากว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา แต่ไม่ยืดหรือหดตัวมากเมื่อแข็งตัวแล้ว จึงลดการแตกร้าวที่ผิวลงได้เหมาะกับงานก่ออิฐถือปูน ทำถนนภายในบ้าน เทพื้น ตอม่อ หล่อภาชนะคอนกรีต หล่อท่องานอุตสาหกรรมทำกระเบื้องมุงหลังคา งานอาคาร 2 ถึง 3 ชั้น ตึกแถว หรืองานที่ไม่ต้องการกำลังรับแรงอัดมาก ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราเสือ ตราพูเห่า และตรานกอินทรีย์

ปูนซีเมนต์ขาว (White Cement) มีคุณภาพเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทุกประการ แต่มีสีขาวสะอาด เนื่องจากมีปริมาณ C_4AF อยู่น้อยมาก ราคาแพงกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา ปูนชนิดนี้ใช้ทำหินขัด หินล้าง แต่งแนวกระเบื้องเคลือบที่กรุพื้น ผนัง ฯลฯ บรรจุถุงกระดาษ ถุงละ 40 กิโลกรัม

2.1.9. คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ต้องมีคุณภาพสม่ำเสมอ และเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด มาตรฐานการทดสอบของอเมริกัน (ASTM) และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (มอก.15) ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดคุณสมบัติทางเคมีและทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

นอกจากเกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางเคมีที่ให้ไว้ในตารางที่ 2.7 แล้วมาตรฐานดังกล่าวได้ให้สูตรคำนวณเพื่อหาปริมาณร้อยละของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังต่อไปนี้

เมื่ออัตราส่วนร้อยละของอลูมินัมออกไซด์ต่อเฟอร์ริกออกไซด์มีค่าเท่ากับ 0.64 หรือมากกว่า

$$\%\ C_3S = (4.071 \times \%CaO) - (7.600 \times \%SiO_2) - (6.718 \times \%Al_2O_3) - (1.430 \times \%Fe_2O_3) - (2.852 \times \%SO_3)$$

$$\%\ C_2S = (2.876 \times \%SiO_2) - (0.7544 \times \%C_3S)$$

$$\%\ C_3A = (2.650 \times \%Al_2O_3) - (1.692 \times \%Fe_2O_3)$$

$$\%\ C_4AF = (3.043 \times \%Fe_2O_3)$$

เมื่ออัตราส่วนร้อยละของอลูมินัมออกไซด์ต่อเฟอร์ริกออกไซด์มีค่าน้อยกว่า 0.64 จะเกิดสารละลายแข็ง (Solid Solution : ss) ของคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ [$ss(C_4AF + C_2F)$] ขึ้น โดยไตรคัลเซียมอลูมิเนตจะไม่ปรากฏ

$$\%\ C_3S = (4.071 \times \%CaO) - (7.600 \times \%SiO_2) - (4.479 \times \%Al_2O_3) - (2.859 \times \%Fe_2O_3) - (2.852 \times \%SO_3)$$

$$\%\ C_2S = (2.876 \times \%SiO_2) - (0.7544 \times \%C_3S)$$

$$\%\ ss(C_4AF + C_2F) = (2.100 \times \%Al_2O_3) + (1.072 \times \%Fe_2O_3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางเคมี ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน มอก. 15-2 (แก้ไขเพิ่มเติม พศ. 2517)

	ประเภทหนึ่ง	ประเภทสอง	ประเภทสาม	ประเภทสี่	ประเภทห้า
1. ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ำสุดร้อยละ		21.0			
2. อลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) สูงสุดร้อยละ		6.0			
3. เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) สูงสุดร้อยละ		6.0		6.5	
4. มักเนเซียมออกไซด์ (MgO) สูงสุดร้อยละ	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
5. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) สูงสุดร้อยละ					
5.1 เมื่อมี 3 CaO. Al_2O_3 ร้อยละ8 หรือน้อยกว่า	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
5.2 เมื่อมี 3 CaO. Al_2O_3 มากกว่าร้อยละ 8	3.5		4.5		
6. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition) สูงสุดร้อยละ	3.0	3.0	3.0	2.50	3.0
7. กากที่ไม่ละลายในด่าง (insoluble residue) สูงสุดร้อยละ	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
8. ไตรคัลเซียมซิลิเกต (3 Cao.SiO_2) สูงสุดร้อยละ				35.0	
9. ไดคัลเซียมซิลเกต (2 CaO.SiO_2) ต่ำสุดร้อยละ				40.0	
10. ไตรคัลเซียมอลูมิเนต (3CaO.Al_2O_3) สูงสุดร้อยละ		8.0	15.0	7.0	5.0
11. ผลบวกของไตรคัลเซียมซิลิเกตและไตรคัลเซียมอลูมิเนต		58.0			
12. เทตราคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ บวกสองเท่าไตรคัลเซียมอลูมิเนต [4 CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3+2(3 CaO.Al_2O_3)] หรือสารละลายแข็ง [4 Cao.Al_2O_3.Fe_2O_3 + 2 CaO.Fe_2O_3] แล้วแต่กรณี					20.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน มอก. 15-2514 (แก้ไขเพิ่มเติม พศ. 2517)

	ประเภทหนึ่ง	ประเภทสอง	ประเภทสาม	ประเภทสี่	ประเภทห้า
1. ความละเอียด (fineness)					
พื้นผิวจำเพาะ (specific surface) ตารางเซนติเมตรต่อกรัม					
(ให้เลือกวิธีทดสอบได้)					
1.1 ทดสอบด้วยเทอร์บิดิมิเตอร์ (turbidimeter test, Wagner)					
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	1600	1600		1600	1600
ค่าต่ำสุดสำหรับตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่งตารางเซนติเมตรต่อกรัม	1500	1500		1500	1500
1.2 ทดสอบด้วยแอร์เพอมีอะบิลิตี (air permeabiliry test, Blaine)					
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	2800	2800		2800	2800
ค่าต่ำสุดสำหรับตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่งตารางเซนติเมตรต่อกรัม	2600	2600		2600	2600
2. ความอยู่ตัว (soundness)					
การขยายตัวโดยวิธีออโตเคลฟว์ (autoclave expansion)					
สูงสุดร้อยละ	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
3. ระยะเวลาก่อตัว (time of setting)					
(ให้เลือกทดสอบได้)					
3.1 ทดสอบแบบกิลโมร์ (Gillmore test)					
การก่อตัวระยะต้น (initial set) ไม่น้อยกว่า-นาที	60	60	60	60	60
การก่อตัวระยะปลาย (final set) ไม่มากกว่า- ชั่วโมง	10	10	10	10	10
3.2 ทดสอบแบบไวแคต (Vicat test)					
การเริ่มก่อตัว	45	45	45	45	45
4. ปริมาณอากาศในมอร์ตา (air content of mortar) เมื่อเตรียมและ					
ทดสอบตามวิธีมาตราฐานโดยปริมาตรสูงสุด ไม่มากกว่าร้อยละ	12	12	12	12	12
5. แรงอัด (compressive strength)					
แรงอัดลูกอุกาบาศก์มอร์ตา (mortar cube) ซึ่งประกอบด้วย					
ปูนซีเมนต์ 1 ส่วนและทรายมาตราฐานที่ร่อนได้ตามขนาด(graded					
standard sand) 2.75 ส่วนโดยน้ำหนัก เตรียมและทดสอบตาม					
วิธีมาตราฐาน ต้องเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่กำหนดตามเกณฑ์อายุ					
ข้างล่างนี้					
1 วันในอากาศชื้น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร			120		
1 วันในอากาศชื้น 2 วันในน้ำ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	85	70	210		
1 วันในอากาศชื้น 6 วันในน้ำ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	150	130		55	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ประเภทหนึ่ง	ประเภทสอง	ประเภทสาม	ประเภทสี่	ประเภทห้า
1 วันในอากาศชื้น 27 วันในน้ำ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	245	245		140	210
6. ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ (heat of hydration)					
7 วัน สูงสุด แคลอรีต่อกรัม		70		60	
28 วัน สูงสุด แคลอรีต่อกรัม		80		70	
7. การก่อตัวผิดปกติ (false set)					
ระยะจมสุดท้าย (final penetration) ต่ำสุด ร้อยละ	50	50	50	50	50
8. การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต (sulphate expansion)					
14 วัน สูงสุดร้อยละ					0.045

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติที่ต้องการของปูนซีเมนต์ผสม

คุณสมบัติ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
1. ความละเอียด (Fineness) พื้นผิวจำเพาะ (Specific Surface) ทดสอบด้วยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีแบบของเบลน (Air Permeability Test, Blaine) ต่ำสุด ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	2800	ให้ใช้ในวิธีมาตราฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูน-ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 เล่ม 6 ข้อกำหนดการหาความละเอียดโดยแอร์เพร์มีอะบิลิติ (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 204)
2. ความอยู่ตัว (Soundness) การขยายตัวโดยวิธีออโตเคลฟว์ (Autoclave Expansion) สูงสุด ร้อยละ	0.6	ให้ใช้ในวิธีมาตราฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูน-ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 เล่ม 11 ข้อกำหนดการหาความละเอียดโดยวิธีออโตเคลฟว์ (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 151)
3. ระยะเวลาการก่อตัว (Time of Setting) ทดสอบแบบไวแคต (Vicat Test) ไม่น้อยกว่า - นาที	45 นาที	ให้ใช้ในวิธีมาตราฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูน-ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 เล่ม 9 ข้อกำหนดการก่อตัวโดยใช้เข็มแบบไวแคต (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 191)
4. ปริมาณอากาศในมอร์ต้า (Air Content of Mortar) โดยปริมาณสูงสุด ร้อยละ	12	ให้ใช้ในวิธีมาตราฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูน-ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 เล่ม 13 ข้อกำหนดการหาปริมาณอากาศในมอร์ต้า (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 185)
5. แรงอัด (Compressive Strenght) แรงอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ต้า (Mortar Cube) ต้องเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่กำหนดตามเกณฑ์ อายุข้างล่างนี้ หนึ่งวันในอากาศชื้น เมกะปาสกาล (ประมาณกิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร) สองวันในน้ำ (ประมาณกิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร) หนึ่งวันในอากาศชื้น เมกะปาสกาล (ประมาณกิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร) หกวันในน้ำ เมกะปาสกาล (ประมาณกิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร)	 6.4 65 11.3 115	ให้ใช้ในวิธีมาตราฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูน-ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 เล่ม 12 ข้อกำหนดการหาแรงอัด (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 109)
6. การก่อตัวผิดปกติ (Ealse Set) ระยะจมสุดท้าย (Final Penetration) ต่ำสุด ร้อยละ	50	ให้ใช้ในวิธีมาตราฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูน-ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 เล่ม 15 ข้อกำหนดก่อตัวผิดปกติ (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 451)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2. สารผสมเพิ่ม

2.2.1. คำจำกัดความ

สารผสมเพิ่ม หรือ น้ำยาผสมคอนกรีต (Concrete Admixture) หมายถึง สารใด ๆ นอกเหนือไปจากน้ำ ปูนซีเมนต์ หิน และทราย อันใช้เติมลงไปในส่วนผสมของคอนกรีตไม่ว่าจะก่อนหรือกำลังผสม เพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพคอนกรีตขณะยังเหลวอยู่ หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพของวัสดุ , สิ่งแวดล้อม และสภาพการทำงาน วัตถุประสงค์ทั่ว ๆ ไปของการใช้น้ำยาผสมคอนกรีตก็คือ ปรับปรุงความสามารถเทได้ , เร่งหรือหน่วงเวลาการก่อตัว , ควบคุมหรือดัดแปลงการพัฒนากำลังอัด ปรับปรุงคุณสมบัติด้านการต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน การทนต่อกรดและซัลเฟต เป็นต้น หรือเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง แต่พึงระลึกไว้เสมอว่าสารผสมเพิ่มมิได้มีส่วนช่วยแก้ไขคอนกรีตที่มีส่วนผสมไม่ดีหรือการปฏิบัติงานที่ไม่ถูกต้อง

ในปัจจุบันได้มีการขยายการใช้สารผสมเพิ่มไปทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษ กล่าวคือ ใช้ปูนซีเมนต์ทั่ว ๆ ไป ผสมกับสารผสมเพิ่มที่เหมาะสม ซึ่งจะปรับปรุงหรือเปลี่ยนคุณสมบัติของคอนกรีตบางประการได้ สารผสมเพิ่มที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นของเหลว แต่บางชนิดเป็นผงซึ่งแตกต่างกันตามวัสดุพื้นฐาน วัสดุเหล่านี้จะต้องไม่ทำลายคุณภาพของคอนกรีตทั้งในระยะสั้นและระยะยาว รวมทั้งต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารที่เป็นส่วนประกอบของซีเมนต์ แร่ธาตุในมวลรวมและต่อเหล็กเสริม ดังนั้นก่อนที่จะมีการใช้น้ำยาผสมคอนกรีต ควรมีการศึกษาข้อจำกัดการใช้งาน , การตรวจสอบคุณภาพและทดสอบประสิทธิภาพ รวมทั้งควรใช้ตามข้อแนะนำของผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด มิฉะนั้นอาจจะก่อให้เกิดผลเสียหายได้

2.2.2. ประเภทของสารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่มที่ผลิตออกจำหน่ายทั่ว ๆ ไป มีหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 4 กลุ่ม คือ

1.) สารกักกระจายฟองอากาศ (Air-Entraining Agent)

ใช้เพื่อเพิ่มความทนทาน กรณีที่คอนกรีตต้องสัมผัสกับสภาพที่เย็นจัด เช่น ในพื้นห้องเย็นหรือในบริเวณที่มีหิมะปกคลุมบางช่วงเวลา และสารผสมเพิ่มนี้ยังปรับปรุง ความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลว

2.) สารเคมีผสมคอนกรีต (Chemical Admixture)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำที่เติมลงไปในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต เช่น เพื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสม ควบคุมการก่อตัวและการแข็งตัวหรือปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตเหลว เป็นต้น

3..) สารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral Admixture)

มีลักษณะเป็นผงละเอียด ใช้ปรับปรุงความสามารถในการใช้งาน เพิ่มความคงทน ทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในการเกาะตัวดีขึ้น และยังสามารถใช้ทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ได้บางส่วน

4..) สารผสมเพิ่มอื่น ๆ

ได้แก่ สารผสมเพิ่มอื่นๆ ที่ไม่จัดอยู่ใน 3 ประเภทแรก ซึ่งผลิตขึ้นมาเพื่อใช้งานเฉพาะอย่างเท่านั้น

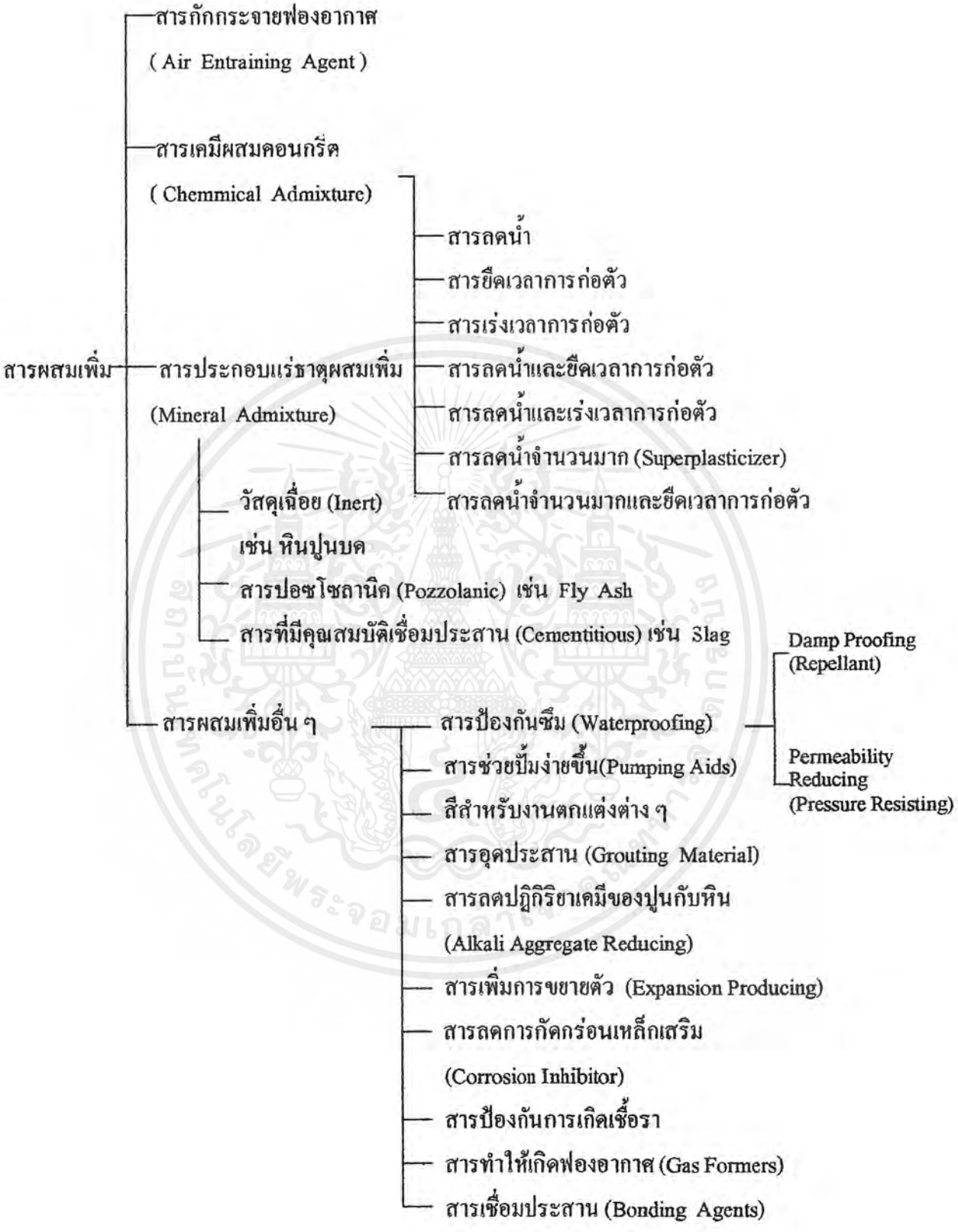
รายละเอียดของการแบ่งสารผสมเพิ่มแต่ละชนิดแสดงไว้ใน ตารางที่ 2.10

2.2.3 การใช้สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่มได้เข้ามามีบทบาทอย่างรวดเร็วในวงการก่อสร้าง ประเทศที่เจริญแล้วได้มีการนำสารผสมเพิ่มมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตกันอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกาการใช้คอนกรีตที่ใส่สารผสมเพิ่มถึง 90 % ในออสเตรเลีย ญี่ปุ่น และ เยอรมัน มียอดการใช้ 80 % , 80 % และ 60 % ตามลำดับ ส่วนในประเทศไทยวงการก่อสร้างเพิ่งตื่นตัวเรื่องการใช้สารผสมเพิ่มอย่างจริงจังในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ทำให้ยอดคอนกรีตที่ผสมสารผสมเพิ่มยังมีปริมาณไม่มาก แต่ยอดปริมาณการใช้ในปัจจุบันได้เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วมากก็ด้วย เหตุผลที่สำคัญ คือ คอนกรีตที่ใส่สารเพิ่มจะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการทำงานมาก คือ คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้หรือเหลวอยู่นานกว่าคอนกรีตทั่วไปๆ ทำให้สะดวกทั้งด้านการลำเลียงและการทำให้คอนกรีตอัดแน่นในแบบซึ่งส่งผลดีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลงด้วย สิ่งสำคัญที่พึงระลึกไว้เสมอ คือ สารผสมเพิ่มไม่สามารถช่วยแก้ไขคอนกรีตที่มีส่วนผสมไม่ดี หรือการใช้งานที่ไม่ถูกต้อง หากแต่ใช้เมื่อไม่สามารถปรับปรุงคอนกรีตด้วยการปรับปรุงส่วนผสม

ในตารางที่ 2.11 แสดงคุณสมบัติของคอนกรีตที่สามารถปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงได้โดยสารผสมเพิ่มประเภทต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 2.10 การแบ่งประเภทของสารผสมเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติของคอนกรีตที่ถูกปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโดยสารผสมเพิ่มประเภทต่าง ๆ

คุณสมบัติที่ต้องการ	ประเภทของสารผสมเพิ่ม					
	สารลดน้ำ	สารเร่ง	สารหน่วง	สารลดน้ำจำนวนมาก	สารกักกระจายฟองอากาศ	อื่น ๆ
การก่อตัวและแข็งตัว						
- เร่งอัตราการพัฒนากำลังอัดช่วงต้น	**	*		*		
- เร่งการก่อตัว		*				
- หน่วงการก่อตัว			*			
ความสามารถเทได้และคุณสมบัติของคอนกรีตเหลวอื่น ๆ						
- เพิ่มความสามารถเทได้โดยกำลังอัดไม่สูญเสียไป	*			*		
- ลดอุณหภูมิจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	**		**	**		
- ลดการเยิ้ม					*	*
- ลดการแยกตัว					*	*
- เพิ่มความสามารถปั๊มได้				**	*	*
คอนกรีตแข็งตัวแล้ว						
- เพิ่มกำลังอัดโดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณซีเมนต์หรือลดความสามารถเทได้	*			*		
- ปรับปรุงความทนทาน	**			*	*	
- ปรับปรุงความสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำ	*			*	**	*
- ปรับปรุงแรงยึดระหว่างคอนกรีต						*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4. ข้อระวังในการใช้งาน

ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้สารผสมเพิ่ม มักเนื่องมาจากความไม่เข้าใจว่าสารผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ๆ มีผลต่อคอนกรีตอย่างไรบ้าง ข้อพึงระวังที่ผู้ใช้ควรยึดปฏิบัติ คือ

1.) สารผสมเพิ่มที่ จะนำมาใช้ควรมีคุณสมบัติตรงตามมาตราฐาน เช่น ของประเทศไทยควรเป็นไปตาม มอก. 733-2530 "สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต" รวมทั้งต้องมีข้อมูลเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

- ผลของสารผสมเพิ่มต่อคอนกรีต
- อิทธิพลอื่น ๆ ที่สารผสมเพิ่มมีต่อคอนกรีตไม่ว่าจะเป็นทางที่เป็นประโยชน์หรือผลเสีย
- คุณสมบัติทางกายภาพของสารผสมเพิ่ม
- ความเข้มข้นของส่วนประกอบที่สำคัญ
- ส่วนประกอบอื่น ๆ ที่อาจมีผลเสียต่อคอนกรีต เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต ซัลไฟด์ ฟอสเฟต น้ำตาล ไนเตรด และ แอมโมเนีย
- PH
- ผลเสียต่อผู้ใช้ทั้งระยะสั้นและระยะยาว
- วิธีการเก็บและอายุการใช้งาน
- การตระเตรียมและวิธีการผสมเข้าไปในส่วนผสมคอนกรีต
- ปริมาณที่ควรใช้ ปริมาณสูงสุดที่อาจใช้ได้ และข้อเสียที่เกิดจากการใช้เกินปริมาณกำหนด

2.) ควรใช้สารผสมเพิ่มในปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำ พร้อมกับตรวจดูผลว่าเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ การเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดสอบควรทำในสภาวะของการใช้งาน เพราะผลอันแท้จริงของสารผสมเพิ่มต่อคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบต่าง ๆ คือชนิดของซีเมนต์ คุณสมบัติของมวลรวมและสารไม่บริสุทธิ์ที่มีอยู่ ส่วนผสม วิธีและระยะเวลาการผสม ช่วงเวลาที่ใส่สารผสมเพิ่ม อุณหภูมิของคอนกรีตและสภาพการบ่ม

3.) ควรใช้วิธีการวัดปริมาณสารผสมเพิ่มที่แน่นอน ซึ่งสำคัญมากในกรณีของสารกักกระจายฟองอากาศและสารผสมเพิ่มเคมี ทั้งนี้เพราะปริมาณที่ผสมมักต่ำกว่า 0.1 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ดังนั้นหากมีการผสมเกินปริมาณที่กำหนดอาจก่อให้เกิดผลเสียอย่างมาก

4.) ผลของสารผสมเพิ่มต่อคุณสมบัติอื่น ๆ ของคอนกรีต สารผสมเพิ่มทั่ว ๆ ไปมักมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตหลายอย่างพร้อม ๆ กัน

2.2.5 สารกักกระจายฟองอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกักกระจายฟองอากาศ เป็นสารอินทรีย์ที่ทำปฏิกิริยาบนผิว(Organic Surfactants) โดยก่อให้เกิดฟองอากาศในปริมาณที่สามารถควบคุมได้ในเนื้อคอนกรีต ฟองอากาศขนาดเล็กกระจายตัวอยู่สม่ำเสมอและจะคงตัว โดยทั่วไปจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25-1 มิลลิเมตร

ฟองอากาศที่เกิดขึ้นนี้ (Entrain Air) แตกต่างจากโพรงอากาศ (Entrapped Air) ซึ่งมีขนาดใหญ่และจะเกิดในบางบริเวณอันเนื่องมาจากการจี้เขย่าคอนกรีตไม่ดีพอ สารกักกระจายฟองอากาศนี้ช่วยทำให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการแข็งตัวของน้ำ (Frost) หรือเกลือที่ทำให้น้ำแข็งละลาย (De-Icing Salts) นอกจากนี้ยังช่วยเสริมความสามารถเทได้ของคอนกรีตสดด้วย

- วัตถุดิบ

สารกักกระจายฟองอากาศนี้ผลิตขึ้นจากผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมทำกระดาษ, น้ำมัน และอาหารสำเร็จรูปจากสัตว์ วัตถุดิบที่สำคัญได้แก่ ยางไม้ ไขมัน หรือน้ำมันสัตว์และพืช หรือจากกรดซึ่งได้มาจากยางไม้หรือจากไขมันของสัตว์และพืช เป็นต้น

- ลักษณะการทำงาน

สารกักกระจายฟองอากาศ ประกอบด้วยตัวเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบนผิวของอนุภาค ซึ่งมักรวมกันอยู่ระหว่างผิวน้ำและอากาศ ทำให้แรงตึงผิวของน้ำลดลง ก่อให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กมากกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีต โดยฟองอากาศนี้จะถูกทำให้อยู่ตัวด้วย

- ผลของสารกักกระจายฟองอากาศต่อคอนกรีตสด

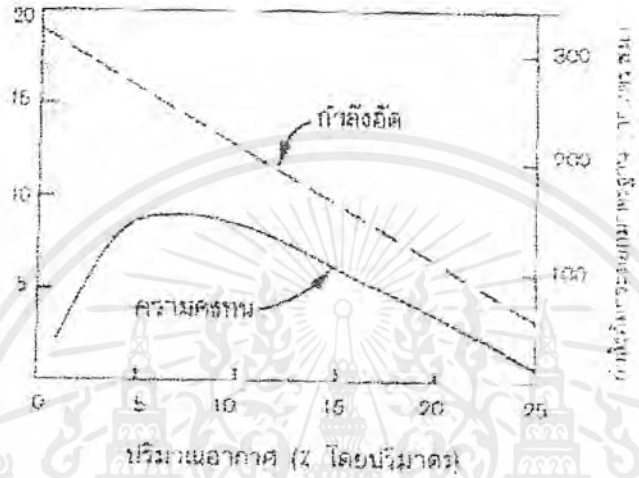
การกักกระจายฟองอากาศมีผลดีต่อความสามารถในการใช้งานและการเกาะตัวของคอนกรีตเหลว โดยลดการแยกตัวและการเยิ้ม ไม่ว่าจะมีค่ายุบตัวมากหรือน้อยก็ตาม ในคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวเดียวกัน คอนกรีตที่มีฟองอากาศจะใช้งานได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา เพราะเทลงแบบและบดอัดได้ง่ายกว่า หรือมีความสามารถเทได้ดีกว่านั่นเอง ในส่วนผสมที่เหลว ฟองอากาศจะช่วยลดการแยกแยะที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการขนส่งและการใช้งาน

การเพิ่มปริมาณอากาศ 5% จะทำให้ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้น 15-50 มม. โดยมีปริมาณเพสท์คงที่ ทั้งนี้เป็นเพราะฟองอากาศขนาดเล็กเหล่านี้ทำหน้าที่เสมือนเป็นมวลรวมละเอียดขนาดเล็กซึ่งยืดหยุ่นได้และมีแรงเสียดทานต่ำ จึงช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างของแข็งภายในเนื้อคอนกรีตเหลว คอนกรีตจึงมีลักษณะคล้ายกับว่ามีทรายมาก คุณสมบัตินี้ใช้ได้ผลดีสำหรับส่วนผสมที่ขาดอนุภาคขนาดเล็ก ตามปกติจะไม่ใช้การกักกระจายฟองอากาศเพื่อเพิ่มค่ายุบตัว แต่ใช้เพื่อลดปริมาณทรายและน้ำสำหรับค่ายุบตัวหนึ่ง ๆ การเพิ่มปริมาณอากาศ 5 % สามารถทำให้ลดปริมาณน้ำได้ 20-30 ลิตร / ลบ.ม. ซึ่งทำให้เกิดกำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น และเป็นส่วนหนึ่งที่ทดแทนกำลังอัดที่ลดลงเพราะปริมาณอากาศที่สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ผลของสารกักกระจายฟองอากาศต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว**

ปริมาณฟองอากาศภายในคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นมีผลเสียต่อกำลังอัดของคอนกรีต ตามปกติคอนกรีตที่มีฟองอากาศกำลังอัดจะลด 5% ทุกๆการเพิ่มขึ้นของฟองอากาศ 1% รูปที่ 2.10แสดงผลให้เห็นว่า ปริมาณอากาศที่มากเกินไปจะทำให้ทั้งกำลังอัดและความคงทนของคอนกรีตลดน้อยลง



รูปที่ 2.10 ผลของการกักกระจายฟองอากาศต่อกำลังและความคงทน

จะเห็นได้ว่าสารกักกระจายฟองอากาศจะมีผลกระทบต่อความสามารถเทได้ กำลังอัดและปริมาตรของคอนกรีต ดังนั้นผู้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจำต้องนำปัจจัยเหล่านี้มาพิจารณาด้วย

- **ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการกักกระจายฟองอากาศ**

ผลของการกักกระจายฟองอากาศขึ้นอยู่กับ

1.) วัสดุผสมคอนกรีตและสัดส่วนผสม

- ส่วนละเอียด เช่น ทรายละเอียด หรือปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจะยับยั้งการเกิดฟองอากาศ
- ปริมาณฟองอากาศจะเพิ่มขึ้นโดยลดขนาดของหิน
- สัดส่วนของทรายมีความสำคัญต่อปริมาณฟองอากาศการเพิ่มทรายขนาด 300-600 ไมโครเมตร จะก่อให้เกิดปริมาณฟองอากาศมากขึ้น แต่ถ้ามีทรายที่ละเอียดมาก โดยเฉพาะทรายที่ได้จากการบดหินจะยับยั้งการเกิดฟองอากาศ
- น้ำที่เหมาะสำหรับคอนกรีตไม่มีผลต่อปริมาณฟองที่เกิดขึ้น แต่น้ำกระด้างจะยับยั้งการเกิดฟองอากาศ ดังนั้นจึงต้องใส่ปริมาณสารกักกระจายฟองอากาศเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การใช้สารผสมเพิ่มอื่นๆร่วมกับสารกักกระจายฟองอากาศจะต้องทำอย่างระมัดระวัง ในบางกรณีอาจจะยับยั้งการเกิดฟองอากาศ หรือในบางกรณีอาจจะต้องใส่สารผสมอื่นๆหลังจากที่ฟองอากาศเกิดขึ้นก่อนแล้ว เป็นต้น

2.) การผสมและการจี้เขย่า

- ปริมาณฟองอากาศจะถูกกระทบด้วย ชนิด อัตราและเวลาที่ใช้ในการผสม รวมทั้งปริมาณคอนกรีตที่ถูกผสม การยืดเวลา การผสมจะส่งผลให้ฟองอากาศลดลง
- คอนกรีตที่มีความสามารถเทได้ต่ำมาก จะก่อให้เกิด ฟองอากาศได้ยากมากและปริมาณฟองอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถเทได้มากขึ้น ตลอดช่วงค่ายุบตัว 25-150 มิลลิเมตร
- การจี้เขย่าคอนกรีตมากเกินไปจะส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศลดลง

3.) สภาพแวดล้อม

- ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตจะเป็นปฏิภาคผกผันกับอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 10°C เป็น 32°C ปริมาณฟองอากาศจะลดลงประมาณ 50%

2.2.6. สารเคมีผสมคอนกรีต

สารเคมีผสมคอนกรีต คือ สารละลายเคมีชนิดต่างๆที่ใส่ผสมลงในคอนกรีตเพื่อเปลี่ยนเวลาการก่อตัวและลดปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C494 แบ่งสารเคมีผสมเพิ่มเหล่านี้ออกเป็น 7 ประเภท คือ

ประเภท A สารลดปริมาณ (Water Reducing)

ประเภท B สารยืดเวลาการก่อตัว (Retarding)

ประเภท C สารเร่งเวลาการก่อตัวและแข็งตัว (Accelerating)

ประเภท D สารลดปริมาณน้ำและยืดเวลาการก่อตัว (Water Reducing and Retarding)

ประเภท E สารลดปริมาณน้ำและเร่งเวลาการก่อตัว (Water Reducing and Accelerating)

ประเภท F สารลดปริมาณน้ำจำนวนมาก (Water Reducing-High Range)

ประเภท G สารลดปริมาณน้ำจำนวนมากและยืดเวลาการก่อตัว (Water Reducing –High Range and Retarding)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.) สารลดปริมาณน้ำ

สารลดปริมาณน้ำหรือที่รู้จักในชื่อ Plasticizer หมายถึง สารผสมเพิ่มที่เติมลงในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อลดปริมาณน้ำที่จะต้องใช้ผสมโดยได้ความข้นเหลวตามกำหนด และไม่มีผลกระทบต่อปริมาณฟองอากาศหรือเวลาการก่อตัวของคอนกรีต การใช้สารลดปริมาณน้ำให้เกิดประโยชน์ทำได้ดังนี้

รูปที่ 2.11 ประโยชน์การใช้สารลดปริมาณน้ำ

กรณีที่ 1 ใช้เพื่อช่วยให้งานเทคอนกรีตที่ทำได้ยาก เช่น โครงสร้างที่บางหรือมีเหล็กเสริมจำนวนมาก คอนกรีตนี้จะมีความสามารถเทได้ดี ง่ายต่อการจี้เขย่าเข้าแบบ โดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณน้ำและซีเมนต์

กรณี 2 คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ตามที่ต้องการ โดยใช้ปริมาณน้ำลดลงในขณะที่ปริมาณซีเมนต์คงที่ นั่น คืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะลดลง ซึ่งส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตสูงขึ้น การต้านทานการซึมผ่านของน้ำและความคงทนสูงขึ้นหรืออาจจะประยุกต์ใช้ในกรณีที่ต้องการเพิ่มกำลังอัดโดยไม่สามารถเพิ่มปริมาณซีเมนต์ เพราะจะเกิดปัญหาด้านอุณหภูมิที่สูงขึ้นหรือเกิดการหดตัวทำให้เกิดการแตกร้าว โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น ฐานรากแผ่ เป็นต้น

กรณีที่ 3 คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ตามที่ต้องการ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ นั่น คือ เราสามารถลดปริมาณซีเมนต์ลงได้

- วัตถุดิบ

สารลดปริมาณน้ำได้มาจากสารประกอบหลัก 3 ชนิด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.) เกลือและสารประกอบของ Lignosulphonate

2.) เกลือและสารประกอบของ Hydroxycarboxylic Acid

3.) Polymer เช่น Hydroxylated Polymers

สารลดปริมาณน้ำนี้ ทั่วๆไปจะทำมาจากสารประกอบ 2 ชนิดแรก

- ทำไมต้องลดปริมาณน้ำ

การลดปริมาณน้ำในส่วนผสม เป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับงานคอนกรีตจะพบว่าสารเคมีผสมคอนกรีต 5 ใน 7 ชนิด จะมีคุณสมบัติลดปริมาณน้ำ ก่อนที่จะอธิบายในรายละเอียด เราควรมาพิจารณาถึงหน้าที่ของน้ำในส่วนผสมคอนกรีตอีกทีเพื่อความเข้าใจมากยิ่งขึ้น

น้ำเป็นส่วนผสมที่สำคัญมากส่วนหนึ่งในการผลิตคอนกรีตโดยจะทำหน้าที่ 3 อย่าง คือ

1.) เข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์ หรือปฏิกิริยา Hydration

2.) ทำหน้าที่เคลือบหินและทรายให้เปียก เพื่อซีเมนต์จะเข้าเกาะและแข็งยึดติดกัน

3.) ทำหน้าที่หล่อลื่นให้หิน ทราย ซีเมนต์ อยู่ในสภาพเหลวสามารถไหลเข้าแบบได้ง่าย

น้ำจำนวนพอดีที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น คือ ประมาณ 28±1% ของน้ำหนักซีเมนต์ หรืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) = 0.28± 0.01 แต่คอนกรีตทั่วไปใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากกว่า 0.35 น้ำที่เกินนี้จะเข้าไปทำหน้าที่ในข้อ 2 และ 3 ทำให้คอนกรีตเหลว ทำงานได้สะดวกขึ้น น้ำส่วนนี้ถูกเรียกว่า " น้ำส่วนเกิน" (Excess Water)

น้ำส่วนเกิน ถ้ามีมากเกินไปจะส่งผลต่อคอนกรีต คือ

1.) เกิดการเยิ้มของน้ำขึ้นมาที่ผิวหน้ามาก (Bleeding)

2.) เกิดการแยกตัว

3.) กำลังอัดต่ำลง

4.) เกิดการหดตัว

5.) ทำให้เกิดรูพรุน มีผลทำให้คอนกรีตขาดความทนทาน

ในรูปที่ 2.12 แสดงลักษณะคอนกรีตที่ใช้น้ำมากเกินไปน้ำส่วนหนึ่งจะอยู่ในลักษณะเป็นแอ่งใต้หินและบางส่วนจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าคอนกรีต ซึ่งคือการเยิ้ม (Bleeding) เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแอ่งน้ำดังกล่าว จะกลายเป็นโพรงอากาศ ทำให้ทนทานและกำลังอัดคอนกรีตต่ำลง

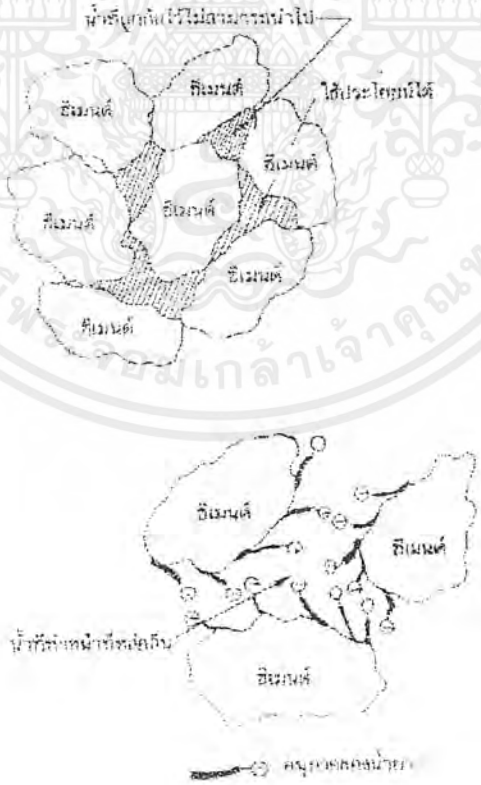
- ลักษณะการทำงาน

สารผสมเพิ่มชนิดนี้ช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีต ทั้งนี้เพราะมีคุณสมบัติในการช่วยเปลี่ยนคุณสมบัติของผิวต่อระหว่างของแข็งและน้ำในคอนกรีต ปกติอนุภาคซีเมนต์ต่างๆในคอนกรีตจะมีประจุไฟฟ้าเหลือตกค้างบนผิว ซึ่งอาจเป็นขั้วบวกหรือลบก็ได้ อนุภาคซึ่งมีประจุต่างกันจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดรวมกันเป็นกลุ่ม (Flocculate) ซึ่งสามารถดูดน้ำได้เป็นจำนวนมากทำให้เหลือน้ำหล่อลื่นคอนกรีตเหลวอยู่น้อย โมเลกุลของสารผสมเพิ่มชนิดนี้ช่วยทำให้ประจุเป็นกลาง หรือทำให้ประจุบนผิวอนุภาคต่างๆกลายเป็นประจุชนิดเดียวกันจึงเกิดแรงผลักดันซึ่งกันและกันทำให้แยกตัวกันในเนื้อเพสต์ น้ำที่ผสมไปในคอนกรีตส่วนใหญ่จึงสามารถถูกใช้ลดความหนืดของเพสต์ ดังแสดงในรูป 2.13

รูปที่ 2.12 คอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำมากเกินไป



รูปที่ 2.13 ลักษณะการทำงานของสารลดปริมาณน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงาน**

  ปัจจัยที่สำคัญได้แก่

  1.) ชนิดและปริมาณการใช้สารลดปริมาณน้ำ

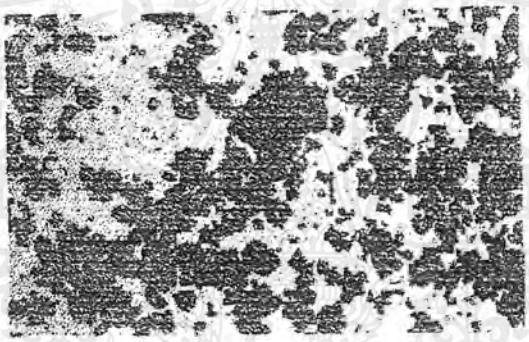
  2.) ชนิดของซีเมนต์และสารประกอบ

  3.) ชนิดของมวลรวมและส่วนคละ

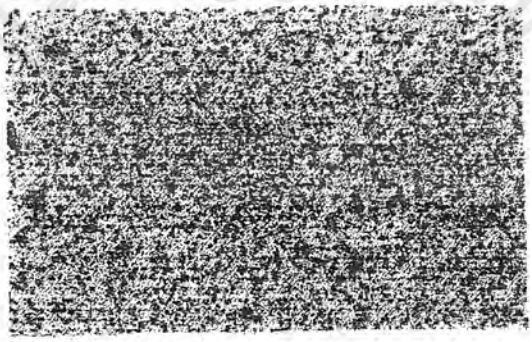
  4.) สัดส่วนผสม

  5.) อุณหภูมิ

ถ้าใช้สารลดลงปริมาณน้ำในปริมาณปกติ ปริมาณน้ำที่ลดลงจะอยู่ในช่วง 5-10% อย่างไรก็ตามควรทดสอบในห้องปฏิบัติการก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง เพื่อหาชนิดและปริมาณของสารผสมเพื่อที่จะให้บรรลุคุณสมบัติที่เหมาะสม



(a)



(b)

รูปที่ 2.14 a) อนุภาคของซีเมนต์จะจับอยู่เป็นกลุ่มก่อนการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำ

b) การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาคซีเมนต์หลังการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลต่อคอนกรีตสด

1.) สารลดปริมาณน้ำนี้จะเพิ่มความสามารถเทได้ ถ้าไม่มีการปรับส่วนผสมอื่นๆ โดยปกติจะทำให้คอนกรีตมีค่ายุบตัวเพิ่มขึ้น 25-50 มิลลิเมตร

2.) สารลดปริมาณน้ำที่มีสารประกอบของ Hydroxy carboxylic Acid จะสามารถลดปริมาณน้ำได้มากกว่าสารประกอบของ Lignosulphonate

3.) ค่าอัตราการสูญเสียการยุบตัว (Slump Loss) ในช่วงแรกของคอนกรีตที่ใส่สารลดปริมาณน้ำจะมากกว่าคอนกรีตทั่วไป

4.) สารลดปริมาณน้ำที่มาจากเกลือของ Hydroxycarboxylic Acid มีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดการเยิ้ม (Bleeding) ดังนั้นควรใช้ด้วยความระมัดระวังโดยเฉพาะกับคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวมาก

5.) สารลดปริมาณน้ำที่มาจาก Lignosulphonate จะลดการเยิ้มเนื่องจากสารประกอบพวกนี้จะก่อให้เกิดฟองอากาศขึ้นเล็กน้อย คือ อยู่ในช่วง 1-3%

6.) โดยทั่วไปสารลดปริมาณน้ำจะมีผลต่อเวลาการก่อตัวคือจะหน่วงเวลาการก่อตัวเล็กน้อย

7.) ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมคอนกรีต สารลดปริมาณน้ำจะไม่มีผลต่อความร้อนจากปฏิกิริยาของคอนกรีต (Heat of Hydration)

- ผลต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

1.) ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน คอนกรีตที่ใส่สารลดปริมาณน้ำจะให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปเล็กน้อยทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของเม็ดปูนซีเมนต์ในส่วนผสม

2.) เนื่องจากสารลดปริมาณน้ำส่งผลให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง นั่น คือ กำลังอัดที่อายุ 28 วันจะสูงขึ้น ผลทางอ้อมก็คือ กำลังอัดช่วงต้นก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

3.) การหดตัว (Drying Shrinkage) และ Creep จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความสามารถเทได้และกำลังอัดที่ 28 วัน เท่ากัน

4.) ผลของการลดปริมาณน้ำในส่วนผสม ทำให้ความทนทานและการกันซึมสูงขึ้นเพราะคอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น

2.) สารยืดเวลาการก่อตัว

สารยืดเวลาการก่อตัว เป็นสารเคมีที่หน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งส่งผลหน่วงการก่อตัวของคอนกรีตด้วย สารผสมเพิ่มชนิดนี้โดยทั่วไปจะใช้ในงานคอนกรีตในเขตร้อนเช่น ในประเทศไทยเป็นต้น เพราะที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดเร็วมาก เวลาการก่อตัวของซีเมนต์จะลดลง นอกจากนี้ยังเหมาะกับงานคอนกรีตประเภทอื่นๆอีก เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.) งานโครงสร้างขนาดใหญ่ โดยยืดเวลาการก่อตัวเพื่อป้องกันการเกิด Cold Joint

2.) งานเขื่อน โดยลดความร้อนในคอนกรีตเพื่อป้องกันการแตกร้าว

3.) งานเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ ซึ่งบางครั้งต้องยืดเวลาการแข็งตัวของคอนกรีตออกไป 6-8 ชั่วโมง

- วัตถุดิบ

สารผสมเพิ่มชนิดยืดเวลาการก่อตัวแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ตามส่วนประกอบทางเคมีดังนี้

1.) กรด Lignosulphonic และเกลือของมัน

2.) กรด Hydroxycarboxylic และเกลือของมัน

3.) น้ำตาลและสารประกอบของน้ำตาล

4.) เกลืออนินทรีย์

สารเคมีหลายๆตัวเหมือนกับสารลดปริมาณน้ำแต่ใช้ปริมาณที่มากกว่า

- ลักษณะการทำงาน

มีหลายทฤษฎีที่พยายามอธิบายการทำงานของสารผสมเพิ่มชนิดนี้ แต่ทฤษฎีที่สำคัญที่สามารถอธิบายเรื่องนี้ได้ดี คือ สารผสมเพิ่มชนิดยืดเวลาการก่อตัวนี้จะถูกดูดซึมไว้บนผิวของอนุภาคซีเมนต์ ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับอนุภาคซีเมนต์ลดลง นั่นคือ การหน่วงเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

- ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงาน

ปัจจัยที่สำคัญได้แก่

1.) ชนิดและปริมาณการใช้สารยืดเวลาการก่อตัว

2.) ชนิดของซีเมนต์และสารประกอบ

3.) เวลาที่เติมสารยืดเวลาการก่อตัว

4.) อุณหภูมิ

สารยืดเวลาการก่อตัวจะขยายเวลาการแข็งตัวของคอนกรีตทั้งเวลาการต่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) ส่วนผลด้านการยืดเวลาพบว่าคอนกรีตที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์สูง

ความสามารถในการยืดเวลาการก่อตัวของสารผสมเพิ่มนี้จะดีขึ้นหากเติมน้ำยาประเภทนี้ 2-3 นาที หลังจากนั้นใส่น้ำผสม และจะให้เต็มที่เมื่อเติมเมื่อเติม 10 นาที หลังผสม ถ้าเติมหลัง 2-4 ชม. สารผสมเพิ่มนี้จะไม่ก่อให้เกิดผลด้านการยืดเวลาการก่อตัว ปริมาณการใช้สารผสมเพิ่มชนิดนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลต่อคอนกรีตสด

  1.) ผลโดยตรงคือ หน่วงเวลาการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทนาน รวมทั้งมีค่าการสูญเสียค่ายุบตัวน้อยลง

  2.) หน่วงการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น แต่ปริมาณความร้อนทั้งหมดยังคงเดิม

  3.) การยืดเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มจะเพิ่มการหดตัว (Plastic Shrinkage) เพราะว่าคอนกรีตจะเหลวอยู่นานกว่าปกติ ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมสารยืดเวลาการก่อตัวจึงจำเป็นที่จะต้องบ่มอยู่อย่างถูกต้องและเพียงพอเพื่อป้องกันการแตกร้าว (Plastic Cracking) ซึ่งจะเกิดขึ้นถ้าปล่อยให้คอนกรีตแห้งก่อนที่คอนกรีตจะมีกำลังอัดเพียงพอ

- ผลต่อคอนกรีตที่แข็งตัว

  1.) กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นลดลง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการยืดเวลาการก่อตัว แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุ 2-3 วัน กำลังอัดจะใกล้เคียงกับคอนกรีตอัดทั่วๆไป

  2.) อัตราการเกิด Drying Shrinkage และ Creep เพิ่มขึ้น แต่ควรจะไม่เปลี่ยนแปลง

3.) สารเร่งเวลาการก่อตัว และแข็งตัว

สารเร่งเวลาการก่อตัวและแข็งตัว เป็นสารที่เร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่งผลเร่งการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้น โดยทั่วไปใช้สำหรับงานดังต่อไปนี้

1.) งานก่อสร้างเร่งด่วน เช่น งานที่ต้องการถอดไม้แบบเร็วงานซ่อมแซมต่างๆ

2.) งานหล่อชิ้นส่วนคอนกรีตในโรงงาน เพื่อให้การหมุนเวียนแบบหล่อทำได้อย่างรวดเร็ว

3.) งานคอนกรีตในฤดูหนาว สำหรับประเทศที่มีอากาศหนาวเย็นจัด

สารผสมเพิ่มชนิดนี้จะแตกต่างจากสารที่ทำให้เกิดการก่อตัวอย่างกระทันหัน(Set Accelerating Adimixture) ซึ่งจะก่อตัวภายใน 2-3 นาที และเหมะในงาน Shotcrete สำหรับอุดรูรั่วภายใต้ความดันของน้ำ หรือการซ่อมแซมอย่างกะทันหัน

- วัตถุดิบ

สารเร่งเวลาการก่อตัวส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารเคมีดังนี้

1.) Calcium Chloride

2.) Calcium Formate

คัลเซี่ยมคลอไร์เป็นสารเคมีที่ถูกนำออกมาใช้เร่งการก่อตัวของคอนกรีตอย่างกว้างขวางด้วยเหตุผลที่สำคัญ 2 ประการ คือราคาไม่แพง และหาได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันได้พบว่าคัลเซี่ยมครอไรด์จะก่อให้เกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมคอนกรีต ดังนั้นจึงหันมาสนใจสารเคมีอื่นที่ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกลือคลอไรด์ (Chloride-Free) อันได้แก่ Calcium Formate และล่าสุดได้เร่งการพัฒนาสารเร่งการก่อตัวที่มีสารเคมีหลัก คือCalcium Nitrate

- ลักษณะการทำงาน

สารเร่งเวลาการก่อตัวของคอนกรีตทำหน้าที่เหมือนดังตัวเร่งวปฏิกิริยาเคมี(Catalyst) ระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ผลก็คือ จะเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นก่อให้เกิดความร้อนขึ้นและกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นในเวลาอันรวดเร็ว

- ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงาน

ปัจจัยที่สำคัญได้แก่

1.) ชนิดและปริมาณการใช้สารเร่งการก่อตัว

2.) ชนิดซีเมนต์และสารประกอบ

3.) อุณหภูมิ

คัลเซี่ยมคลอไรด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่ดีกว่า Calcium Formate และCalcium Nitrate รวมทั้งราคาถูกอย่างมากด้วย และการเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารผสมนี้ในปฏิกิริยาที่มากขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของซีเมนต์ สัดส่วนผสม ซึ่งส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำมากกว่าน้ำส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง

ผลต่อคอนกรีตสด

เวลาการก่อตัวและแข็งตัวจะลดลง แต่ทั้งนี้ได้มีข้อกำหนดควบคุมไว้ ไม่ให้การก่อตัวเกิดเร็วมากจนไม่สามารถนำคอนกรีตนั้นๆไปใช้งานได้

ผลต่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว

1.) กำลังอัดตัวในช่วงต้นจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่กำลังอัดในระยะยาว(Long Term Strength) ที่อายุมากกว่า 28 วันจะต่ำกว่าคอนกรีตทั่วๆไป

2.) Calcium Chloride จะเพิ่มทั้ง Drying Shrinkage และ Creep

3.) Calciumcloride ที่ใส่ไปเร่งการก่อตัว จะมีผลทำให้ความสามารถ ทนทานต่อซัลเฟสของคอนกรีตลดลง รวมทั้งยังกระตุ้นให้เกิด Alkali Aggregerte Reaction สำหรับในกรณีที่มวลรวมมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์

4.) คอนกรีตจะมีความสามารถทนต่อ Erosion และ Abrasion ทุกช่วงอายุมากกว่าคอนกรีตทั่วๆไป

5.) แคลเซี่ยมคลอไรด์จะเร่งการสึกกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต จึงจำเป็นที่จะต้องใช้ความระมัดระวัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.) สารเคมีผสมคอนกรีตอื่นๆ

4.1) สารลดปริมาณน้ำและยืดเวลาการก่อตัว

เป็นสารผสมที่ใช้มากที่สุดสำหรับงานคอนกรีตในประเทศไทยโดยเฉพาะงานคอนกรีตผสมเสร็จ

4.2) สารลดปริมาณน้ำจำนวนมาก

สารผสมนี้สามารถลดปริมาณน้ำได้ในส่วนผสม 15-30% ทั้งนี้เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดการผลักดันมีแรงผลักดันมากกว่าสารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำทั่วๆไป ในปัจจุบันสารผสมเพิ่มประเภทนี้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในโรงงานผลิตชิ้นส่วนสำเร็จรูปเพราะการลดน้ำในปริมาณมากๆทำให้อัตราน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดในช่วงต้นที่สูงมาก ทำให้สามารถถอดแบบและตัดลวด Pre-Stressed ได้ในเวลารวดเร็ว รวมทั้งยังสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมได้ ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย

4.3) สารลดปริมาณน้ำจำนวนมากและยืดเวลาการก่อตัว

เป็นสารผสมเพิ่มที่พัฒนาล่าสุดเหมาะสำหรับงานคอนกรีตผสมเสร็จที่ต้องการคอนกรีตที่เหลวมากๆ เช่นในงานรากฐานแผ่ขนาดใหญ่ หรือเสา คาน และชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมจำนวนมาก คอนกรีตที่ใส่สารผสมเพิ่ม จะมีค่ายืดตัวมากกว่า 15 CM ทำให้สามารถลื่นไหล เข้าไปทุกซอกทุกมุมของเหล็กเสริมและไม้แบบโดยไม่ต้องทำการจี้เขย่าคอนกรีตมากนัก คอนกรีตประเภทนี้มีชื่อเรียกทั่วๆไปว่า Flow Concrete

คุณลักษณะของสารเคมีผสมคอนกรีตควรเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.12 สรุปคุณลักษณะของสารเคมีผสมคอนกรีตประเภทต่างๆ ตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด						
	สารลดน้ำ	สารหน่วงการก่อตัว	สารเร่งการก่อตัว	สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว	สารลดน้ำและเร่งการก่อตัว	สารลดน้ำพิเศษ	สารลดน้ำพิเศษและหน่วงการก่อตัว
น้ำ ร้อยละของปริมาณน้ำที่ผสมคอนกรีตควบคุม ไม่เกิน	95			95	95	88	88
ระยะเวลสการก่อตัว เทียบกับคอนกรีตควบคุม ชั่งโมง : นาที							
การก่อตัวระยะต้น							
อย่างน้อย		ช้าลง 1:00	เร็วขึ้น 1:00	ช้าลง 1:00	เร็วขึ้น 1: 00	-	ช้าลง 1:00
แต่ไม่เกิน	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 3:30	เร็วขึ้น 3:30	ช้าลง 3:30	เร็วขึ้น 3:30	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1: 30	ช้าลง 3:30
การก่อตัวระยะปลาย							
อย่างน้อย	-	-	เร็วขึ้น 1:00	-	เร็วขึ้น 1:00	-	-
แต่ไม่เกิน	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 3:30	-	ช้าลง 3:30	-	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 3:30
ความต้านทานแรงอัด ร้อยละของคอนกรีตควบคุม ไม่น้อยกว่า							
เมื่ออายุ 1 วัน	-	-	-	-	-	140	125
3 วัน	110	90	125	110	125	125	125
7 วัน	110	90	100	110	110	115	115
28 วัน	110	90	100	110	110	110	110
ความต้านทานแรงดัด คอนกรีตควบคุม ไม่น้อยกว่า							
เมื่ออายุ 3 วัน	100	90	110	100	110	110	110
7 วัน	100	90	100	100	100	100	100
28 วัน	100	90	90	100	100	100	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.7. สารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral Admixture)

สารผสมเพิ่มชนิดนี้มักจะเป็นผงละเอียด ซึ่งใส่รวมในคอนครีตเพื่อปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตเหลวและเพิ่มความทนทานของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

1.) วัสดุที่มีความไวต่อปฏิกิริยาต่ำ หรือวัสดุเฉื่อย

2.) วัสดุชนิด Pozzolana

3.) วัสดุที่มีความสามารถเป็นตัวเชื่อมประสาน

1.) วัสดุที่มีความไวต่อปฏิกิริยาต่ำหรือวัสดุเฉื่อย

สารผสเพิ่มชนิดนี้ใช้เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตเหลว โดยเฉพาะในคอนกรีตที่ขาดอนุภาคขนาดเล็ก เช่น คอนกรีตที่ทำจากทรายหยาบ หรือที่มีปริมาณซีเมนต์น้อยอยู่ คอนกรีตแบบนี้อาจแยกตัวได้ง่ายไม่เหมาะสำหรับการลำเลียงและเทลงแบบ การปรับปรุงการเกาะตัวและความเหลวของคอนกรีตนี้ด้วยการเพิ่มปริมาณซีเมนต์ อาจทำไม่ได้ เพราะเหตุผลทางด้านราคาหรือทางเทคนิค เช่น ทำให้มีความร้อนจากไฮเดรชั่นมากในคอนกรีตเหลว วิธีการที่ทำได้คือการใส่แร่ธาตุ เช่น ผงหินปูน หินเขี้ยวหนุมาน เศษหิน ลงผสมคอนกรีต ซึ่งแร่ธาตุเหล่านี้มีความไวต่อปฏิกิริยาต่ำ ไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมโยง เหมาะสำหรับการปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังสูงเท่านั้น

2.) วัสดุชนิด Pozzolana

Pozzolana คือ วัสดุประเภทซิลิก้า ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเกิดตัวเชื่อมประสานหรือ Calcium Silicate Hydrate เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานต่อสารเคมีสูงขึ้น เราอาจใช้ Pozzolana ในรูปของสารผสมเพิ่มซึ่งใส่ในสถานที่ก่อสร้าง หรือในรูปของซีเมนต์ผสม

นอกเหนือจากการเพิ่มความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตที่ขาดซีเมนต์แล้ว มันยังช่วยลดปริมาณและอัตราความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เราสามารถใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งผสมสารผสมเพิ่มชนิดนี้แทนซีเมนต์ประเภทที่สี่ สำหรับโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ ปริมาณการใช้ย่อมขึ้นอยู่กับชนิดของงานและอาจสูงถึง 15-35 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติซึ่งประกอบด้วยซิลิก้าที่ทำปฏิกิริยาดังกล่าว ได้แก่ ขี้เถ้าภูเขาไฟและหิน Tuff , Pumicite , Opalline , Chert ดินเหนียว และหิน Shale โดยปกติต้องนำมาบดละเอียดและเผา , Fly Ash เป็นขี้เถ้าอนินทรีย์ที่เหลือจากการเผาถ่านหิน วัสดุนี้เป็นที่นิยมมากเพราะมีลักษณะเป็นผงละเอียดอยู่แล้ว

การใช้สาร Pozzolana มักจะมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำในระยะแรก แต่กำลังจะสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นและจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุมากกว่า 28 วัน

2.2.8. สารผสมเพิ่มอื่นๆ

สารผสมเพิ่มประเภทนี้ ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในงานจำเพาะเจาะจงบางอย่าง เช่น

1.) สารป้องกันซึม

ใช้ป้องกันการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่มีรูพรุนมาก ส่วนใหญ่ทำมาจากวัสดุประเภทสบู่หรือน้ำมัน

2.) สารกันความชื้น

เป็นพวกกรดไขมันหรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม อาจจะทำให้น้ำไม่จับที่ผิวคอนกรีต แต่จะไม่สามารถทนน้ำที่มีแรงดันน้ำมากได้

3.) สารช่วยให้ปั๊มง่าย

ชาวยให้คอนกรีตยึดเกาะตัวกัน เคลื่อนผ่านท่อปั๊มไปได้ถึงแม้ว่าคอนกรีตนั้นจะมีปริมาณซีเมนต์ต่ำ

4.) สารอุดประสานหรือสารกรอกฉีด

ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อการอัดฉีดเข้าไปในซอกหรือบริเวณแคบๆ โดยป้องกันการแยกตัว การเยิ้ม รวมทั้งเพิ่มการยึดเกาะเพื่อให้ปั๊มได้สะดวกเหมาะที่จะนำไปใช้กับงาน Stabilize ฐานราก อุดรอยร้าวหรือรอยต่อในงานคอนกรีต อุดช่องว่างในงานคอนกรีตอัดแรงระบบ Bonding เป็นต้น

5.) สารเพิ่มการขยายตัว

มีสารเคมีหลักคือ Calcium Sulpho – Aluminate จะทำให้ซีเมนต์ธรรมดาเป็นซีเมนต์แบบขยายตัว เพื่อใช้ทดแทนการหดตัวของคอนกรีตในการก่อสร้างทั่วๆไป

6.) สารลดการกัดกร่อนเหล็กสนิม

เป็นเกลือของสารเคมีที่มีประจุที่เกิดออกไซด์ได้

7.) สารเชื่อมประสาน

ส่วนใหญ่ทำมาจาก Polymer Latex ใช้เพิ่มเสริมการยึดเกาะตัวระหว่างคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่หรือระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
สารลดน้ำพิเศษ

สารลดน้ำพิเศษ หรือ Superplasticizer ได้มีการค้นพบครั้งแรกในปี 1983 โดย W. R Grace และได้มีการพัฒนาเรื่อย ๆ จนกระทั่งปี 1964 ได้มีการนำมาใช้ในเชิงธุรกิจ โดยเริ่มแรกในประเทศเยอรมันและญี่ปุ่น ในปี 1972 เริ่มใช้ในในประเทศอังกฤษ และในปี 1976 เริ่มใช้ในอเมริกา สารลดน้ำพิเศษมีพฤติกรรมคล้ายกับสารลดน้ำธรรมดา คือ ช่วยลดแรงระหว่างอนุภาคเม็ดซีเมนต์ในเพสต์สด ต่างจากสารลดน้ำทั่วๆไป คือ จะไม่มีผลต่อแรงดึงผิว (Surface Tension) ของน้ำ ดังนั้นจึงทำให้ใช้สารเคมีลดน้ำพิเศษได้ในปริมาณสูง โดยไม่ทำให้เกิดฟองอากาศมาก (ACI Committee, 1989)

3.1. ประเภทของสารลดน้ำพิเศษ

สารลดน้ำพิเศษโดยทั่วไปที่นิยมใช้มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. Sulphonate Napthalene Formaldehyde Condensat es

ผลิตจากกรรมวิธีทางเคมีโดยใช้ Napthalene (C10H6) ผ่านขบวนการซัลโฟเนชั่น (Sulphonation) ด้วยกรดซัลฟูลิก (H2SO4) จะได้สารแนพทาลีนกับกรดซัลฟูลิก (SO3H) และนำสารที่ได้ทำปฏิกิริยากับฟอร์มาดีไฮด์ (Formadehyde, CH2O) ได้สารประกอบชนิดใหม่ แล้วนำไปทำการแปรสภาพโดยใช้วิธีการโพลิเมอร์ไรเซชั่น (Polymerization) แต่เนื่องจากสารประกอบชนิดนี้มีสภาพเป็นกรด ดังนั้นกลุ่มกรดซัลฟูลิกจึงถูกทำลายให้เป็นกลาง (Nautralization) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ได้สารประกอบทางเคมีของเกลือ Sulphonate Napthalene Formaldehyde Condensates

2. Sulphonate Melamine Formaldehyde Condensates

เป็นสารเคมีที่ได้จากกรรมวิธีทางเคมีโดยใช้เมลาไมน์ (Melamine , C3H6N6) ปฏิกิริยาทำปฏิกิริยากับฟอร์มาดีไฮด์ ได้สารประกอบไตรเมทิรอลเมลาไมน์ (Trimethyrolmelamine) แล้วนำไปทำปฏิกิริยาต่อกับโซเดียมไบซัลเฟต (Sodium Bisulphite , NaHSO3) ได้สารชนิดใหม่แล้วจึงนำไปแปรสภาพโดยวิธีโพลิเมอร์ไรเซชั่น (Polymerlization) ได้เป็นสารประกอบของเกลือ Sulphonated Melamine Formaldehyde Condensates พฤติกรรมของสารลดน้ำพิเศษ เกิดจากการกระตุ้นที่ผิวทำให้ประจุไฟฟ้าไม่สมดุลย์ (Unbanlance Charge) สารลดน้ำพิเศษที่เติมลงไปก็จะหนีขึ้นมาอยู่บนผิวน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยประจุลบจะถูกดูดำอยู่ที่ผิวของเม็ดซีเมนต์ ทำให้เกิดประจุลบอยู่รอบ ๆ เม็ดซีเมนต์ ยังผลให้เม็ดซีเมนต์ไม่รวมตัวกันเนื่องจากมีประจุเหมือนกัน และเพิ่มพื้นที่ผิวของซีเมนต์ ทำให้ปฏิกิริยามีมากขึ้น และเกิดแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดซีเมนต์กับมวลรวมมากขึ้น เป็นผลให้คอนกรีตมีกำลังมากขึ้น

3.2. กลไกการทำงานของสารลดปริมาณน้ำพิเศษ

เมื่อผสมน้ำลงไปในปูนซีเมนต์ จะทำให้อนุภาคของปูนซีเมนต์พยายามมาเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่ม (Flocculation) เนื่องจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์แบบ Van der Waals Force
2. แรงดึงดูดเข้าหากันของอนุภาคปูนซีเมนต์ที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน (Electrostatic Force)

การเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่ม (Flocculation) ของอนุภาคปูนซีเมนต์ จะทำให้เกิดช่องว่างขึ้นมา ช่องว่างเหล่านี้จะสมารถดูดอนุภาคของน้ำมากักเก็บไว้ จึงทำให้เหลือน้ำที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับปูนซีเมนต์ลดน้อยลง พร้อมกันนี้ น้ำที่จะช่วยหล่อลื่นคอนกรีตเหลวก็ลดลงไปด้วย ทำให้ได้คอนกรีตที่มีความสามารถในการเทไม่ดี สารลดน้ำพิเศษจึงเข้ามามีบทบาทช่วยปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตให้ดีขึ้น เป็นที่เชื่อกันว่ากลไกการทำงานของสารลดน้ำพิเศษเกิดจาก

1. โมเลกุลของสารลดน้ำพิเศษจะถูกอนุภาคของปูนซีเมนต์ดูด (Absorption) เอาไว้ พร้อมกันนี้โมเลกุลของสารลดน้ำพิเศษจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันบนผิวอนุภาคปูนซีเมนต์ จึงทำให้เกิดแรงผลัก (Repulsive Force) ระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ ให้แยกกระจายตัว (Dispersion) ออกจากกันในเนื้อซีเมนต์เพสต์ น้ำที่ผสมลงไปในคอนกรีต จึงสามารถทำหน้าที่หล่อลื่นลดความหนืดของซีเมนต์เพสต์ได้ ผลก็คือทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทดี โดยไม่ต้องใช้น้ำเป็นจำนวนมากแล้วยังทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงด้วย นอกจากนี้โมเลกุล ของสารลดน้ำพิเศษที่ถูกอนุภาคของปูนซีเมนต์ดูดเอาไว้ ยังจำทำหน้าที่คล้ายกับเยื่อหุ้มอนุภาคซีเมนต์ไว้ จึงช่วยหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างซีเมนต์กับน้ำให้เกิดช้าลงส่งผลให้ช่วงเวลาการเกิด Slump Loss ของคอนกรีตยาวนานออกไป

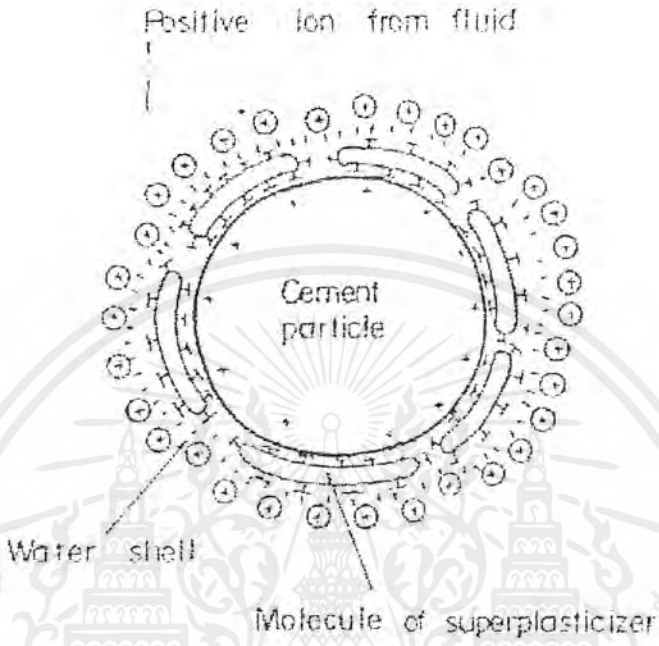
2. โดยปกติแล้ว Ettringite ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมีรูปร่างแบบ Needle Shape แต่คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษจะทำให้เกิดผลึก Ettringite ที่มีขนาดเล็กลงกว่าเดิม และมีรูปร่างเกือบจะเป็น Cubic ซึ่งมีส่วนช่วยลดความหนืดของซีเมนต์เพสต์ทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทดีขึ้น

3.3. ประโยชน์ของสารลดน้ำพิเศษ

สารลดน้ำพิเศษใช้ในการผลิตคอนกรีตไหล (Flowing Concrete) ที่มีค่าการยุบตัวสูงถึง 200 มม.หรือมากกว่านี้ ใช้ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete) ซึ่งทำให้ลดปริมาณน้ำได้ถึง 30 % ในขณะที่ยังรักษาความสามารถทำงานได้เหมือนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้เพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์ ได้อย่างน้อยที่สุด 10-20 % ในขณะที่ยังรักษาความสามารถทำงานได้และกำลังของคอนกรีตยังคงเท่าเดิม



รูปที่ 3.1 แสดงประจุไฟฟ้าที่ล้อมรอบเม็ดซีเมนต์เมื่อผสมสารลดน้ำพิเศษ (Heinz, 1983)

3.4. คุณสมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ

3.4.1. ความต้องการน้ำและความสามารถทำงานได้

สารลดน้ำพิเศษจะช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้สูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงเดิม นอกจากนี้สารลดน้ำพิเศษยังสามารถทำให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้สูง โดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียการเกาะตัว (Cohesion) มากเกินไป และยังพบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงเดิม (Rixom, 1976) สารลดน้ำพิเศษจะช่วยให้คอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลงเมื่อความสามารถทำงานได้คงเดิม และเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษขึ้น เมื่อความสามารถทำงานได้คงเดิม การใส่สารลดน้ำพิเศษในปริมาณมากเกินไปจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เพราะปริมาณน้ำส่วนเกินมากขึ้นและเกิดการสูญเสียการยึดเกาะของมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1- 3 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2. การคายน้ำ

โดยทั่วไปเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษเพื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์แล้ว การคายน้ำจะลดลง ยกเว้นคอนกรีตที่มีความสามารถทำงานได้สูงมาก การลดการคายน้ำทำได้โดยปรับส่วนผสม โดยให้อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบสูงขึ้นหรือใส่วัสดุละเอียด (ACI Committee, 1989) ในคอนกรีตที่พร่องส่วนละเอียด (มวลละเอียดหรือซีเมนต์) สารลดน้ำพิเศษสามารถลดการคายน้ำ (Bleeding) และการแยกแยะ (Segregation) ได้ และการใส่สารลดน้ำพิเศษ 1.25 % ทำให้อัตราการคายน้ำและความสามารถการคายน้ำของมอร์ตาร์ลดลง และการคายน้ำของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ 2 % วัดค่าการคายน้ำได้เท่ากับ 0

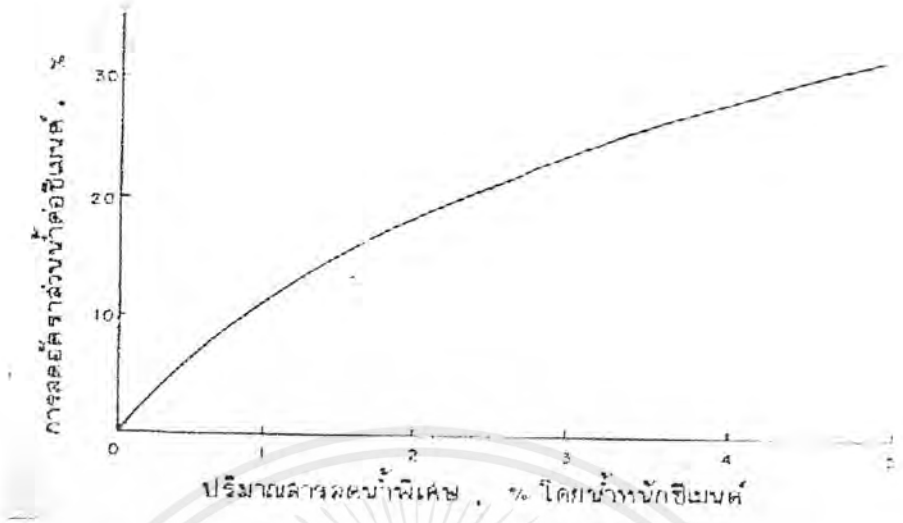
3.4.3. ระยะเวลาการก่อตัว

การใส่สารลดน้ำพิเศษลงไปจะไม่ทำให้เวลาการก่อตัวเปลี่ยนไป (Rixom , 1978 และ Raymond, 1983) พบว่าการใส่สารลดน้ำพิเศษ 1.25 % จะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการก่อตัวอยู่ในช่วงที่กำหนดให้ตามมาตราฐาน ASTM 494-86 Standard Specification for Chemical Admixture for Concrete และสารลดน้ำพิเศษจะไม่ค่อยมีผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวที่เปลี่ยนไป เอกสิทธิ์ (2533) ให้เหตุผลว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นยังคงเหมือนเดิม เมื่อผสมสารลดน้ำพิเศษจึงไม่ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเปลี่ยนไป

3.4.4. กำลังรับแรงอัด

การใส่สารลดน้ำพิเศษโดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่าเดิม จะทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น แต่ถ้าใส่สารลดน้ำพิเศษแล้วลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ด้วยจะทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงขึ้นอีก (ACI Committee, 1980) ปริมาณสารลดน้ำพิเศษสำหรับการลดน้ำมากที่สุด ไม่จำเป็นเสมอไปว่าจะให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14 (Stuart และคณะ, 1980) และทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3 , 7 , 28 , 90 สูงกว่ากำลังในแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่ได้ใส่สารลดน้ำพิเศษถึง 58 % , 29 % , 24 % , 25 % ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารลดน้ำพิเศษกับ
การลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Rixom, 1978)

3.4.5. กำลังรับแรงดึง

กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำพิเศษ โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่าเดิม จะประมาณเท่าเดิม ส่วนกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำพิเศษสำหรับลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะสูงขึ้น แต่ไม่เป็นสัดส่วนต่อกับการเพิ่มกำลังรับแรงอัด (ACI Committee,1989) และเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษ 1.25 % จะทำให้กำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์สูงขึ้นประมาณ 8 % โดยเฉลี่ยส่วนผสมคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำพิเศษโดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่

3.4.6. ความทนทาน

ความต้านทานการแข็ง การละลาย และการกัดเซาะของน้ำและดินจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อปริมาณน้ำลดลง แต่การลดน้ำจะทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น และกำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นมากด้วย ความต้านทานการแข็งและละลายของคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำพิเศษจะเหมือนกับคอนกรีตทั่วไปที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากกว่า 0.4 จะทำให้น้ำซึมผ่านได้น้อยมาก และสามารถต้านทานการละลายได้ดีขึ้น (ACI Committee, 1989) และเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษ 1.25 % การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์จะมากขึ้น และกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลงมากขึ้น

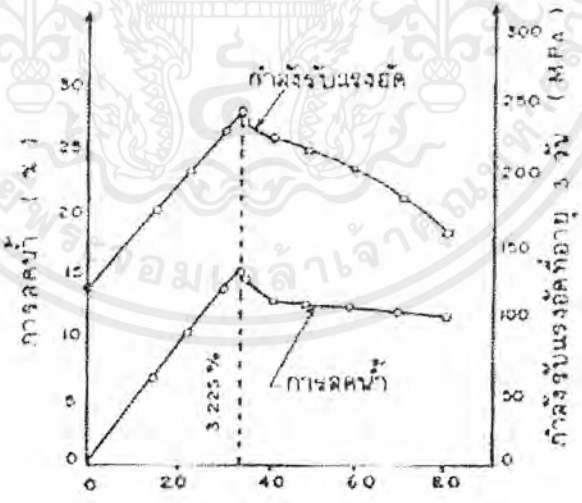
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.7. การขยายตัว

การบ่มคอนกรีตในน้ำจะเป็นผลทำให้เกิดการขยายตัว (Swelling) เนื่องจากการดูดน้ำของซีเมนต์เจล (Cement Gel) สำหรับคอนกรีตที่ทึบน้ำ น้ำจะเข้าสู่เพสต์ได้น้อยลง เป็นผลให้เกิดการขยายตัวลดลง การขยายตัวของคอนกรีตน้ำหนักปกติ (Normal Weight Concrete) จะมีค่าเพียง 10-20 % ของการหดตัว (Neville, 1987) และเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษ 1.25 % การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์จะลดลง

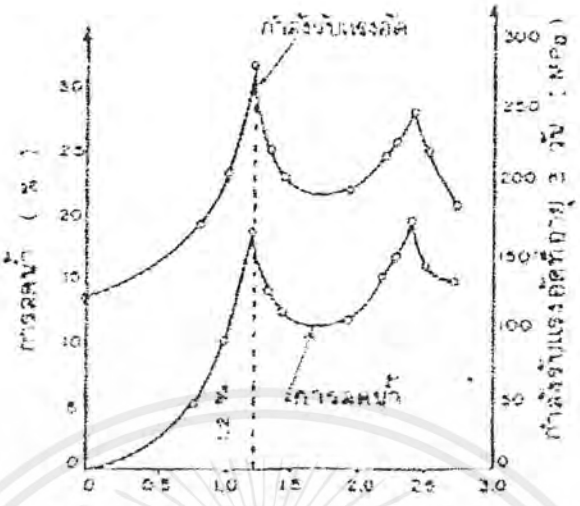
3.4.8. การหดตัว

การหดตัวเมื่อตากแห้งของคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำพิเศษ โดยให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงเดิม การหดตัวจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ถ้าใส่สารลดน้ำพิเศษแล้วลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลง โดยให้ปริมาณซีเมนต์คงเดิม จะพบว่าการหดตัวเมื่อตากแห้งของคอนกรีตจะลดลง (ACI Committee, 1989) และเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษ 1.25 % การหดตัวเมื่อตากแห้งและการสูญเสียน้ำหนักจะต่ำกว่าเมื่อไม่ใส่สารลดน้ำพิเศษ



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดน้ำ และกำลังรับแรงอัด กับปริมาณ SULPHONATED MELAMINE FORMALDEHYDE CONCENSATE (STUART และคณะ , 1980)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดน้ำ และกำลังรับแรงอัด กับปริมาณ SULPHONATED NAPTHALENE FORMALDEHYDE CONCENSATE (STUART และคณะ , 1980)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การเตรียมวัสดุวิจัยและการหาปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

4.1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

4.4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งผลิตขึ้นโดยมีคุณสมบัติตามกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15-2514/2517 ประเภทที่ และมาตรฐานอเมริกัน ASTM C 150- 71 type 1 ซึ่งในการวิจัยนี้ ใช้ปูนตราช้างของเครือซีเมนต์ไทย

4.1.2 สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticize) ซึ่งมีขายตามท้องตลาดในประเทศไทย และสารลดน้ำพิเศษนี้ได้มาจาก บริษัท WR. GRACE และบริษัท THAIMASTER BUILDERS

4.1.3 ทราย ทรายที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป มีลักษณะเป็นทรายหยาบ เม็ดอนุภาคมีเหลี่ยม มีขนาดต่างๆกันตั้งแต่หลายมิลลิเมตรจนถึงฝุ่นทรายก่อนนำไปใช้จะผึ่งในร่มให้แห้งสนิทก่อน

4.1.4 หิน หินที่ใช้เป็นหินปูนขนาดเบอร์ 1 (เบอร์เล็ก) ที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไป

4.2. การหาปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการหาปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตโดยรวมก่อน ส่วนการหาปฏิภาคส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบจริงนั้นจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

การคำนวณหาปฏิภาคส่วนผสมสำหรับงานคอนกรีตทั่วไปซึ่งหล่อกับที่ อาจจะดำเนินเป็นขั้นๆตามวิธีการซึ่งเสนอโดย สถาบันคอนกรีตของอเมริกา (ACI 211.1-70) ดังต่อไปนี้ซึ่งให้ผลค่อนข้างแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงและถูกต้อง ทั้งนี้จะต้องทราบถึงคุณสมบัติต่างๆของวัสดุที่ใช้ทำคอนกรีตก่อน เช่น ค่าความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนัก โมดูลัสความละเอียดและเปอร์เซนต์การดูดซึม เป็นต้น อีกทั้งวัสดุผสมต้องมีส่วนขนาดคละอยู่ในพิกัดกำหนดด้วย

4.2.1. ค่ายุบตัวที่เหมาะสมกับประเภทของงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ายุบตัวของคอนกรีตสดที่เหมาะสมกับโครงสร้างที่ยุ่งยากและซับซ้อนควรมีค่าประมาณ 15- 25 ซม.

4.2.2. เลือกขนาดโตสุดของวัสดุผสม

เลือกขนาดโตสุดของวัสดุผสม ไม่ควรเกินกว่า 1/5 ของส่วนที่แคบที่สุดของแบบหรือ 1/3 ของความหนาของแผ่นพื้น หรือ 2/4 ของขนาดความห่างของเหล็กเสริมที่น้อยสุด

4.2.3. ปริมาณน้ำที่ผสม

ในทางปฏิบัติน้ำที่ใช้จะต้องมีปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับซีเมนต์ ดังนั้นจึงต้องมีการใส่สารลดน้ำพิเศษ เข้าไปซึ่งจะทำให้น้ำที่ใส่นั้นมีค่าน้อยลงไปอีก 20- 30 %

4.2.4. อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะที่คอนกรีตนั้นถูกนำออกไปใช้งานและขึ้นกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ต้องการ ซึ่งได้กล่าวมาแล้วข้างต้น คอนกรีตที่มีกำลังสูงนั้นจะต้องมีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.22 – 0.32

4.2.5. คำนวณปริมาณซีเมนต์ที่จะต้องใช้

เมื่อทราบปริมาณน้ำที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีตและอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักแล้ว ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องใช้ในคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรย่อมหาได้ซึ่งเท่ากับปริมาณน้ำหารด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ อย่างไรก็ดี ถ้ากำหนดปริมาณซีเมนต์ในหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีตมาให้ก็เลือกใช้ค่าที่มากที่สุดจากที่คำนวณจากที่คำนวณได้หรือที่กำหนดให้

4.2.6 คำนวณวัสดุผสมละเอียด (ทราย)

เนื่องจากการที่จะต้องทำให้คอนกรีตเข้าเป็นเนื้อเดียวกันในขณะที่เป็นคอนกรีตสด ฉะนั้นจึงต้องกำหนดอัตราส่วนระหว่าง ปริมาตรวัสดุผสมละเอียดทั้งหมด กับปริมาตรวัสดุผสมละเอียดบวก ปริมาตรวัสดุผสมหยาบ ซึ่งเรียกค่านี้ว่า ค่า S/A ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4-0.5 ซึ่งในการทดลองนี้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ค่า S/A มีค่า 0.42 ซึ่งปริมาณของวัสดุผสมละเอียดคิดเป็นน้ำหนักมีค่าเท่ากับปริมาตรของวัสดุผสมละเอียดคูณด้วยหน่วยน้ำหนักของวัสดุผสมละเอียดนั้น

4.2.7. ปริมาณวัสดุผสมหยาบ (หิน)

เมื่อได้ค่าต่างๆของส่วนผสมจนถึง 4.2.6 แล้ว ปริมาณของวัสดุผสมหยาบจะหาได้ดังนี้

ปริมาตรเนื้อแท้ของวัสดุผสมหยาบ = ปริมาตรคอนกรีต – ปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสมต่างๆ(ยกเว้นหิน)

โดยที่ปริมาตรเนื้อแท้ (ซึ่งเป็นปริมาตรที่ไม่มีช่องว่างในเนื้อ) ของวัสดุคำนวณได้จากความถ่วงจำเพาะและน้ำหนักของวัสดุ กล่าวคือ

$$\text{ปริมาตรเนื้อแท้} = \frac{\text{น้ำหนักของวัสดุ}}{\text{ความถ่วงจำเพาะ x หน่วยน้ำหนักน้ำ}}$$

4.2.8. ปรับอัตราส่วนผสมเนื่องจากความชื้นของวัสดุผสม

ตามปกติ วัสดุผสมที่ใช้งานจริงจะมีความชื้นสูงกว่าในสภาวะอิ่มตัวและผิวแห้งฉะนั้นจึงต้องแก้ส่วนผสมให้เข้ากับสภาพจริง โดยเพิ่มน้ำหนักของวัสดุผสมขึ้นเท่ากับน้ำหนักที่ติดมาและลดน้ำในส่วนผสมออกในจำนวนเท่ากัน ในกรณีที่วัสดุผสมแห้งกว่าสภาวะอิ่มตัวและผิวแห้งจะต้องแก้ส่วนผสมเช่นเดียวกันในทางตรงกันข้าม

หมายเหตุ

ขั้นตอนต่างๆของวิธีการหาปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตนี้เป็นขั้นตอน ในการหาปฏิภาคผสมสำหรับคอนกรีตล้วนตามมาตรฐานของสถาบันคอนกรีตของสหรัฐอเมริกา (ACI)

4.3. ตัวอย่างการหาปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (Mix Design)

ปูนซีเมนต์

- ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ 3.15

หิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หิน

- วัสดุผสมหยาบขนาดโตสุด	20 มิลลิเมตร
- ความถ่วงจำเพาะ	2.70
- ค่าความชื้น	1.10 %
- หน่วยน้ำหนักแห้ง	1600 กก./ลบ.เมตร
- การดูดซึมน้ำ	0.5 %

ทราย

- ความถ่วงจำเพาะ	2.60
- ค่าความชื้น	1.21 %
- ค่าโมดูลัสความละเอียด	2.80
- การดูดซึมน้ำ	0.7 %

4.3.1. ตัวอย่างการคำนวณส่วนผสมของคอนกรีตธรรมดา

1. กำลังอัดที่ต้องการผลิต = $fc' + ks$

$= 250 + (1.645 \times 30) = 400$ ksc

2. จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 ควรใช้ค่าความยุบตัว 8 – 10 ซม.

3. จากตารางที่ 4.4 จะได้ปริมาณน้ำที่ต้องใช้ 200 ลิตร/ลบ.เมตรของคอนกรีต

4. จากตารางที่ 4.6 จะได้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ต้องใช้ = 0.43

5. ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ $= \frac{200}{0.43} = 465$ กก.

6. หาปริมาณของวัสดุผสมหยาบจากตารางที่ 4.7 จะได้ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งและอัดแน่น = 0.62 ลบ.เมตร/ลบ.เมตรของคอนกรีต

หน่วยน้ำหนักของหิน = 1600 กก./ลบ.เมตร

ดังนั้นน้ำหนักของวัสดุผสมหยาบที่ใช้ $= 0.62 \times 1600 = 992$ กก./ลบ.เมตร ของคอนกรีต

7. หาปริมาณของวัสดุผสมละเอียด

ปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสม :

ปริมาตรของน้ำ $= \frac{200}{1000} = 0.200$ ลบ.เมตร

ปริมาตรของซีเมนต์ $= \frac{465}{3.15 \times 1000} = 0.148$ ลบ.เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบ $= \frac{992}{0.7 \times 1000} = 0.367$ ลบเมตร

ปริมาตรของฟองอากาศ $= 0.02 \times 1 = 0.020$ ลบ.เมตร

ดังนั้นปริมาตรของส่วนผสมทั้งหมดยกเว้นทราย $= 0.735$ ลบ.เมตร

ปริมาตรของทรายที่ต้องใช้ $= 1 - 0.735 = 0.265$ ลบ.เมตร

น้ำหนักของทรายแห้ง $= 0.265 \times 2.60 \times 1000 = 689$ กก.

ฉะนั้นคอนกรีต 1 ลบ.เมตรต้องใช้

ซีเมนต์	465 กก.
น้ำ	200 กก.
วัสดุผสมหยาบ	992 กก.
วัสดุผสมละเอียด	689 กก.
รวมน้ำหนักทั้งหมด	2346 กก.

4.3.2. ส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ

ในการวิจัยครั้งนี้นั้นมุ่งศึกษาถึงกำลังของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการลดปริมาณน้ำในส่วนผสมและเติมสารลดน้ำพิเศษเข้าไปในส่วนผสมของคอนกรีตดังนั้นในคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษจะควบคุมน้ำให้มีปริมาณที่ 180 ลิตรต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรของคอนกรีตและในส่วนประกอบอื่นๆอันได้แก่ ซีเมนต์ หินและทรายจะใช้เท่ากับคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ผสมสารลดน้ำพิเศษ

สารลดน้ำพิเศษแต่ละชนิดที่ใช้จะควบคุมการใช้ที่ 3 ปริมาณคือ

- 0.60 ลิตร/ซีเมนต์ 100 กก. (2.790 ลิตร /1 ลบ.เมตรของคอนกรีต)
- 1.0 ลิตร/ซีเมนต์ 100 กก. (4.650 ลิตร /1 ลบ.เมตรของคอนกรีต)
- 2.0 ลิตร/ซีเมนต์ 100 กก. (9300 ลิตร / 1 ลบ.เมตรของคอนกรีต)

ในส่วนของรายละเอียดการทดลองนั้นจะกล่าวไว้ในบทที่ 5 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ k และร้อยละของกำลังอัดที่ต่ำกว่า fc'

ค่าร้อยละของกำลังที่ต่ำกว่า fc'	ค่า k
20	0.842
10	1.282
5	1.645
2.5	1.96
2	2.054
1	2.326
0	3.000

ตารางที่ 4.2 ค่าความยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการก่อสร้างประเภทต่างๆ

ประเภทของงาน	ค่าความยุบตัว (ซม.)	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
งานฐานราก กำแพง คอนกรีตเสริมเหล็ก	8.0	2.0
งานฐานรากคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก งานก่อสร้างใต้น้ำ	8.0	2.0
งานพื้น คาน และผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก	10.0	2.0
งานเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	10.0	2.0
งานพื้นถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก	8.0	2.0
งานคอนกรีตขนาดใหญ่	5.0	2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ขนาดโตสุดของวัสดุผสมสำหรับงานก่อสร้างประเภทต่างๆ

ขนาดความหนาของโครงสร้าง (ซม.)	ขนาดโตสุดของวัสดุผสม							
	คานผนังและเสา คสล.		ผนังคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก		พื้นถนน คสล. รับน้ำหนักมาก		พื้นคอนกรีตรับน้ำหนักน้อย	
	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.
5.0-15.0	1/2-3/4	12.5-20	3/4	20	3/4	20-25	3/4-1 1/2	20-40
15.0-30.0	3/4-1 1/2	20-40	1 1/2	40	1 1/2	40	1 1/2-3	40-75
30.0-75.0	1 1/2-3	40-75	3	75	1 1/2-3	40-70	3	75
มากกว่า 75.0	1 1/2-3	40-75	6	150	1 1/2-3	40-75	3-6	75-150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับความยุบตัวและวัสดุผสมขนาดต่างๆ

ค่าความยุบตัว (ซม.)	ปริมาณน้ำเป็นลิตรต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตรสำหรับวัสดุผสมขนาดต่างๆ							
	3/8" (10 มม.)	1/2" (12.5 มม.)	3/4" (20 มม.)	1" (25 มม.)	1 1/2" (40 มม.)	2" (50 มม.)	3" (75 มม.)	6" (150 มม.)
คอนกรีตที่ไม่มีสารกระจายกักฟองอากาศ (Non Air Entraining Concrete)								
3-5	205	200	185	180	160	155	145	125
8-10	225	215	200	195	175	170	160	140
15-18	240	230	210	205	185	180	170	-
ปริมาณฟองอากาศ (%) โดยปริมาตร	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
คอนกรีตที่มีสารกระจายกักฟองอากาศ (Air Entraining Concrete)								
3-5	180	175	165	160	145	140	135	120
8-10	200	190	180	175	160	155	150	135
15-18	215	205	190	185	170	165	160	-
ปริมาตรฟองอากาศ (%) โดยปริมาตร	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดโดยน้ำหนักที่ยอมให้ใช้สำหรับคอนกรีตในสภาวะเปิดเผยรุนแรง

ชนิดของโครงสร้าง	โครงสร้างที่เปียกตลอดเวลา หรือมีการเยือกแข็งและการละลายของน้ำสลับกันบ่อยๆ (เฉพาะคอนกรีตกระจายกักฟองอากาศเท่านั้น)	โครงสร้างในน้ำทะเลหรือสัมผัสกับซัลเฟต
โครงสร้างบางๆ ที่มีเหล็กหุ้ม บางกว่า 3 ซม.	0.45	0.40
โครงสร้างอื่นๆ ทั้งหมด	0.50	0.45

* ถ้าใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต อาจเพิ่มค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์นี้ได้อีก 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 28 วัน (กก./ตร.ซม.)	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยน้ำหนัก	
	คอนกรีตไม่กระจายกักฟองอากาศ	คอนกรีตกระจายกักฟองอากาศ
450	0.38	-
400	0.43	-
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

หมายเหตุ ค่าที่ใช้จากตารางนี้ ทำการทดลองจากแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 x 30 ซม. ถ้าแท่ง ตัวอย่างเป็นแบบลูกบาศก์ ค่ากำลังอัดประลัยจะสูงกว่าค่าในตารางประมาณ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอยกรีต

ขนาดโตสุดของหิน	ปริมาณของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งและอัดแน่นต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต สำหรับค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายต่างๆกัน			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8" (10 มม.)	0.5	0.48	0.46	0.44
1/2" (12.5 มม.)	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4" (20 มม.)	0.66	0.64	0.62	0.6
1" (25 มม.)	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2 " (40 มม.)	0.76	0.74	0.72	0.7
2" (50 มม.)	0.78	0.76	0.74	0.72
3" (75 มม.)	0.81	0.79	0.77	0.75
6" (150 มม.)	0.87	0.85	0.83	0.81

หมายเหตุ ค่าที่กำหนดให้ เป็นค่าสำหรับงานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วๆไป สำหรับงานคอนกรีตที่ทำได้ง่ายกว่า เช่น ถนน พื้น เป็นต้น อาจเพิ่มค่าเหล่านี้ขึ้นได้อีก 10 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดโดยประมาณ

ขนาดโตสุดของหิน	หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (กก./ลบ.เมตร)	
	คอนกรีตที่ไม่ใช้สารกระจายกักฟองอากาศ	คอนกรีตที่ใช้สารกระจายกักฟองอากาศ
3/8" (10 มม.)	2285	2190
1/2" (12.5 มม.)	2315	2235
3/4" (20 มม.)	2355	2280
1" (25 มม.)	2375	2315
1 1/2" (40 มม.)	2420	2355
2" (50 มม.)	2445	2375
3" (75 มม.)	2465	2400
6" (150 มม.)	2505	2435

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่5
การทดสอบวิจัย

5.1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวิจัย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณ 13 ถุง
2. สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) จำนวน 4 ชนิด ชนิดละ 4 ลิตร
    2.1 RHEOBUILD1000
    2.2 RHEOBUILD1000R (ชนิดยืดเวลาการก่อตัว)
    2.3 DARACEM
    2.4 DARACEM100 (ชนิดยืดเวลาการก่อตัว)
3. หินที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไป เบอร์ 1
4. ทรายแม่น้ำที่ใช้ในการก่อสร้างทั่งไป
5. น้ำประปา
6. กำมะถันผงและเครื่องต้มสำหรับหล่อหัวท้ายแท่งคอนกรีต
7. เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิค
8. อุปกรณ์การทดสอบหาค่าความยุบตัว
9. แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.
10. กระบอกตวง เกรียงเหล็ก คีม และค้อน
11. พลั่วตักคอนกรีต
12. เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. สำหรับกระทุ้งคอนกรีต
13. เครื่องหล่อหมวก (Capped) หัวท้ายของแท่งคอนกรีตตัวอย่าง
14. เครื่องทดสอบคอนกรีต (Universal testing machine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2. ปริมาณที่ใช้ในการทดสอบวิจัย

ตารางที่ 5.1 ปริมาณส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบวิจัยต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร

ชุดตัวอย่าง	สารลดน้ำพิเศษ		Water	Cement	Sand	Gravel
	ชนิด	ปริมาณ	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
1	Rheobuild1000	2790	180	465	690	992
	Rheobuild1000	4650	180	465	690	992
	Rheobuild1000	9300	180	465	690	992
2	Rheobuild1000R	2790	180	465	690	992
	Rheobuild1000R	4650	180	465	690	992
	Rheobuild1000R	9300	180	465	690	992
3	Daracem	2790	180	465	690	992
	Daracem	4650	180	465	690	992
	Daracem	9300	180	465	690	992
4	Daracem100	2790	180	465	690	992
	Daracem100	4650	180	465	690	992
	Daracem100	9300	180	465	690	992
5	Normal Concrete	-	200	465	690	992

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3. วิธีการทดสอบวิจัย

5.3.1. การเตรียมวัสดุผสมและแบบหล่อ

1. ตวงวัสดุผสมทั้งหมดที่ใช้ตามปริมาณที่ได้คำนวณไว้แล้ว (วัสดุผสม , ซีเมนต์ , สารลดน้ำพิเศษ , หิน , ทราย และน้ำ)

2. ทำความสะอาดแบบ อย่าให้มีฝุ่นหรือปูนเก่าติดอยู่ ทาน้ำมันที่ด้านผิวในแบบที่คอนกรีตจะสัมผัสให้ทั่ว

3. ตรวจสอบสกรูสำหรับรัดแบบทุกตัวให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์ด้วยการประกอบแบบแล้วขันหรือรัดให้แน่น ทั้งนี้เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดรอยแยกหรือแบบหลุดขณะเทคอนกรีตหรือกระทุ้งเพื่อให้คอนกรีตแน่น

5.3.2. การเตรียมตัวอย่างแท่งคอนกรีต

1.สำหรับคอนกรีตที่ใช้เครื่องผสม พยายามเลือกเอาคอนกรีตที่อยู่ตรงกลางที่เทออกจากเครื่องผสมใหม่ๆ

2. เทคอนกรีตดังกล่าวลงในแบบส่วนหนึ่ง ประมาณให้ได้ความสูง 1 ใน 3 ของแบบหล่อและใช้เหล็กกระทุ้งให้ทั่ว 25 ครั้ง จากนั้นกระทำเช่นเดียวกันอีก 2 ชั้นเมื่อคอนกรีตเต็มแบบหล่อแล้วจึงปาดผิวหน้าให้เรียบ

3. ทิ้งแบบที่บรรจุคอนกรีตเรียบร้อยแล้วไว้ในร่มเฉยๆ ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออก นำแท่งคอนกรีตไปบ่มโดยแช่ในอ่างบ่มจนถึงอายุที่ต้องการทดสอบ (ตัวอย่างคอนกรีตที่จะนำมาทดสอบ 1 ชุดมี 5 ตัวอย่าง

5.3.3. การทดสอบค่าการยุบตัว

โดยทั่วไปแล้ว การทดสอบค่าความสามารถในการเทของคอนกรีตเหลวมีอยู่หลายวิธี ขึ้นกับสภาพของคอนกรีตที่จะวัด คือ

1.คอนกรีตที่ค่อนข้างแห้งหรือแข็งกระด้าง ควรใช้วิธี Vebe Test ตามมาตรฐาน BS 1881 : PART 104 : 1983

2. คอนกรีตทั่วๆไปควรใช้ Slump Test ตามมาตรฐาน ASTM C143

3. คอนกรีตเหลวมาก ควรใช้การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีตที่แผ่กระจายออก (Flow Test) ตามมาตรฐาน DIN 1048 : PART 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิจัยครั้งนี้ เลือกใช้การวัดค่ายุบตัว (Slump Test) ของคอนกรีตเหลวและทดสอบหาค่าสูญเสียการยุบตัว (Slump Loss) เพื่อจะดูว่าคอนกรีตนั้นจะมีค่ายุบตัวลดลงตามเวลาอย่างไร

ขั้นตอนการทดสอบหาค่าความยุบตัว

1. นำอุปกรณ์ทดสอบ Slump มาจุ่มน้ำให้เปียก

2. วางแผ่นเหล็กลงกับพื้นราบนำโคนขึ้นวาง ใช้เท้าเหยียบปลายทั้ง 2 ข้าง

3. ใช้ช้อนตัก ตักคอนกรีตใส่ลงในโคนโดยแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นให้มีปริมาณที่เท่ากัน ชั้นที่ 1 ใส่คอนกรีตลงในโคนสูงประมาณ 6-7 ซม. กระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้ง 25 ครั้งทั่วพื้นที่ ใส่คอนกรีตในชั้นที่ 2 จนได้ส่วนสูงประมาณ 15 ซม. กระทุ้งให้ทะลุจนถึงคอนกรีตชั้นที่ 1 เล็กน้อย ใส่คอนกรีตชั้นที่ 3 จนเต็ม กระทุ้งให้ทะลุจนถึงคอนกรีตชั้นที่ 2 เล็กน้อย ปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบรวมทั้งทำความสะอาดบริเวณโคนและแผ่นเหล็กรอง

4. ดึงโคนขึ้นตรงๆ โดยที่ไม่หมุน

5. วางโคนลงข้างๆ คอนกรีตแล้ววัดค่าการยุบตัวของคอนกรีต

5.3.4. การทดสอบหาค่าสูญเสียการยุบตัว

1. หลังจากวัด Initial Slump เพื่อหาค่ายุบตัวเริ่มต้นเสร็จ ให้เทคอนกรีตกลับใส่โม่ผสมทิ้งไว้โดยมีฝาปิดโม่ ไม่ให้น้ำระเหยออกและเปิดเครื่องผสมเป็นระยะๆ

2. ทุกๆ 15 นาที นำคอนกรีตออกจากโม่มาทดสอบหาค่ายุบตัว จนคอนกรีตไม่มีค่ายุบตัว

เนื่องจากในงานวิจัยครั้งนี้มีสารลดน้ำพิเศษบางชนิดที่สามารถช่วยยืดเวลาการก่อตัวของคอนกรีตได้ การวัดค่าสูญเสียการยุบตัวจนกว่าคอนกรีตจะไม่มีค่ายุบตัวนั้นจะต้องใช้เวลามาก ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้ จึงมีการจำกัดเวลาการวัดไว้อย่างมากที่สุดไม่เกิน 2 ชั่วโมง

5.3.5. การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

1. ทำการ Capped หัวแท่งคอนกรีตตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ด้าน

2. นำแท่งตัวอย่างวางลงตรงกึ่งกลางของแท่นทดสอบ โดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกด

3.เปิดเครื่องทดสอบโดยในการทดสอบนี้จะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอ

4. กดก้อนตัวอย่างจนแตก บันทึกค่ากำลังที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำค่าน้ำหนักและพื้นที่หน้าตัดที่ได้มาหากำลังอัดประลัย

$$\text{กำลังอัดประลัยของคอนกรีต} = \frac{\text{น้ำหนักกดประลัย}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่าง}}$$

โดยกำหนดให้

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่าง} = \frac{\pi D^2}{4}$$

โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลาง เฉลี่ยจากการวัด 2 ทิศทางตั้งฉากกันที่กึ่งกลางความสูงของแท่งตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่6
ผลการทดสอบวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ในการทดสอบวิจัยนี้สามารถบันทึกผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษในปริมาณต่างๆที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.39 เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา ที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.43 เป็นการทดสอบหลังจากการบ่มที่ 3 วัน, 7 วัน, และ28 วัน พร้อมทั้งผลการทดสอบค่าความยุบตัวและการสูญเสียความยุบตัวของคอนกรีต รวมตัวอย่างที่ทำการทดสอบวิจัยทั้งหมด 195 ตัวอย่าง

6.1. ผลการทดสอบด้านการรับกำลังอัด

6.1.1. ผลการทดสอบที่อายุ 3 วัน

ก. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000

ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 381.22 ksc
ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 387.71 ksc
ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 417.94 ksc

ข. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEBUILD1000R

ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 361.54 ksc
ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 399.91 ksc
ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 499.63 ksc

ค. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM

ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 367.73 ksc
ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 420.19 ksc
ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 431.92 ksc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM100

ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 412.03 ksc

ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 414.43 ksc

ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 462.88 ksc

จ. คอนกรีตธรรมดา สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 269.69 ksc

6.1.2. ผลการทดสอบที่อายุ 7 วัน

ก. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000

ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 439.23 ksc

ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 507.05 ksc

ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 494.76 ksc

ข. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEBUILD1000R

ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 385.39 ksc

ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 456.70 ksc

ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 467.63 ksc

ค. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM

ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 419.75 ksc

ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 449.76 ksc

ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 463.46 ksc

ง. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM100

ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 439.79 ksc

ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 469.23 ksc

ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 546.48 ksc

จ. คอนกรีตธรรมดา สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 321.75 ksc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.3. ผลการทดสอบที่อายุ 28 วัน

ก. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000

ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 547.69 ksc
ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 571.02 ksc
ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 609.71 ksc

ข. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEBUILD1000R

ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 448.90 ksc
ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 500.03 ksc
ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 566.76 ksc

ค. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM

ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 474.94 ksc
ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 477.55 ksc
ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 522.66 ksc

ง. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM100

ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 493.14 ksc
ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 517.47 ksc
ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 601.02 ksc

จ. คอนกรีตธรรมดา สามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 382.07 ksc

6.2. ผลการทดสอบค่าความยุบตัว

6.2.1. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000

ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร มี ค่าความยุบตัวเท่ากับ 11.0 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร มีค่าความยุบตัวเท่ากับ 16.0 ซม.
ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร มีค่าความยุบตัวเท่ากับ 21.5 ซม.

6.2.2. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000R

ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร มีค่าความยุบตัวเท่ากับ 19.0 ซม.
ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร มีค่าความยุบตัวเท่ากับ 22.0 ซม.
ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร มีค่าความยุบตัวเท่ากับ 23.0 ซม.

6.2.3. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM

ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร มีค่าความยุบตัวเท่ากับ 13.0 ซม.
ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร มีค่าความยุบตัวเท่ากับ 22.0 ซม.
ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร มีค่าความยุบตัวเท่ากับ 24.0 ซม.

6.2.4. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM100

ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร มีค่าความยุบตัวเท่ากับ 17.0 ซม.
ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร มีค่าความยุบตัวเท่ากับ 20.0 ซม.
ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร มีค่าความยุบตัวเท่ากับ 23.0 ซม.

6.2.5. คอนกรีตธรรมดา มีค่าความยุบตัวเท่ากับ 8.5 ซม.

6.3. ผลการทดสอบการสูญเสียค่าความยุบตัว

6.3.1. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000

ก. ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร

- เวลา 0:00 มีค่าความยุบตัว 11.0 ซม.
- เวลา 0:15 มีค่าความยุบตัว 4.0 ซม.
- เวลา 0:30 มีค่าความ ยุบตัว 1.0 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร

- เวลา 0:15 มีค่าความยุบตัว 16.0 ซม.
- เวลา 0:30 มีค่าความยุบตัว 5.0 ซม.
- เวลา 0:45 มีค่าความยุบตัว 1.5 ซม.

ค. ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร

- เวลา 0:00 มีค่าความยุบตัว 21.5 ซม.
- เวลา 0:15 มีค่าความยุบตัว 16.0 ซม.
- เวลา 0:30 มีค่าความยุบตัว 12.0 ซม.
- เวลา 0:45 มีค่าความยุบตัว 9.0 ซม.
- เวลา 1:00 มีค่าความยุบตัว 4.5 ซม.
- เวลา 1:15 มีค่าความยุบตัว 2.0 ซม.

6.3.2. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000R

ก. ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร

- เวลา 0:00 มีค่าความยุบตัว 19.0 ซม.
- เวลา 0:15 มีค่าความยุบตัว 17.0 ซม.
- เวลา 0:30 มีค่าความยุบตัว 15.0 ซม.
- เวลา 0:45 มีค่าความยุบตัว 12.5 ซม.
- เวลา 1:00 มีค่าความยุบตัว 11.0 ซม.
- เวลา 1:15 มีค่าความยุบตัว 9.0 ซม.
- เวลา 1:30 มีค่าความยุบตัว 7.0 ซม.
- เวลา 1:45 มีค่าความยุบตัว 5.0 ซม.
- เวลา 2:00 มีค่าความยุบตัว 4.0 ซม.

ข. ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร

- เวลา 0:00 มีค่าความยุบตัว 22.0 ซม.
- เวลา 0:15 มีค่าความยุบตัว 20.0 ซม.
- เวลา 0:30 มีค่าความยุบตัว 18.5 ซม.
- เวลา 0:45 มีค่าความ ยุบตัว 16.0 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เวลา 1:00 มีค่าความยุบตัว 13.0 ซม.
- เวลา 1:15 มีค่าความยุบตัว 10.5 ซม.
- เวลา 1:30 มีค่าความยุบตัว 8.0 ซม.
- เวลา 1:45 มีค่าความยุบตัว 6.5 ซม.
- เวลา 2:00 มีค่าความยุบตัว 5.0 ซม.

ค. ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร

- เวลา 0:00 มีค่าความยุบตัว 23.0 ซม.
- เวลา 0:15 มีค่าความยุบตัว 20.5 ซม.
- เวลา 0:30 มีค่าความยุบตัว 19.0 ซม.
- เวลา 0:45 มีค่าความยุบตัว 17.5 ซม.
- เวลา 1:00 มีค่าความยุบตัว 15.0 ซม.
- เวลา 1:15 มีค่าความยุบตัว 13.0 ซม.
- เวลา 1:30 มีค่าความยุบตัว 9.5 ซม.
- เวลา 1:45 มีค่าความยุบตัว 8.0 ซม.
- เวลา 2:00 มีค่าความยุบตัว 7.0 ซม.

6.3.3. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM

ก. ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร

- เวลา 0:00 มีค่าความยุบตัว 13.0 ซม.
- เวลา 0:15 มีค่าความยุบตัว 8.0 ซม.
- เวลา 0:30 มีค่าความยุบตัว 5.0 ซม.
- เวลา 0:45 มีค่าความยุบตัว 3.0 ซม.

ข. ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร

- เวลา 0:00 มีค่าความยุบตัว 22.0 ซม.
- เวลา 0:15 มีค่าความยุบตัว 11.0 ซม.
- เวลา 0:30 มีค่าความยุบตัว 7.0 ซม.
- เวลา 0:45 มีค่าความยุบตัว 5.0 ซม.
- เวลา 1:00 มีค่าความ ยุบตัว 3.0 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร

- เวลา 0:00 มีค่าความยุบตัว 24.0 ซม.
- เวลา 0:15 มีค่าความยุบตัว 19.0 ซม.
- เวลา 0:30 มีค่าความยุบตัว 14.0 ซม.
- เวลา 0:45 มีค่าความยุบตัว 8.0 ซม.
- เวลา 1:00 มีค่าความยุบตัว 4.0 ซม.
- เวลา 1:15 มีค่าความยุบตัว 1.0 ซม.

6.3.4. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM100

ก. ที่ปริมาณ 2790 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร

- เวลา 0:00 มีค่าความยุบตัว 17.0 ซม.
- เวลา 0:15 มีค่าความยุบตัว 16.5 ซม.
- เวลา 0:30 มีค่าความยุบตัว 14.0 ซม.
- เวลา 0:45 มีค่าความยุบตัว 12.5 ซม.
- เวลา 1:00 มีค่าความยุบตัว 9.5 ซม.
- เวลา 1:15 มีค่าความยุบตัว 7.0 ซม.
- เวลา 1:30 มีค่าความยุบตัว 5.5 ซม.
- เวลา 1:45 มีค่าความยุบตัว 3.0 ซม.
- เวลา 2:00 มีค่าความยุบตัว 1.0 ซม.

ข. ที่ปริมาณ 4650 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร

- เวลา 0:00 มีค่าความยุบตัว 20.0 ซม.
- เวลา 0:15 มีค่าความยุบตัว 17.0 ซม.
- เวลา 0:30 มีค่าความยุบตัว 15.5 ซม.
- เวลา 0:45 มีค่าความยุบตัว 13.0 ซม.
- เวลา 1:00 มีค่าความยุบตัว 10.5 ซม.
- เวลา 1:15 มีค่าความยุบตัว 8.0 ซม.
- เวลา 1:30 มีค่าความยุบตัว 6.0 ซม.
- เวลา 1:45 มีค่าความยุบตัว 4.5 ซม.
- เวลา 2:00 มีค่าความ ยุบตัว 2.0 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ที่ปริมาณ 9300 CC.ต่อคอนกรีต 1 ลบ.เมตร

- เวลา 0:00 มีค่าความยุบตัว 23.0 ซม.
- เวลา 0:15 มีค่าความยุบตัว 19.0 ซม.
- เวลา 0:30 มีค่าความยุบตัว 17.5 ซม.
- เวลา 0:45 มีค่าความยุบตัว 15.0 ซม.
- เวลา 1:00 มีค่าความยุบตัว 12.0 ซม.
- เวลา 1:15 มีค่าความยุบตัว 9.5 ซม.
- เวลา 1:30 มีค่าความยุบตัว 7.0 ซม.
- เวลา 1:45 มีค่าความยุบตัว 5.0 ซม.
- เวลา 2:00 มีค่าความยุบตัว 3.0 ซม.

6.3.5 คอนกรีตธรรมดา

- เวลา 0:00 มีค่าความยุบตัว 8.5 ซม.
- เวลา 0:15 มีค่าความยุบตัว 8.0 ซม.
- เวลา 0:30 มีค่าความยุบตัว 7.5 ซม.
- เวลา 0:45 มีค่าความยุบตัว 5.0 ซม.
- เวลา 1:00 มีค่าความยุบตัว 3.0 ซม.
- เวลา 1:15 มีค่าความยุบตัว 2.0 ซม.

โดยที่ผลการทดลองต่างๆที่ได้จะนำเสนอในรูปของตารางข้อมูลและรูปกราฟดังนี้คือ

ตารางที่ 6.1 ตารางสรุปผลค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ

ตารางที่ 6.2 การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเทียบกับระยะเวลาการบ่มแท่งตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 6.3 แสดงผลการวัดค่า Slump Loss ของคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ

รูปที่ 6.1 – 6.7 กราฟเชิงเส้นแสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ

รูปที่ 6.8 – 6.14 แผนภูมิแท่งแสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ

รูปที่ 6.15 – 6.21 กราฟเชิงเส้นแสดงค่าสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมสารลดพิเศษชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 ตารางสรุปผลค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ

Type of Superplasticizer	Mix propotion of 1 cu.m.					W/C	Slump (cm.)	Compressive Strength(ksc.)		
	Cement (kg.)	Water (kg.)	Sand (kg.)	Rock 3/4" (kg.)	Admixture (cc.)			3 days	7 days	28 days
1. RHEOBUILD 1000	465	180	690	992	2790	0.39	11	381.22	439.23	547.69
	465	180	690	992	4650	0.39	16	387.71	507.05	571.02
	465	180	690	992	9300	0.39	21.5	417.94	494.76	609.71
2. RHEOBUILD 1000R	465	180	690	992	2790	0.39	19	361.54	385.39	448.90
	465	180	690	992	4650	0.39	22	399.91	456.70	500.03
	465	180	690	992	9300	0.39	23	449.63	467.63	566.76
3. DARACEM	465	180	690	992	2790	0.39	13	367.73	419.75	474.94
	465	180	690	992	4650	0.39	22	420.19	449.76	477.55
	465	180	690	992	9300	0.39	24	431.92	463.46	522.66
4. DARACEM 100	465	180	690	992	2790	0.39	17	412.03	439.79	493.14
	465	180	690	992	4650	0.39	20	414.43	469.23	517.47
	465	180	690	992	9300	0.39	23	462.88	546.48	601.02
5. NORMAL CONCRETE	465	200	690	992	-	0.43	8.5	269.69	321.75	382.07

ตารางที่ 6.2 การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเทียบกับระยะเวลาการบ่มแห่งตัวอย่างทดสอบ

คอนกรีตผสมสารลดน้ำพิเศษ		ค่าความเค้นอัด (ksc)					
ชนิด	ปริมาณ (cc.)	3 วัน	% เพิ่ม	7 วัน	% เพิ่ม	28 วัน	% เพิ่ม
RHEOBUILD1000	2790	381.22	0.0	439.23	15.22	547.69	24.69
	4650	387.71	0.0	507.05	30.78	571.02	12.62
	9300	417.94	0.0	494.76	18.38	609.71	23.23
RHEOBUILD1000R	2790	361.54	0.0	385.39	6.60	448.90	16.48
	4650	399.91	0.0	456.70	14.20	500.03	9.49
	9300	449.63	0.0	467.63	4.00	566.76	21.20
DARACEM	2790	367.73	0.0	419.75	14.15	474.94	13.15
	4650	420.19	0.0	449.76	7.04	477.55	6.18
	9300	431.92	0.0	463.46	7.30	522.66	12.77
DARACEM100	2790	412.03	0.0	439.79	6.74	493.14	12.13
	4650	414.43	0.0	469.23	13.22	517.47	10.28
	9300	462.88	0.0	546.48	18.06	601.02	9.98
คอนกรีตธรรมดา	-	269.69	0.0	321.75	19.30	382.07	18.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

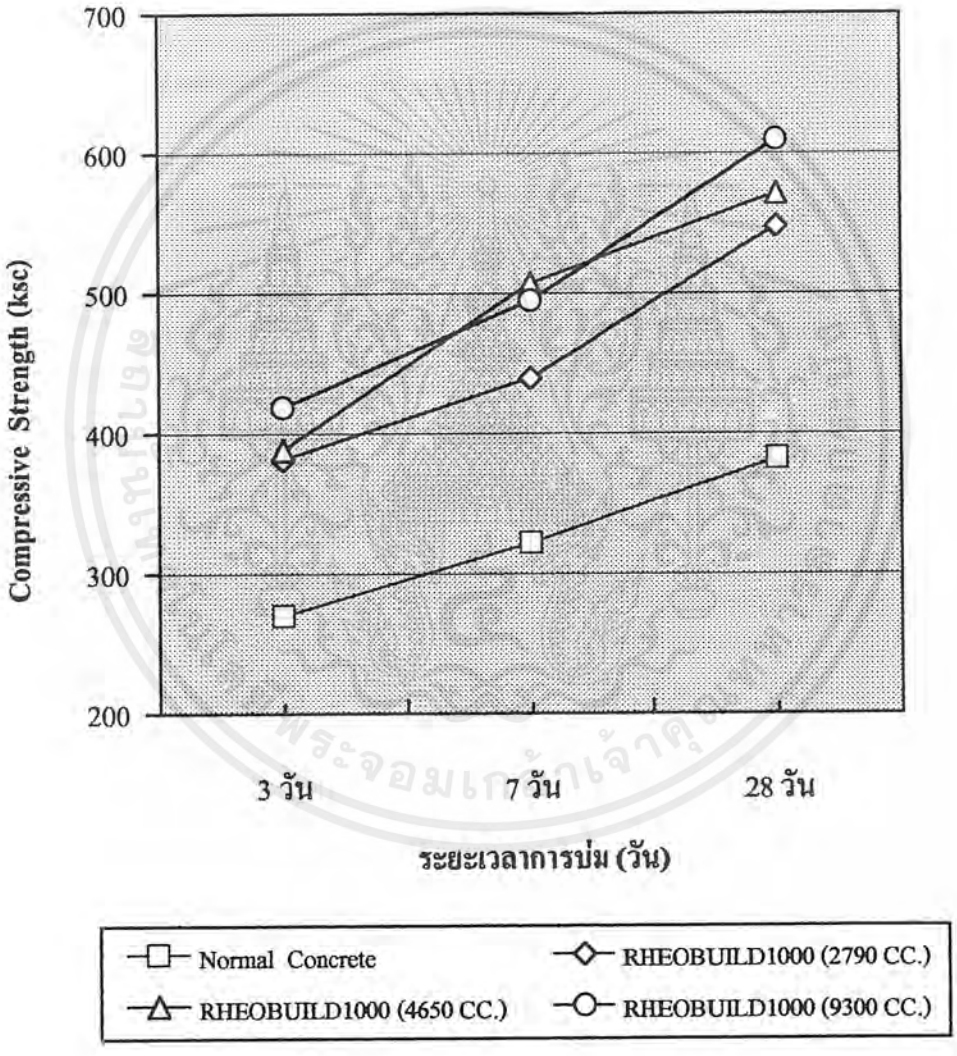
ตารางที่ 6.3 กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาที่ระยะเวลาการบ่มตามกำหนด

คอนกรีตผสมสารลดน้ำพิเศษ		ค่าความเค้นอัด (ksc)					
ชนิด	ปริมาณ (cc.)	3 วัน	% ที่เพิ่มขึ้นจากคอนกรีตธรรมดา	7 วัน	% ที่เพิ่มขึ้นจากคอนกรีตธรรมดา	28 วัน	% ที่เพิ่มขึ้นจากคอนกรีตธรรมดา
RHEOBUILD1000	2790	381.22	41.35	439.23	36.51	547.69	43.35
	4650	387.71	43.76	507.05	57.59	571.02	49.45
	9300	417.94	54.97	494.76	53.77	609.71	59.58
RHEOBUILD1000R	2790	361.54	34.06	385.39	19.78	448.90	17.49
	4650	399.91	48.29	456.70	41.94	500.03	30.87
	9300	449.63	66.72	467.63	45.34	566.76	48.34
DARACEM	2790	367.73	36.35	419.75	30.46	474.94	24.31
	4650	420.19	55.80	449.76	39.79	477.55	24.99
	9300	431.92	60.15	463.46	44.04	522.66	36.80
DARACEM100	2790	412.03	52.78	439.79	36.69	493.14	29.07
	4650	414.43	53.67	469.23	45.84	517.47	35.44
	9300	462.88	71.63	546.48	69.85	601.02	57.31
คอนกรีตธรรมดา	-	269.69	-	321.75	-	382.07	-

ตารางที่ 6.4 แสดงผลการวัดค่า Slump Loss ของคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ

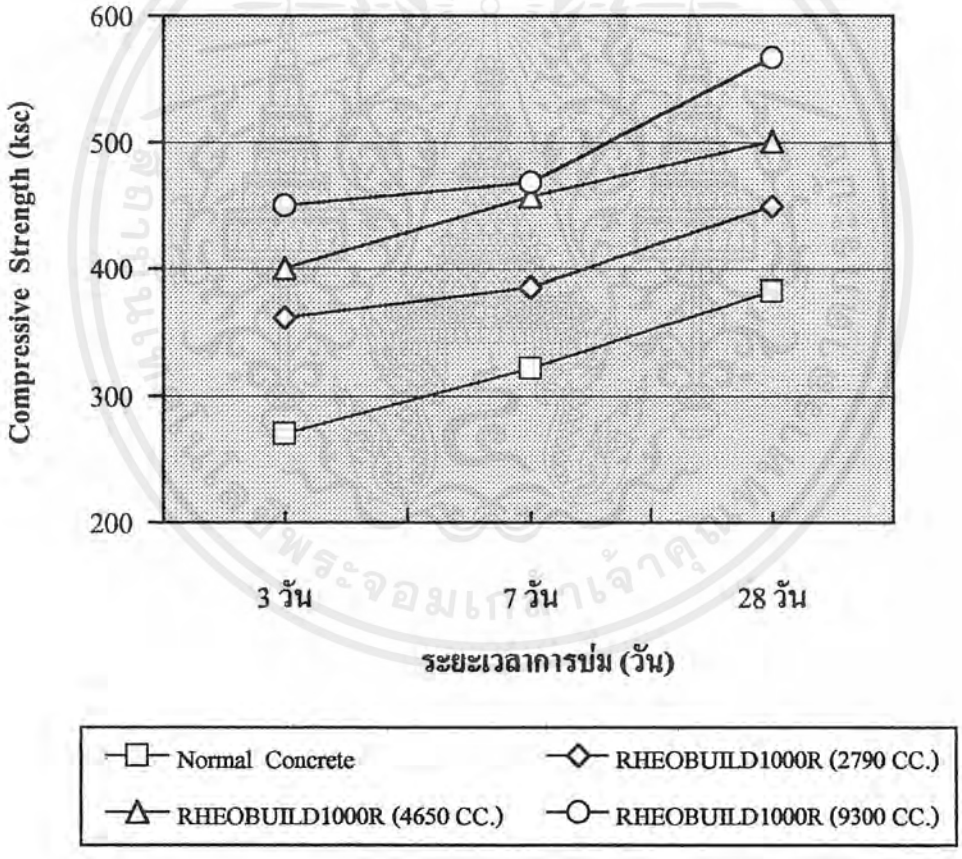
Type of Superplasticizer	Quantity	Elapsed Time (Hr. : min)								
	(cc.)	0:00	0:15	0:30	0:45	1:00	1:15	1:30	1:45	2:00
RHEOBUILD 1000	2790	11	4	1						
RHEOBUILD 1000	4650	16	5	1.5						
RHEOBUILD 1000	9300	21.5	16	12	9	4.5	2			
RHEOBUILD 1000R	2790	19	17	15	12.5	11	9	7	5	4
RHEOBUILD 1000R	4650	22	20	18.5	16	13	10.5	8	6.5	5
RHEOBUILD 1000R	9300	23	20.5	19	17.5	15	13	9.5	8	7
DARACEM	2790	13	8	5	3					
DARACEM	4650	22	11	7	5	3				
DARACEM	9300	24	19	14	8	4	1			
DARACEM 100	2790	17	16.5	14	12	9.5	7	5.5	3	1
DARACEM 100	4650	20	17	15.5	13	10.5	8	6	4.5	2
DARACEM 100	9300	23	19	17.5	15	12	9.5	7	5	3
NORMAL CONCRETE	-	8.5	8	7.5	5	3	2			

รูปที่ 6.1 รูปกราฟแสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000 เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



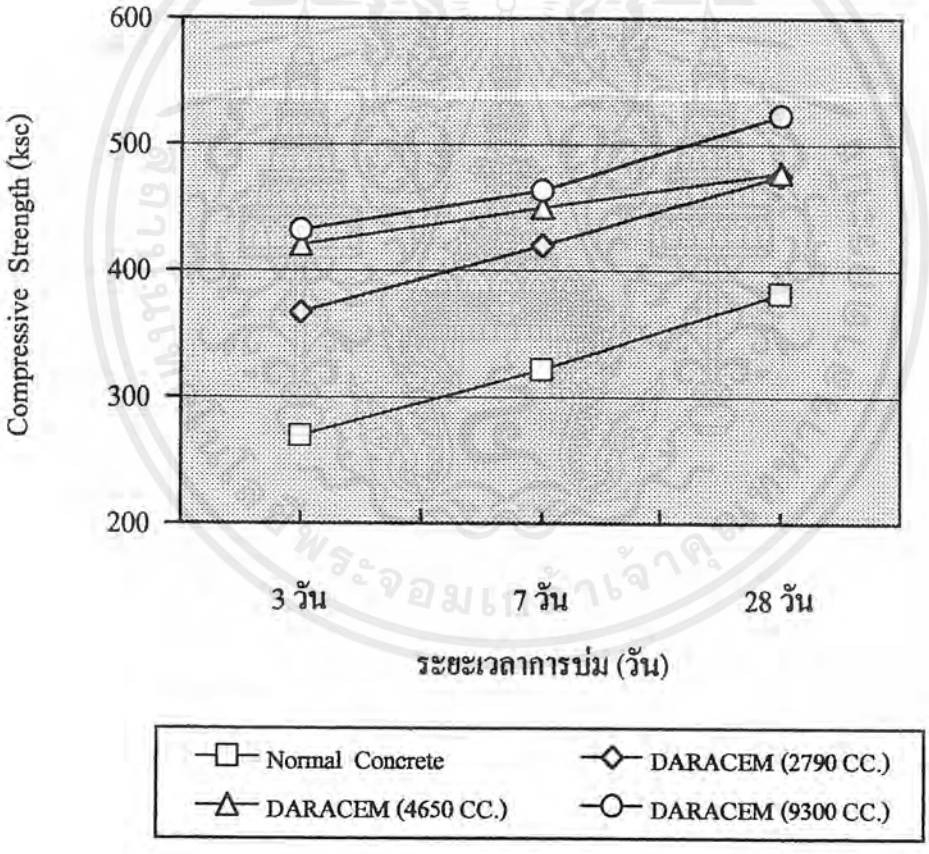
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.2 รูปกราฟแสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000R เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



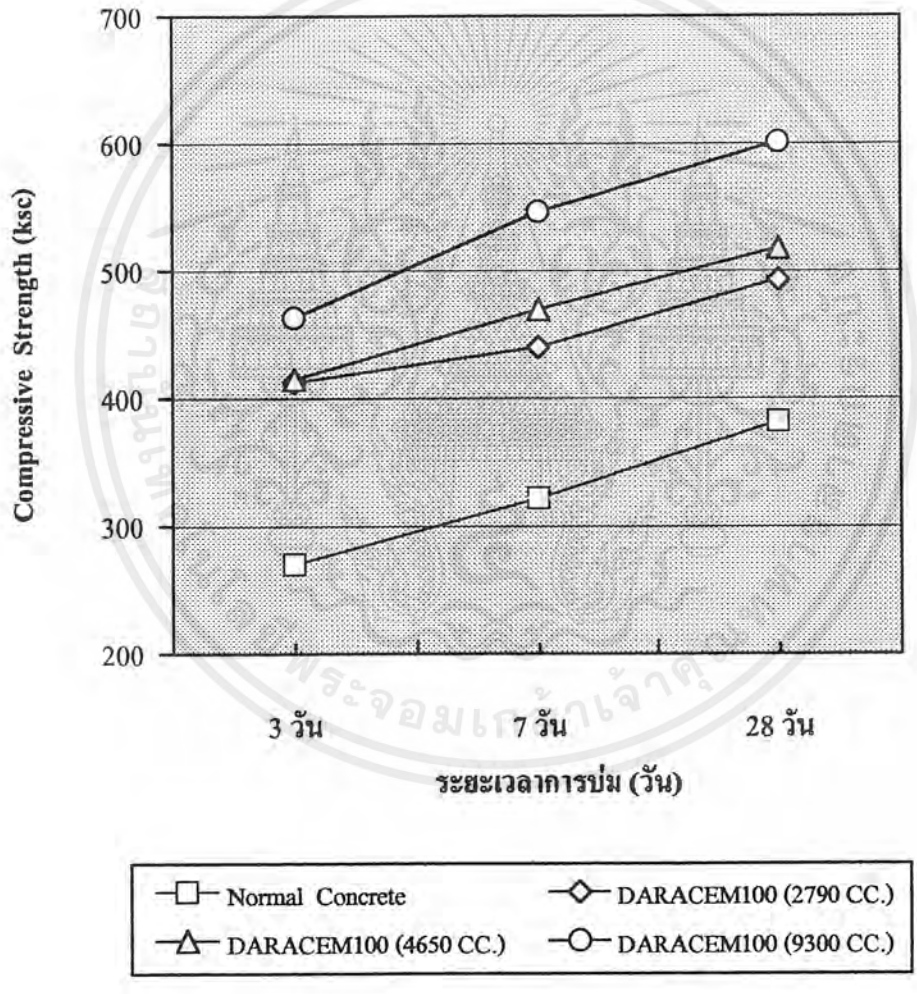
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.3 รูปกราฟแสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



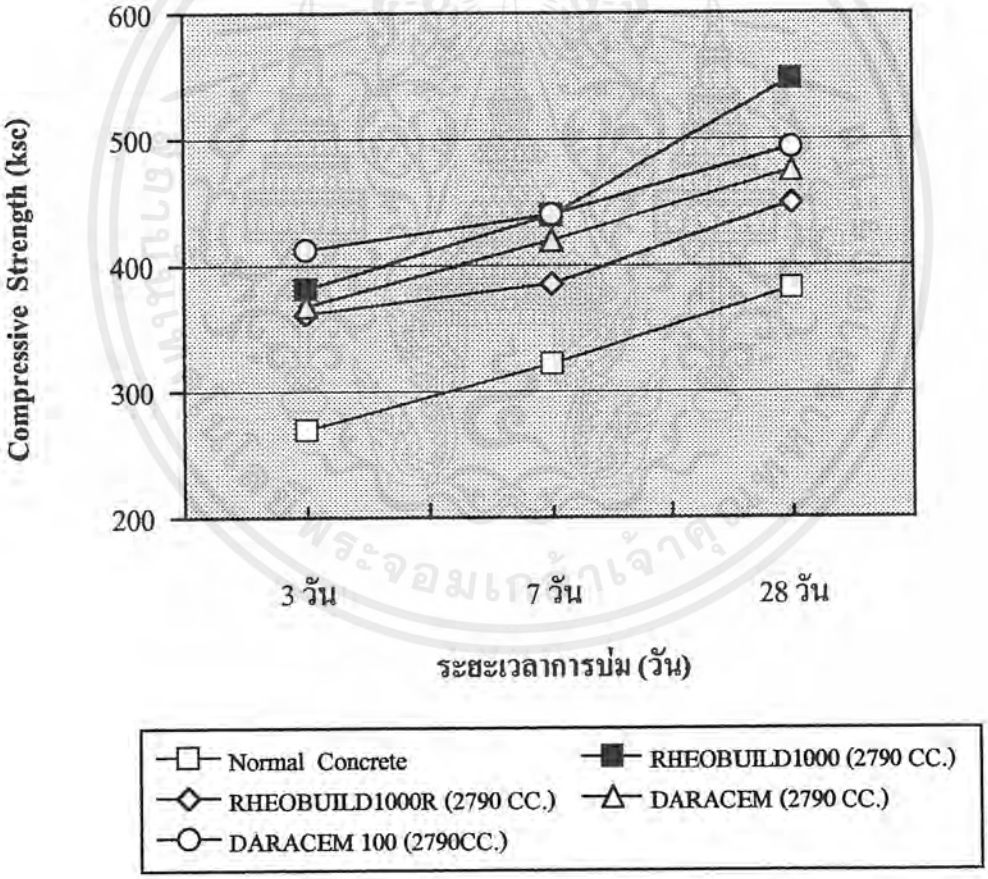
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.4 รูปกราฟแสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM100 เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



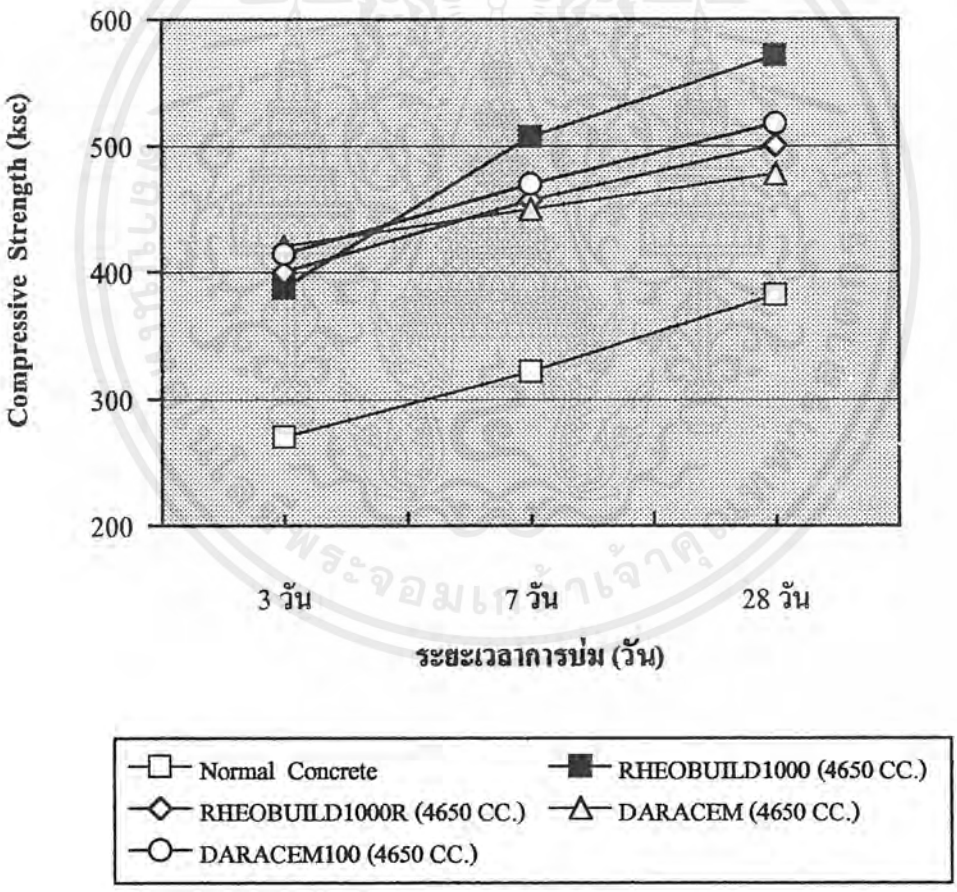
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.5 รูปกราฟเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ ในปริมาณ 2790 CC.



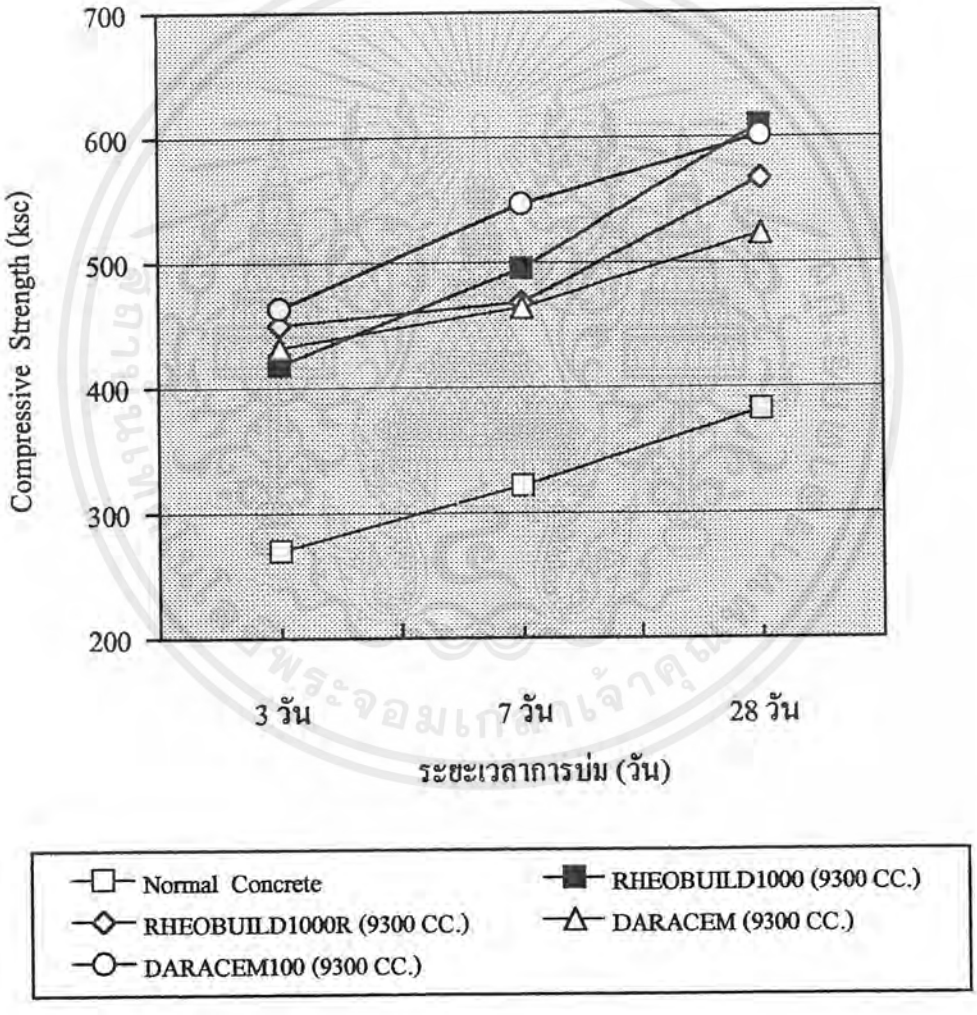
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.6 รูปกราฟเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ ในปริมาณ 4650 CC.



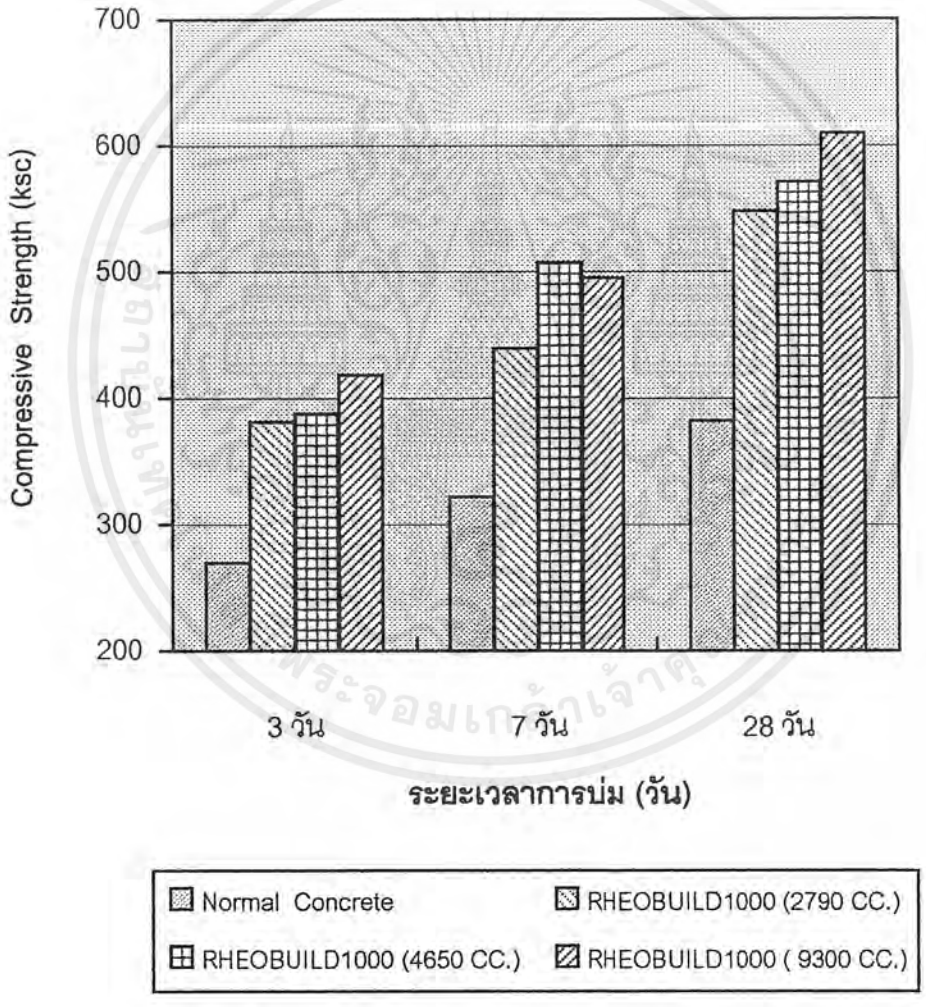
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.7 รูปกราฟเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ ในปริมาณ 9300 CC.



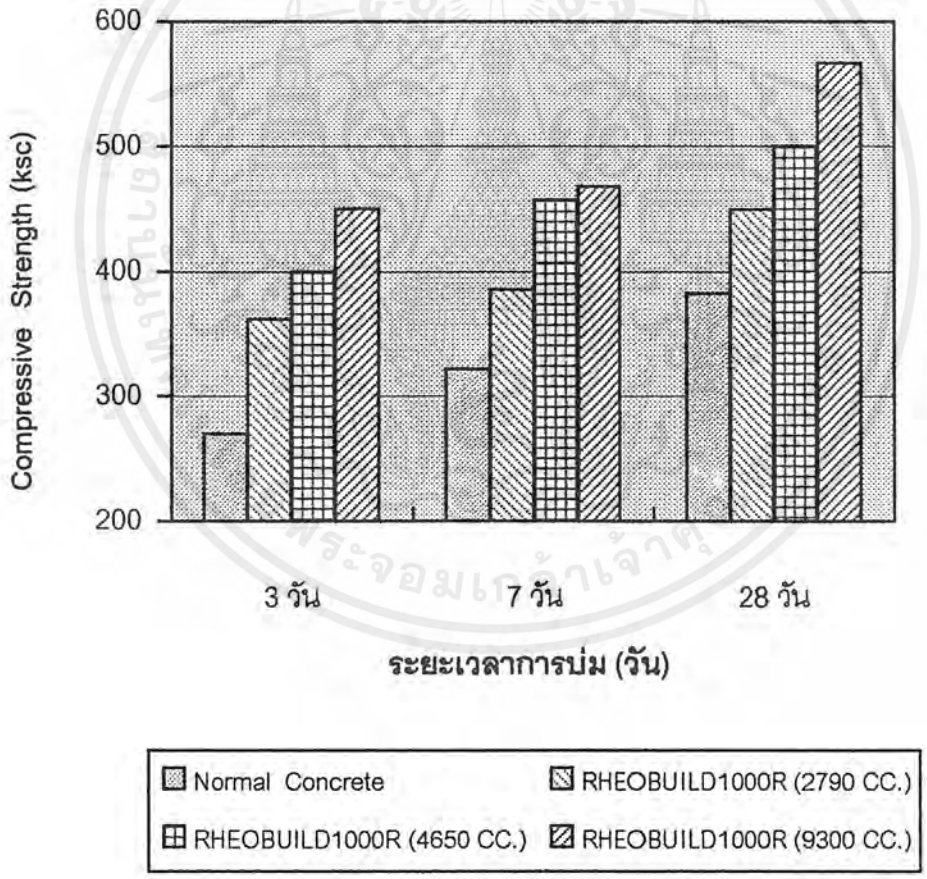
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.8 รูปแผนภูมิแท่งแสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000 เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



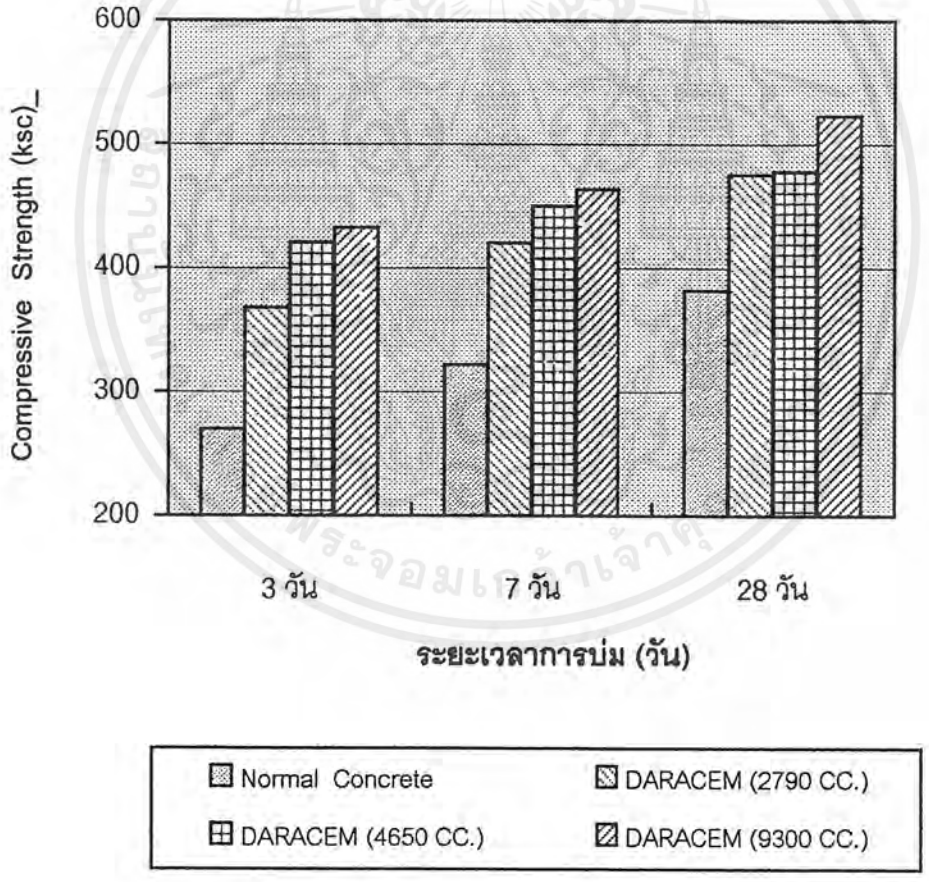
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.9 รูปแผนภูมิแท่งแสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000R เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



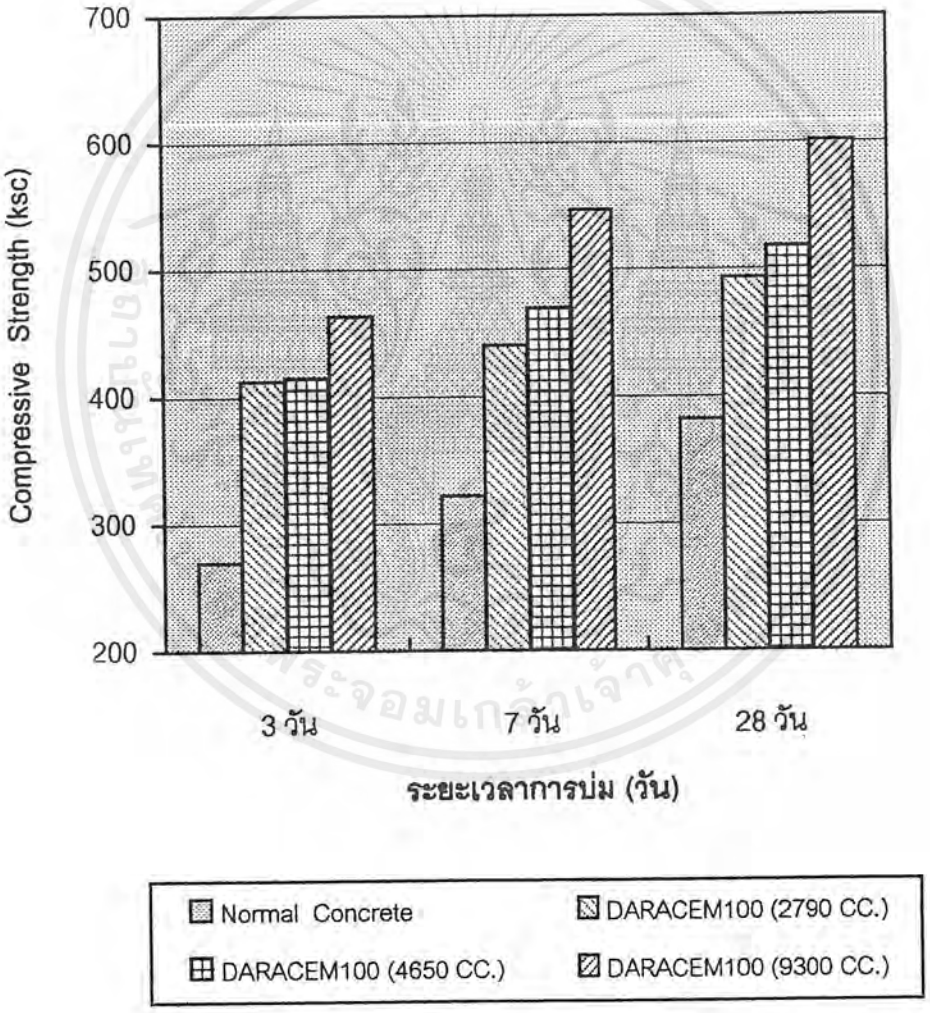
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.10 รูปแผนภูมิแท่งแสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



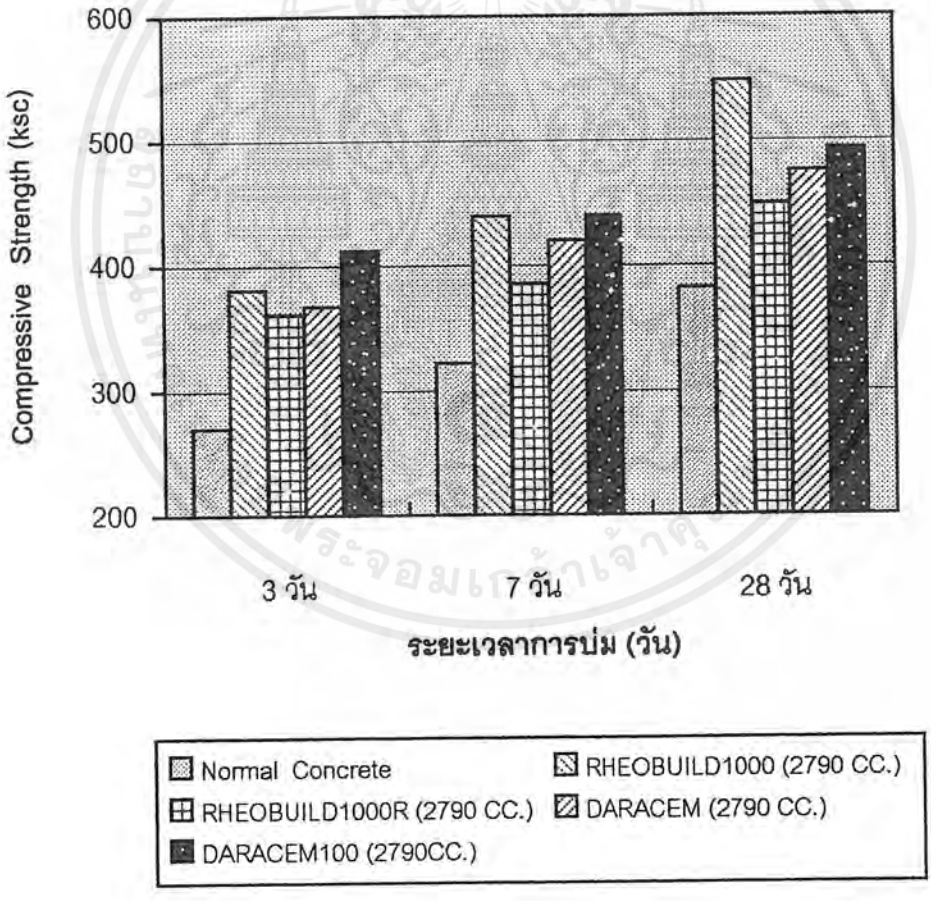
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.11 รูปแผนภูมิแท่งแสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM100 เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



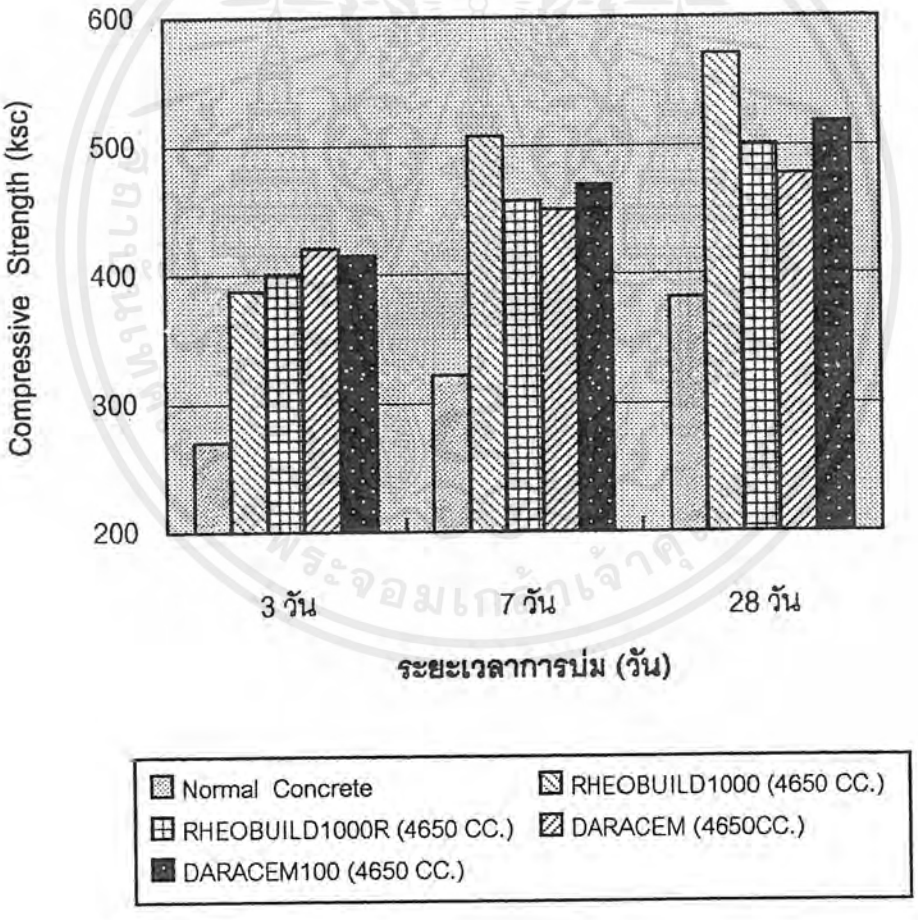
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.12 รูปแผนภูมิแท่งแสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่าง ๆในปริมาณ 2790 CC.



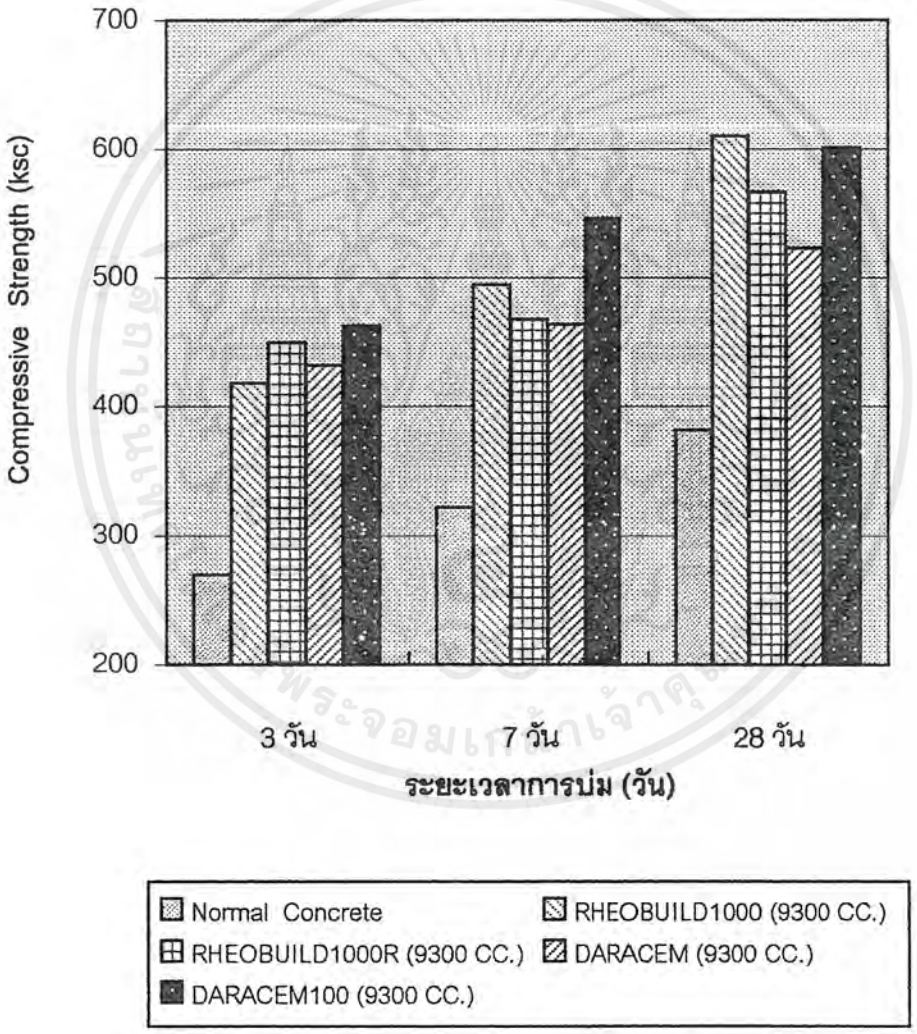
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.13 รูปแผนภูมิแท่งแสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่าง ๆในปริมาณ 4650 CC.



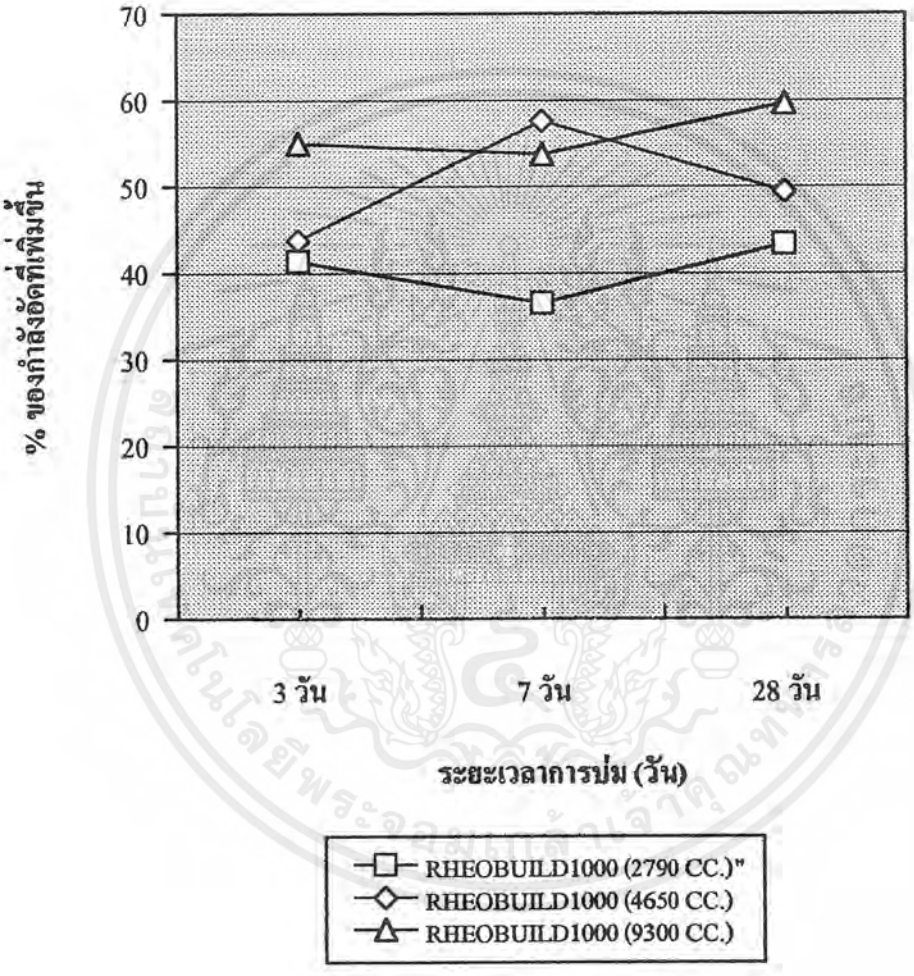
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.14 รูปแผนภูมิแท่งแสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ ชนิดต่าง ๆในปริมาณ 9300 CC.



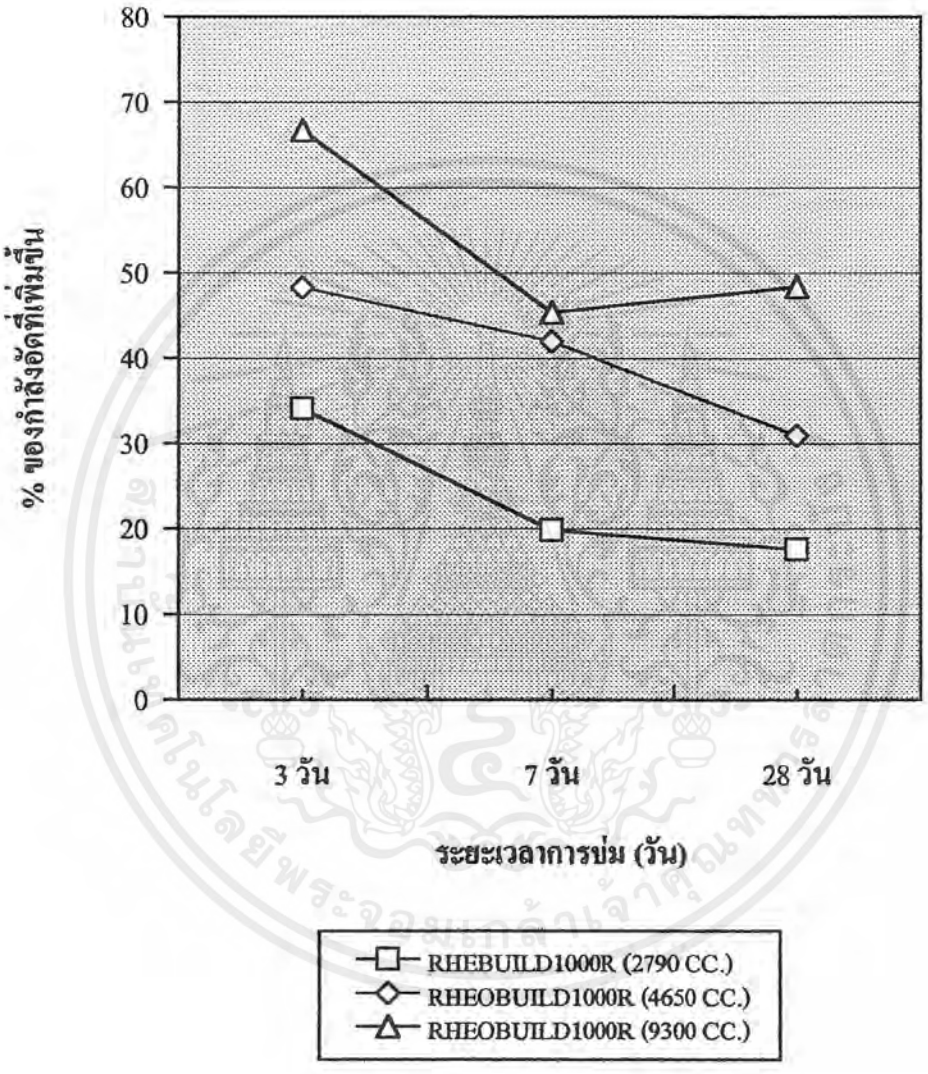
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.15 กราฟแสดงค่าเปอร์เซนต์กำลังที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่ผสมสาร RHEOBUILD1000 เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



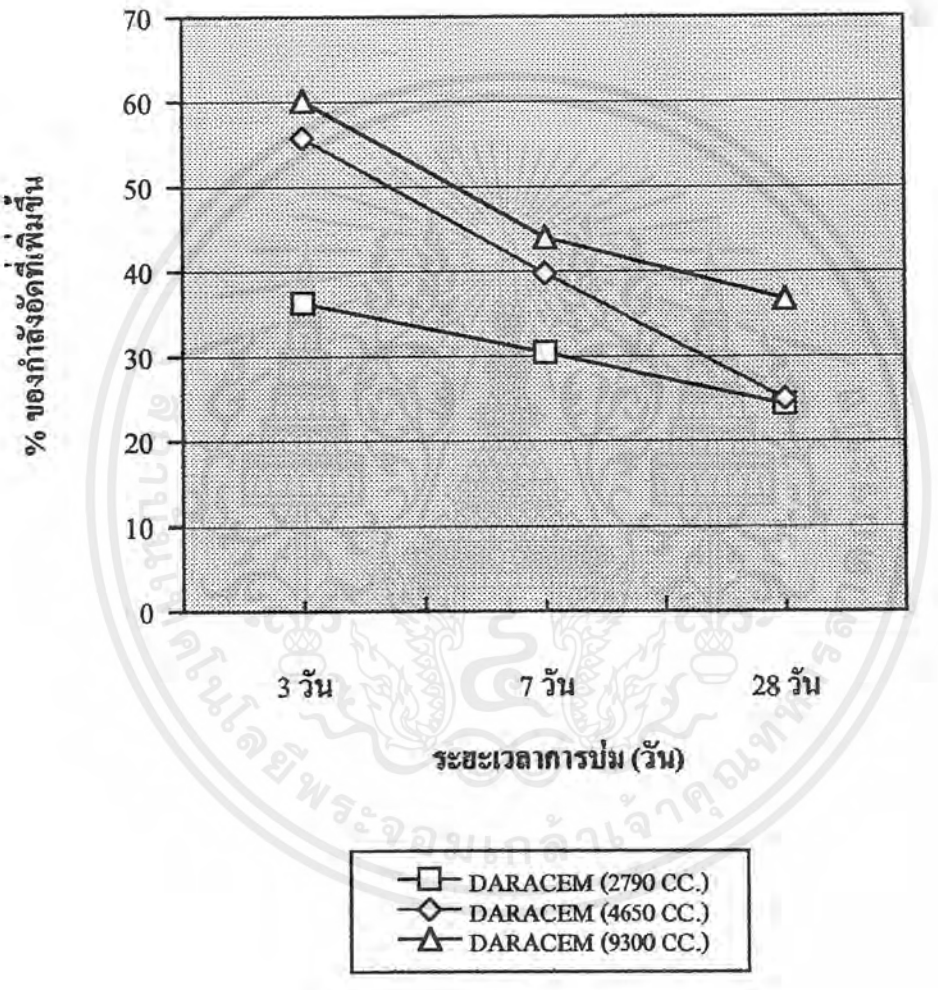
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.16 กราฟแสดงค่าเปอร์เซนต์กำลังที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่ผสมสาร RHEOBUILD1000R เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



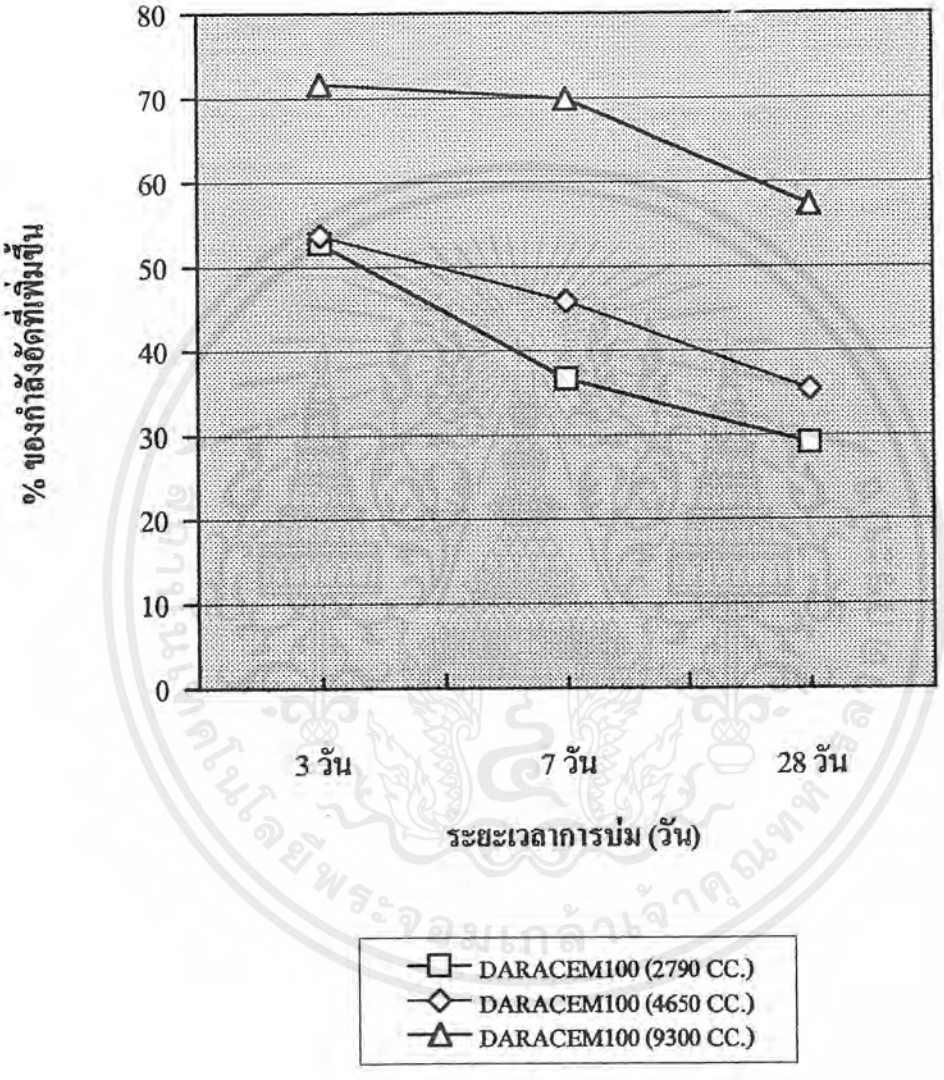
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.17 กราฟแสดงค่าเปอร์เซนต์กำลังที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่ผสมสาร DARACEM เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



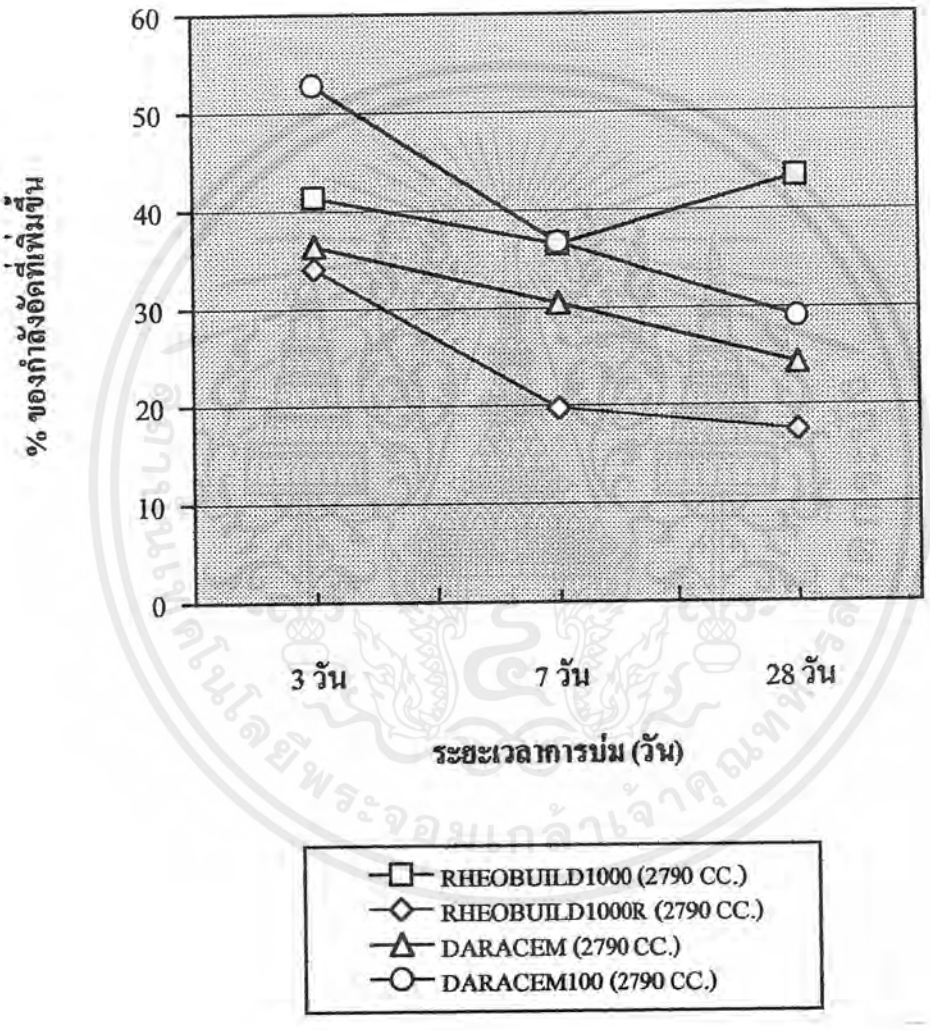
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.18 กราฟแสดงค่าเปอร์เซนต์กำลังที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่ผสมสาร DARACEM100 เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



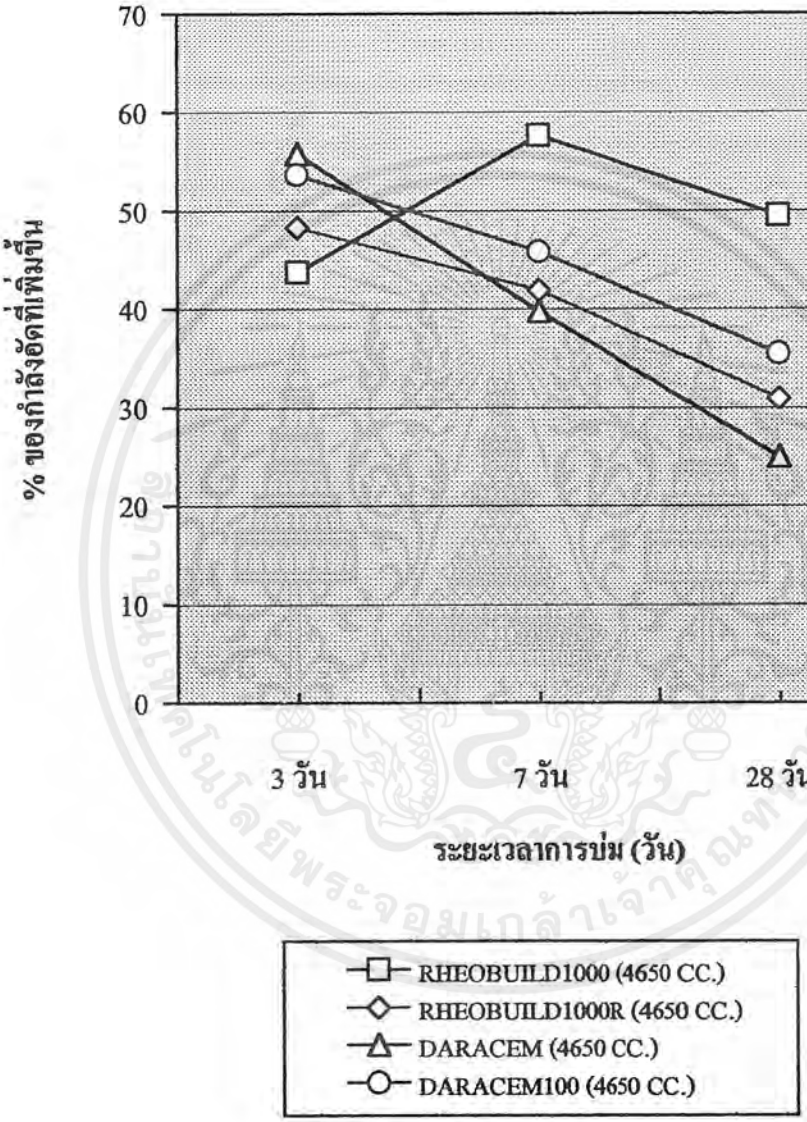
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.19 กราฟแสดงค่าเปอร์เซนต์กำลังที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ ในปริมาณ 2790 cc.เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



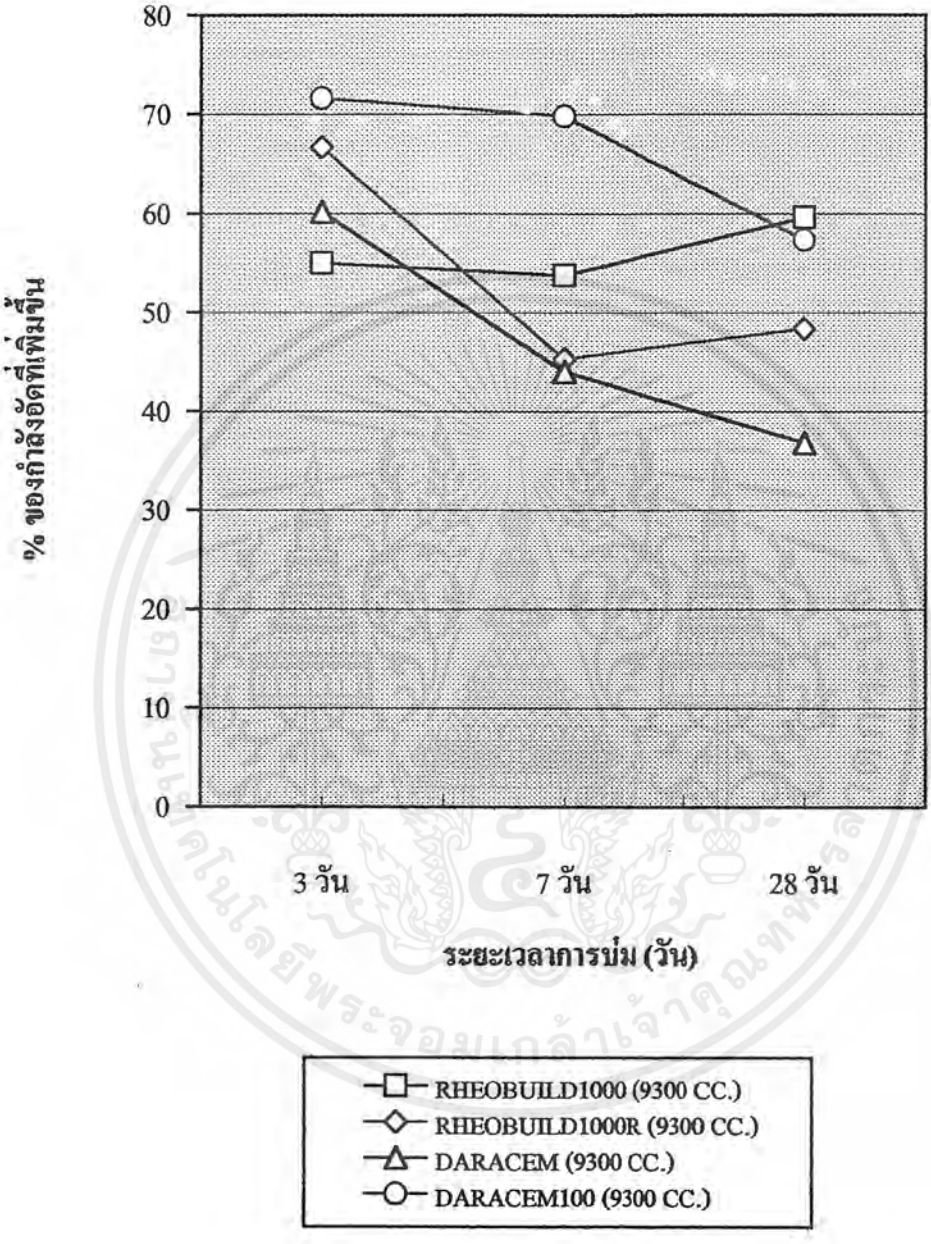
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.20 กราฟแสดงค่าเปอร์เซนต์กำลังที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ ในปริมาณ 4650 cc.เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



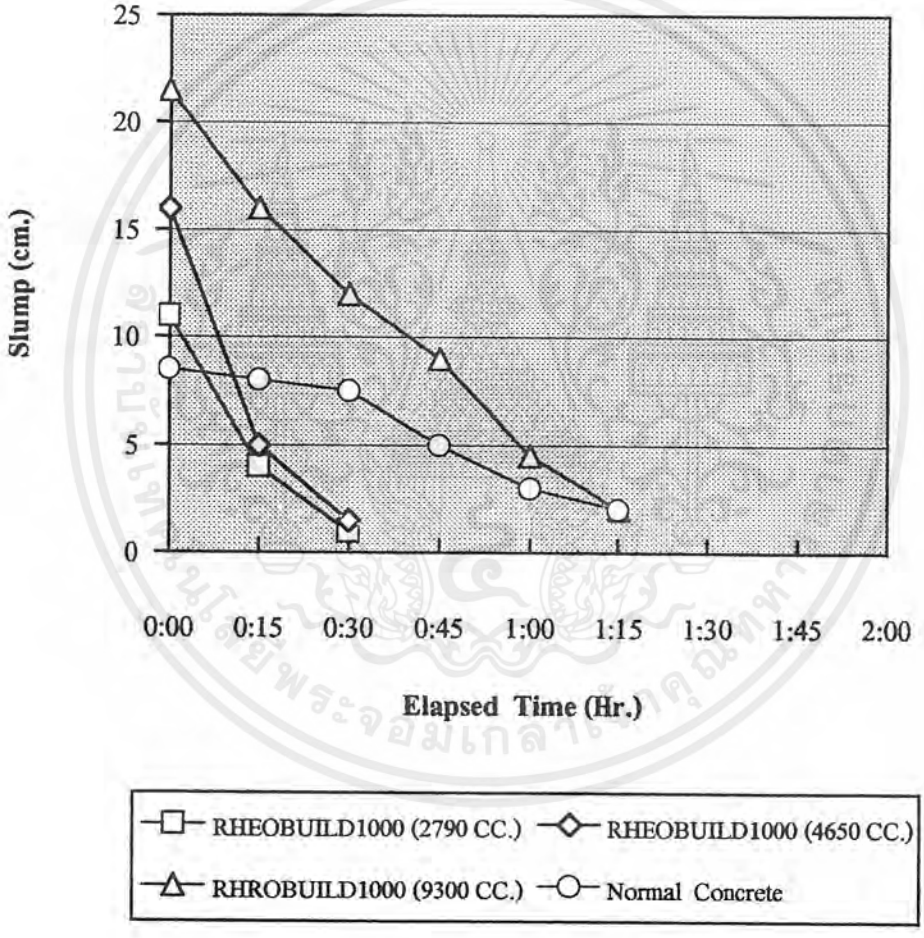
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.21 กราฟแสดงค่าเปอร์เซนต์กำลังที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ ในปริมาณ 9300 cc.เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



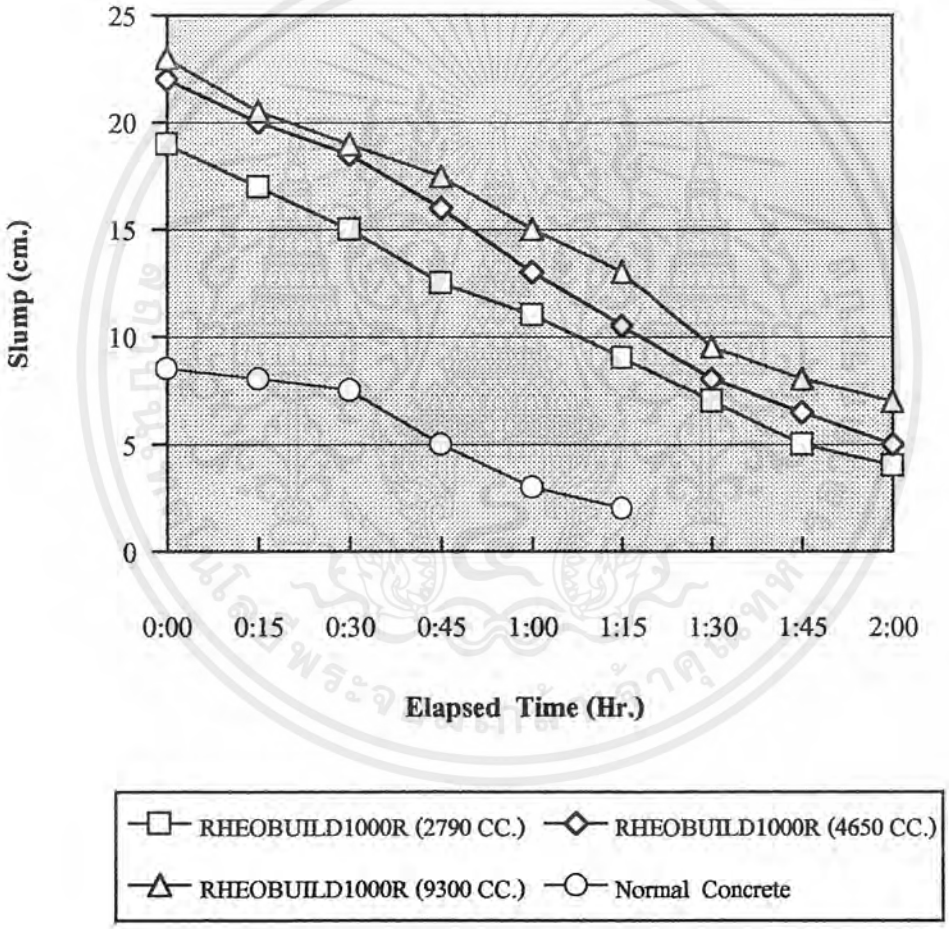
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.22 แสดงค่าสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000 เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



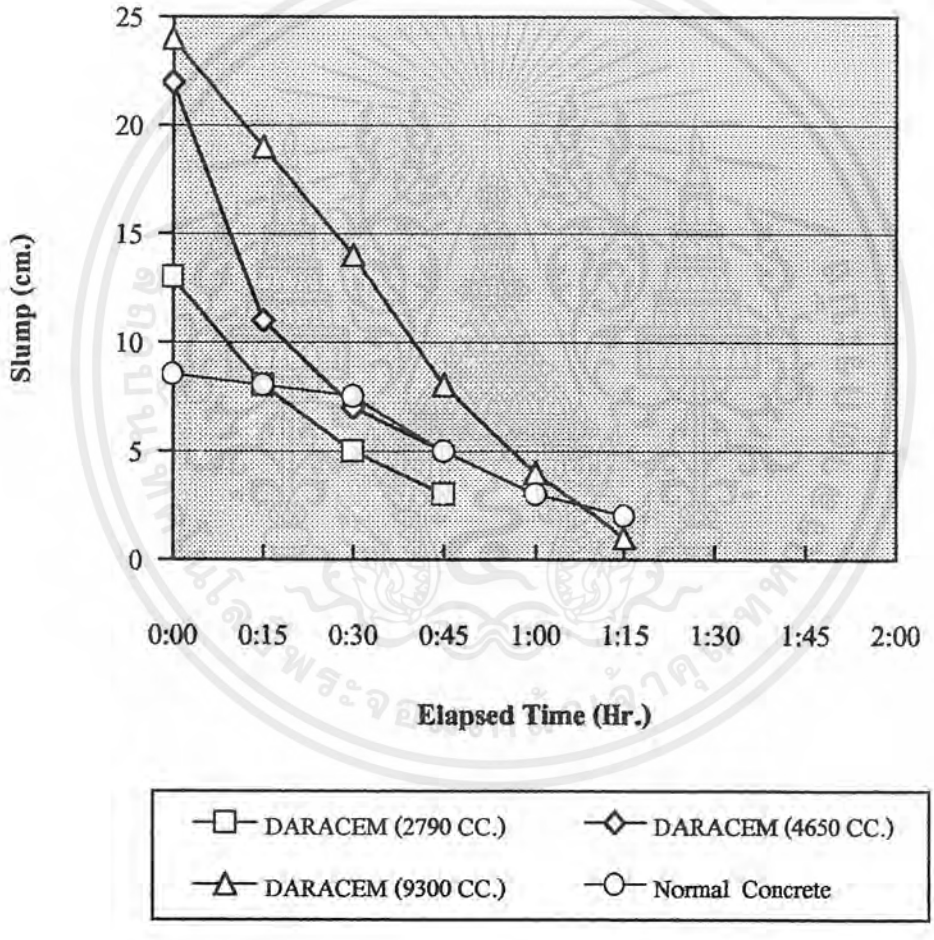
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.23 แสดงค่าสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000R เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



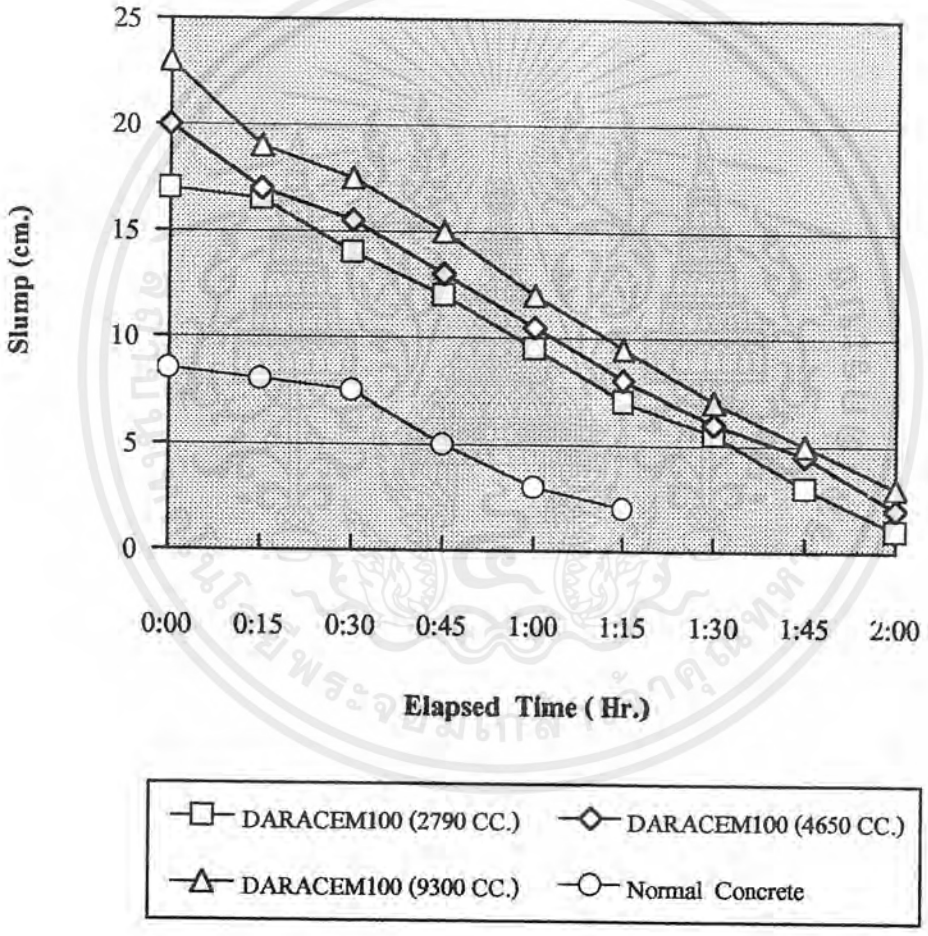
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.24 แสดงค่าสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



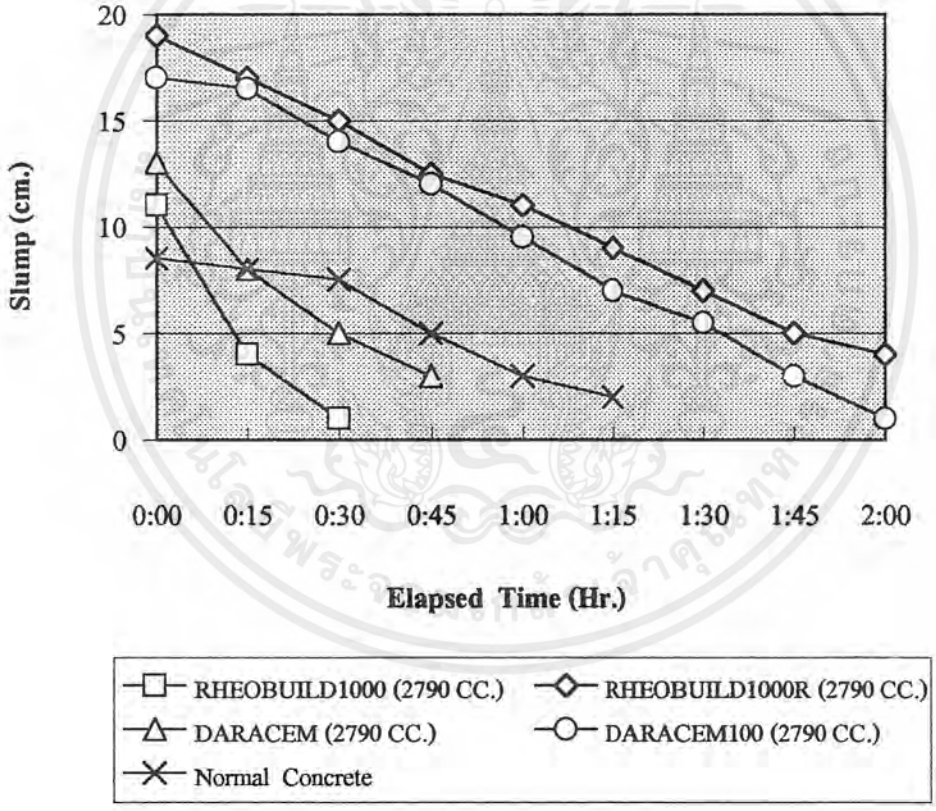
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.25 แสดงค่าสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM100 เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



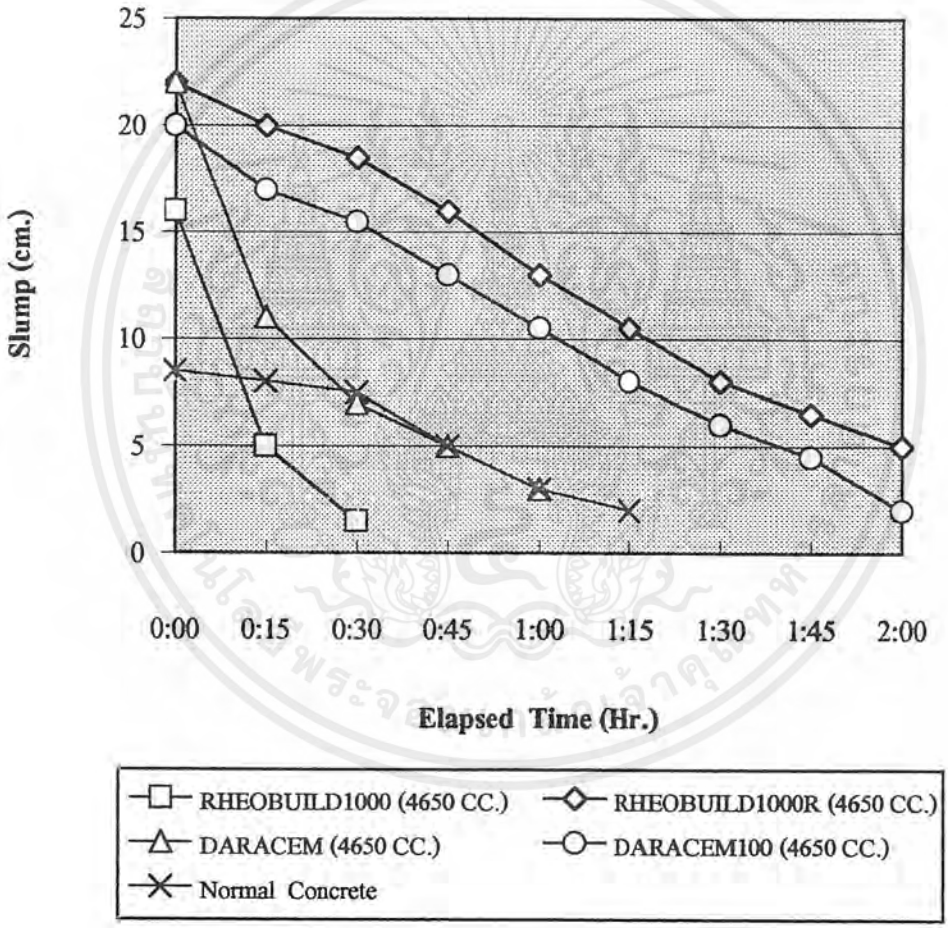
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.26 แสดงค่าสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ ในปริมาณ 2790 CC.



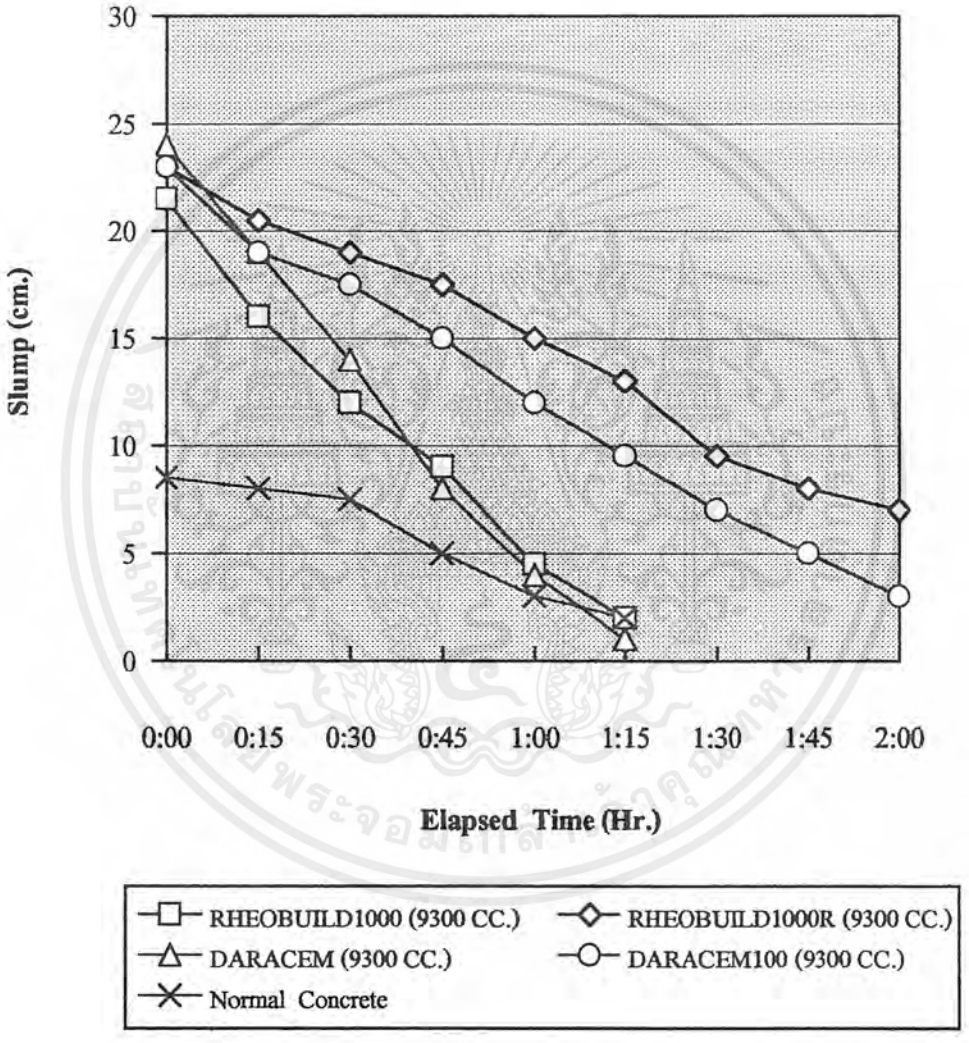
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.27 แสดงค่าสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ ในปริมาณ 4650 CC.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.28 แสดงค่าสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ ในปริมาณ 9300 CC.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบวิจัย

6.4.1. วิเคราะห์ผลด้านกำลังรับแรงอัด

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

รูปที่ 6.1 - 6.7 เป็นกราฟเชิงเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงอัดของแท่งคอนกรีตกับระยะเวลาการบ่มของคอนกรีตธรรมดาเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษแต่ละชนิด จากรูปจะพบว่ากำลังอัดที่อายุ 3,7 และ 28 วัน ของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษที่ปริมาณ 2790,4650,9300 cc. สูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตธรรมดา ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก

1. สารลดน้ำพิเศษ ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง กล่าวคือ W/C ของคอนกรีตธรรมดา เท่ากับ 0.43 ส่วน W/C ของคอนกรีตผสมสารลดน้ำพิเศษเท่ากับ 0.39 ซึ่งทำให้กำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาและการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้น (ที่ 3 วัน และ 7 วัน) ก็จะสูงกว่าด้วยเช่นกัน

2. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ จะช่วยให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของเม็ดปูนในส่วนผสม ซึ่งเป็นผลทำให้กำลังอัดสูงขึ้นด้วย

3. คอนกรีตที่ผสม RHEOBUILD1000 ที่ปริมาณ 9300 cc. จะให้ค่ากำลังอัดที่ 28 วันสูงสุด

พิจารณารูปที่ 6.1 - 6.4

จากรูปที่ 6.1 - 6.4 เป็นการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษแต่ละชนิดในปริมาณที่ต่างกันซึ่งจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันมีค่ามากขึ้นตามลำดับ

พิจารณารูปที่ 6.5 – 6.7

รูปที่ 6.5 - 6.7 เป็นการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆในแต่ละปริมาณ

จากรูปที่ 6.5 จะพบว่ากำลังอัดที่อายุ 3,7 และ 28 วันของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆในปริมาณ 2790 cc. สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยที่อายุ 3 วันคอนกรีตที่ผสม DARACEM100 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด , ที่อายุ 7 วันคอนกรีตที่ผสม DARACEM100 และ RHEOBUILD1000 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด และที่อายุ 28 วันคอนกรีตที่ผสม RHEOBUILD1000 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6.6 จะพบว่ากำลังอัดที่อายุ 3,7 และ 28 วันของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆในปริมาณ 4650 cc. สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยที่อายุ 3 วันคอนกรีตที่ผสม DARACEM ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด , ที่อายุ 7 วันคอนกรีตที่ผสม RHEOBUILD1000 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด และที่อายุ 28 วันคอนกรีตที่ผสม RHEOBUILD1000 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด

จากรูปที่ 6.7 จะพบว่ากำลังอัดที่อายุ 3,7 และ 28 วันของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆในปริมาณ 9300 cc. สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยที่อายุ 3 วันคอนกรีตที่ผสม DARACEM100 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด , ที่อายุ 7 วันคอนกรีตที่ผสม DARACEM100 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด และที่อายุ 28 วันคอนกรีตที่ผสม RHEOBUILD1000 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด

พิจารณารูปที่ 6.15- 6.21

จากกราฟเปอร์เซนต์กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาพบว่าที่ 3 วัน,7 วัน คอนกรีตที่ผสมสาร DARACEM 100 ให้การพัฒนากำลังสูงที่สุดและที่ 28 วัน คอนกรีตที่ผสมสาร RHEOBUILD1000 ให้การพัฒนากำลังดีที่สุด

6.4.2. วิเคราะห์ผลทางด้านความสามารถในการทำงาน (Workability)

เมื่อทำการพิจารณาผลการทดสอบ Slump Loss

จากรูปที่ 6.22 ซึ่งแสดงค่า Slump Loss ของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000 จะพบว่ามีค่าความยุบตัวเริ่มต้นสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาแต่เมื่อดูแนวโน้มของการสูญเสียค่าความยุบตัวพบว่าเกิดการสูญเสียความยุบตัวเร็วมากคือภายใน 30 นาที แสดงว่าคอนกรีตที่ผสม RHEOBUILD1000 สามารถทำงานได้ดีในช่วงระยะเวลาสั้น

จากรูปที่ 6.23 ซึ่งแสดงค่า Slump Loss ของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000R พบว่ามีค่าความยุบตัวเริ่มต้นสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาและเมื่อดูแนวโน้มของการสูญเสียค่าความยุบตัวพบว่าเกิดการสูญเสียความยุบตัวช้ากว่าคอนกรีตธรรมดา แสดงว่าคอนกรีตที่ผสม RHEOBUILD1000R ช่วยให้คอนกรีตสดมีความสามารถในการเทได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาและเมื่อเปรียบเทียบกับ RHEOBUILD1000 พบว่าที่ปริมาณการผสมเท่ากัน พบว่า สาร RHEOBUILD1000R จะช่วยยืดระยะเวลาการก่อตัวและช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ดีกว่า

จากรูปที่ 6.24 ซึ่งแสดงค่า Slump Loss ของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM พบว่ามีค่าความยุบตัวเริ่มต้นสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาแต่เมื่อดูแนวโน้มของการสูญเสียค่าความยุบตัวพบว่าเกิดการสูญเสียความยุบตัวใกล้เคียงกับคอนกรีตธรรมดา แสดงว่าคอนกรีตที่ผสม DARACEM ช่วยให้คอนกรีตสดมีความสามารถในการเทได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาในช่วงต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6.25 ซึ่งแสดงค่า Slump Loss ของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM100 พบว่ามีค่าความยุบตัวเริ่มต้นสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาและเมื่อดูแนวโน้มของการสูญเสียค่าความยุบตัวพบว่าเกิดการสูญเสียความยุบตัวเกิดขึ้นเร็วกว่าคอนกรีตธรรมดา แสดงว่าคอนกรีตที่ผสม DARACEM100 ช่วยให้คอนกรีตสดมีความสามารถในการเทได้ดีในช่วงเวลาที่นานและเมื่อเปรียบเทียบกับ สาร DARACEM พบว่า สาร DARACEM100 จะช่วยยืดระยะเวลาการก่อตัวและช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ดีกว่า

6.4.3. การวิเคราะห์ข้อบกพร่องเนื่องจากการทดสอบ

ด้านคุณภาพกำลังของคอนกรีต

กำลังของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบอาจมีความคลาดเคลื่อนไปบ้างซึ่งเกิดขึ้นระหว่างทำการผสมคอนกรีต เนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมแต่ละครั้งจะต้องเพิ่มปริมาณน้ำส่วนหนึ่งเข้าไปสำหรับการดูดซึมน้ำของวัสดุผสมและค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุผสมที่ใช้คำนวณปริมาณน้ำในการผสมแต่ละครั้งเป็นค่าโดยเฉลี่ยซึ่งอาจส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตได้เพราะปริมาณน้ำที่เผื่อเข้าไปอาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่าความต้องการจริง

ด้านความยุบตัวของคอนกรีต

ค่าความยุบตัวและการสูญเสียความยุบตัวที่ได้จากการทดสอบอาจเกิดข้อผิดพลาดขึ้นซึ่งมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันในการทดสอบแต่ละครั้ง อุณหภูมิที่สูงมากๆจะทำให้น้ำในคอนกรีตสดระเหยอย่างรวดเร็วส่งผลให้คอนกรีตเกิดการสูญเสียค่าความยุบตัวที่เร็วขึ้นได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความถูกต้องที่สุดควรทดสอบในช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
สรุปผลการทดสอบวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1. สรุปผลการทดสอบวิจัย

จากผลการทดสอบสมารถสรุปได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ทำการลดปริมาณน้ำในส่วนผสมลงและเติมสารลดน้ำพิเศษเข้าไปในส่วนผสมจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาและ กำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นจะมีความแปรผันโดยตรงกับปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้ในการผสม

2. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดธรรมดาอันได้แก่ RHEOBUILD1000 จะพัฒนากำลังในช่วงต้นสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดยืดเวลาการก่อตัว คือ RHEOBUILD1000R แต่สารลดน้ำพิเศษ DARACEM100 มีคุณสมบัติพิเศษกล่าวคือ สามารถยืดระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตให้ยาวนานออกไปอีกทั้งสามารถพัฒนากำลังในช่วงต้นได้ดีกว่าสาร DARACEM ซึ่งเป็นสารลดน้ำพิเศษชนิดธรรมดา

3. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดธรรมดาจะให้กำลังรับแรงอัดที่ 28 วันสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดยืดเวลาการก่อตัว กล่าวคือ คอนกรีตที่ผสมสาร RHEOBUILD1000 ที่ปริมาณ 9300 cc. มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 609.71 ksc ส่วนคอนกรีตที่ผสมสาร DARACEM100 ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษให้กำลังรับแรงอัดรองลงมาคือสามารถรับกำลังได้สูงถึง 601.02 ksc

4. จากผลการทดสอบวิจัย คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษมีค่าความยุบตัวเริ่มต้นในช่วง 13- 24 ซม. ซึ่งมากกว่าคอนกรีตธรรมดาที่มีค่าความยุบตัวเพียง 8.5 ซม.เท่านั้นและค่าความยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ผสมในส่วนผสมของคอนกรีต

5. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดธรรมดาจะมีการสูญเสียค่าความยุบตัวในเวลาที่รวดเร็วถึงแม้จะให้ค่ายุบตัวเริ่มต้นที่สูงกว่าคอนกรีตธรรมดาก็ตามดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดธรรมดามีความเหมาะสมกับการทำงานคอนกรีตที่ใช้เวลาในการเทไม่นานนัก

6. คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดยืดเวลาการก่อตัวจะเกิดการสูญเสียค่าความยุบตัวในเวลาที่ช้ากว่าคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดธรรมดาจึงเหมาะสมที่จะใช้ในงานที่ต้องการเวลามากๆหรืองานที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2. ข้อเสนอแนะ

1.ในการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้านอื่นๆนอกเหนือจากคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดด้วย เช่น การรับแรงดึง, การหดตัวของคอนกรีต, การแตกร้าว เป็นต้น

2.ในการทดสอบวิจัยนี้เป็นเพียงตัวอย่างการทดลองที่ใช้ส่วนผสมของน้ำที่ 180 กก./คอนกรีต 1 ลบ.เมตร สำหรับคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการทำการวิจัยซึ่งจะทำงานได้ง่าย ดังนั้นจึงควรที่จะมีการปรับปริมาณน้ำที่เหมาะสมในกรณีต่างๆต่อไป

3.การผสมคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณที่สูงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเกี่ยวกับปัญหาการแยกตัวของวัสดุผสมดังนั้นควรใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณที่พอเหมาะซึ่งในการทดสอบวิจัยครั้งนี้พบว่า ปริมาณที่เหมาะสมคือ 4650 cc. ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (1000 cc./ซีเมนต์ 100 กก.) ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่ทำให้เกิดการแยกตัวของวัสดุผสมและกำลังรับแรงอัดที่ได้ก็อยู่ในเกณฑ์ที่สูงพอสมควร

4.อุณหภูมิที่ต่างกันมีผลต่อการสูญเสียค่าความยุบตัวของคอนกรีตดังนั้นจึงต้องระมัดระวังการทำงานในสภาวะที่อุณหภูมิสูงๆเพราะสารลดน้ำพิเศษบางชนิดเกิดการสูญเสียค่าความยุบตัวเร็วมากจนใช้งานไม่ได้เลย

5.เนื่องจากราคาของสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆในท้องตลาดไม่แตกต่างกันมากนักโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 28-29 บาท/ลิตร ดังนั้นราคาของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษแต่ละชนิดจึงมีค่าใกล้เคียงกัน การเลือกใช้จึงควรเลือกใช้สารลดน้ำพิเศษที่ให้กำลังของคอนกรีตสูงและทำงานได้ง่ายซึ่งในการทดสอบวิจัยครั้งนี้พบว่าคอนกรีตที่ผสมสาร DARACEM100 ที่ปริมาณ 4650 cc.ต่อคอนกรีต1 ลูกบาศก์เมตร (1000 cc. / ซีเมนต์ 100 กก.) มีความเหมาะสมที่สุดทั้งในด้านของราคาและคุณสมบัติการรับกำลังอัด แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับสภาพงานด้วย หากเป็นงานที่ต้องการความรวดเร็ว คอนกรีตที่ผสมสาร RHEOBUILD1000 อาจจะเหมาะสมกว่า

7.3 ข้อเสนอแนะสำหรับผู้ประกอบการ

จากผลการทดสอบด้านกำลังของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆพบว่ามีกำลังอัดที่ 28 วันสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาถึง 40 –60 % ซึ่งค่ากำลังที่ได้นี้ในทางปฏิบัติอาจจะสูงกว่าความต้องการ ดังนั้นหากเราต้องการที่จะลดค่าใช้จ่ายของส่วนผสมคอนกรีตลง เราสามารถเลือกใช้คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษได้ โดยทำการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงและเพิ่มสารลดปริมาณน้ำพิเศษเข้าไปทั้งนี้รายละเอียดของการคำนวณส่วนผสมได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 และรายละเอียดด้านราคากล่าวไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

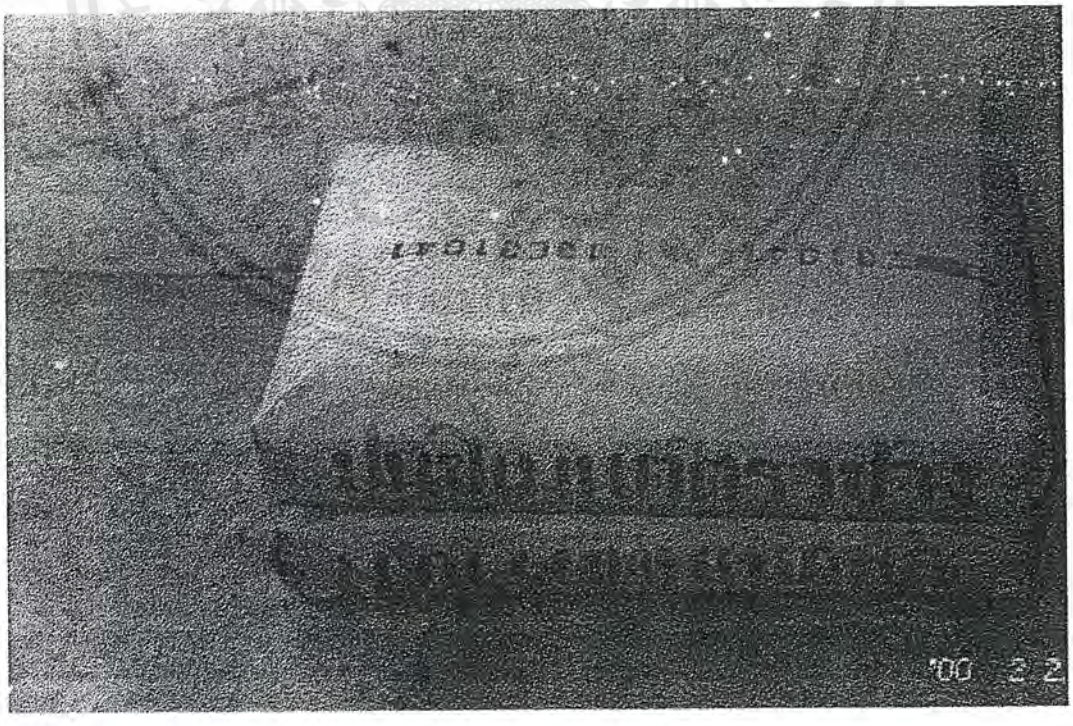
ในภาคผนวก ข ซึ่งจากการเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษกับคอนกรีตธรรมดา ที่กำลังอัดเท่ากันพบว่าหากเราเลือกใช้คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษจะเป็นการประหยัดกว่า แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในการผสมด้วยดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าการใช้สารลดน้ำพิเศษจำนวนมากจะทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัวได้ โดยรวมแล้วจึงสามารถสรุปได้ว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำสารลดน้ำพิเศษมาใช้ในงานคอนกรีตเพื่อทำให้เกิดการประหยัดค่าใช้จ่าย และต้องมีการศึกษาต่อไปถึงคุณสมบัติด้านอื่น ๆ เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปประกอบคำบรรยาย

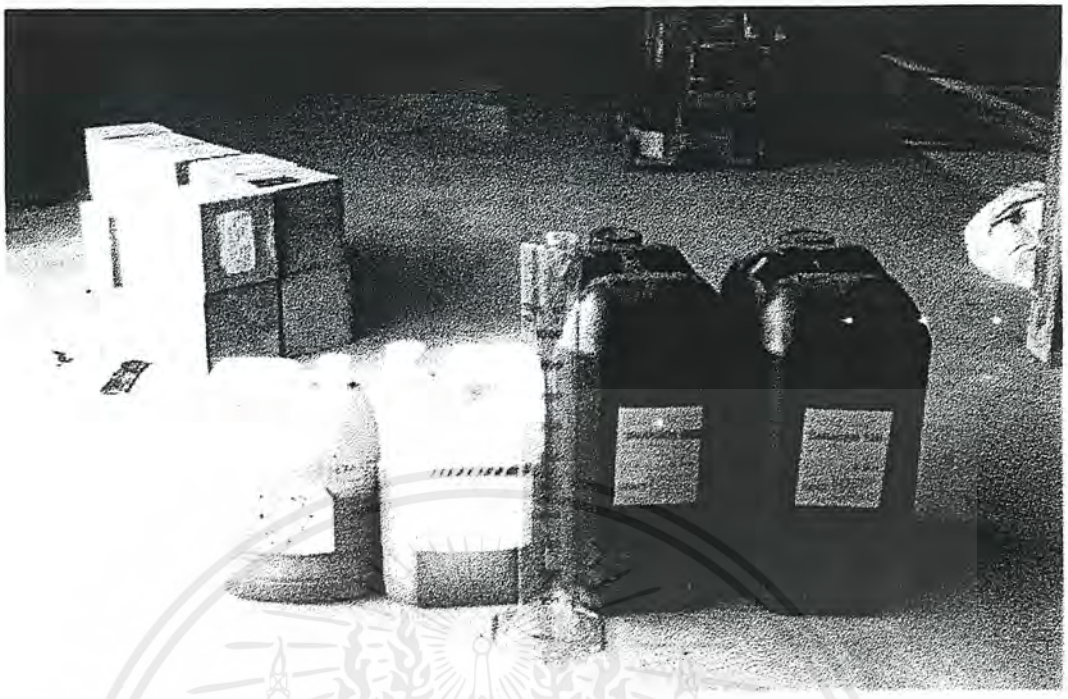
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1 หินเบอร์ 1 และทรายหยาบที่ใช้ในการทดสอบวิจัย

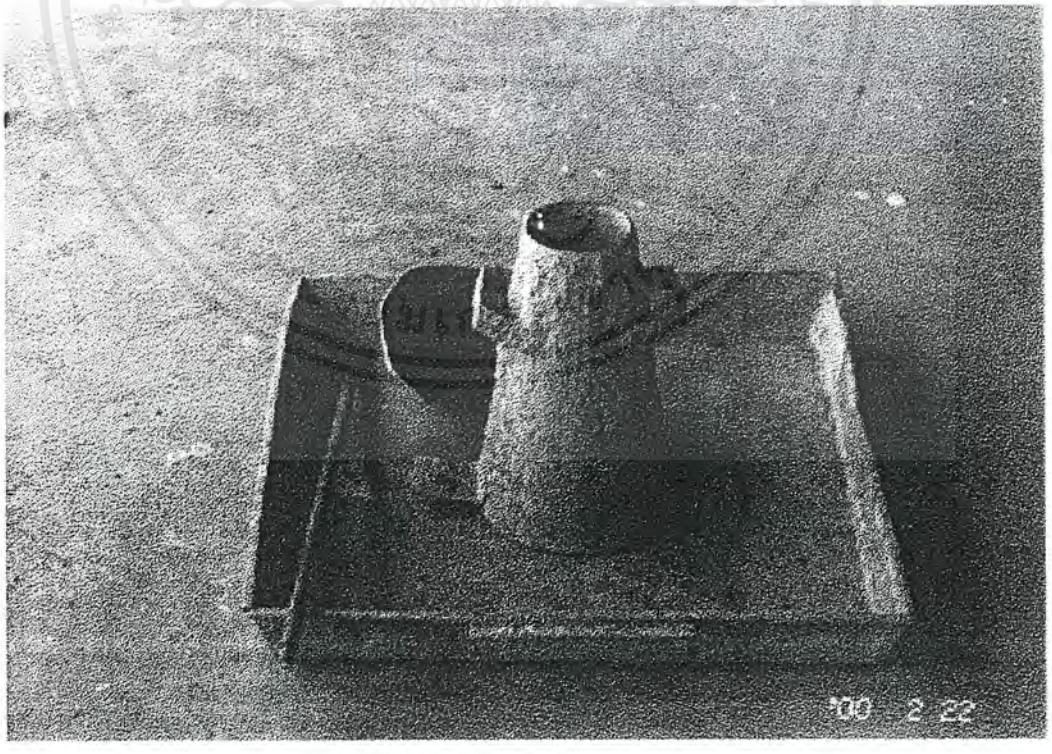


รูปที่ 2 ปูนซีเมนต์ตราช้าง type 1 ที่ใช้ในการทดสอบวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

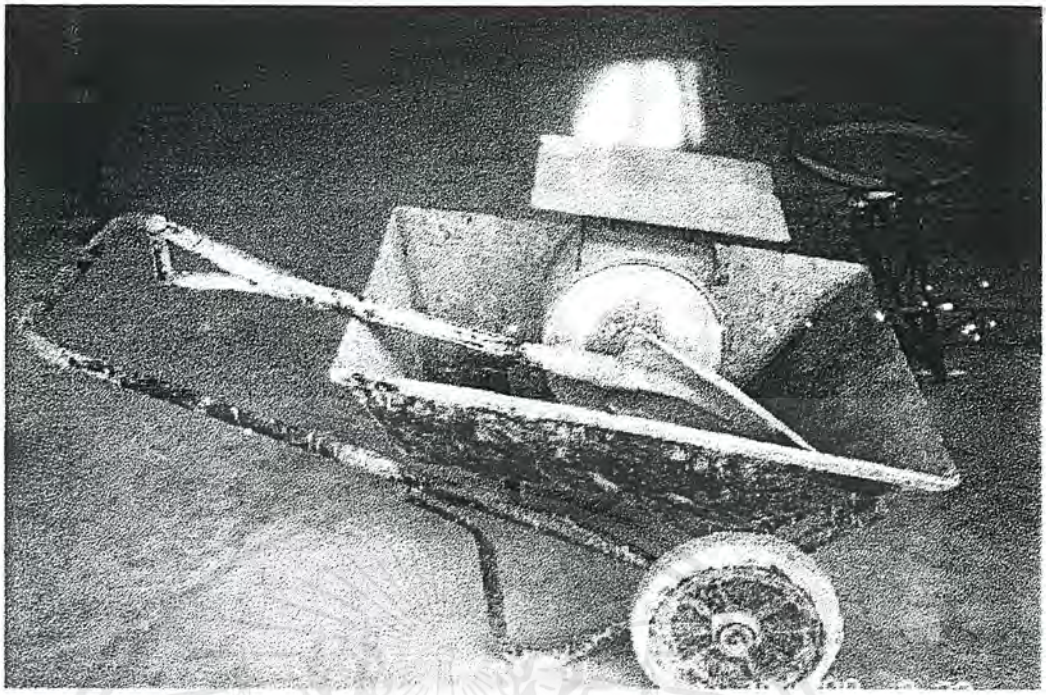


รูปที่ 3 สารลดน้ำพิเศษที่ใช้ในการทดสอบวิจัย



รูปที่4 ชุดทดสอบค่าความยุบตัว

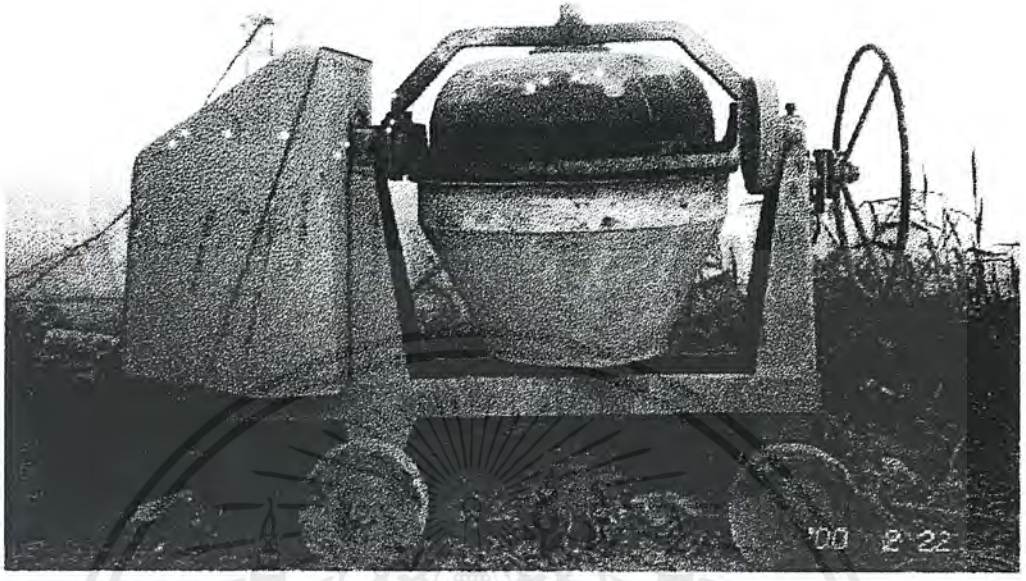
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 อุปกรณ์ในการเตรียมวัสดุ

รูปที่ 6 ชุดทดสอบ แบบหล่อตัวอย่างทดสอบ

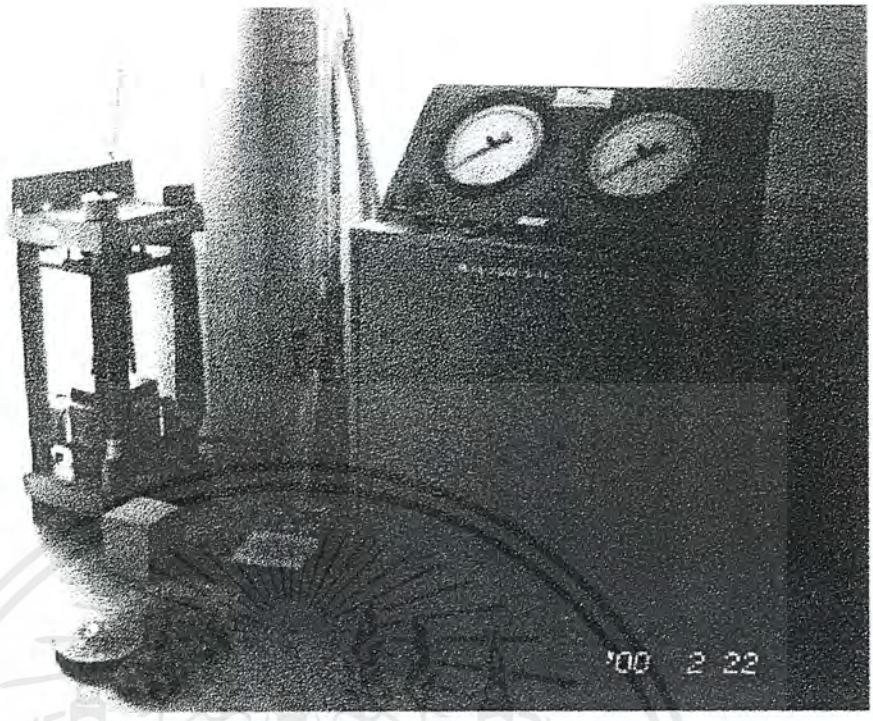
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



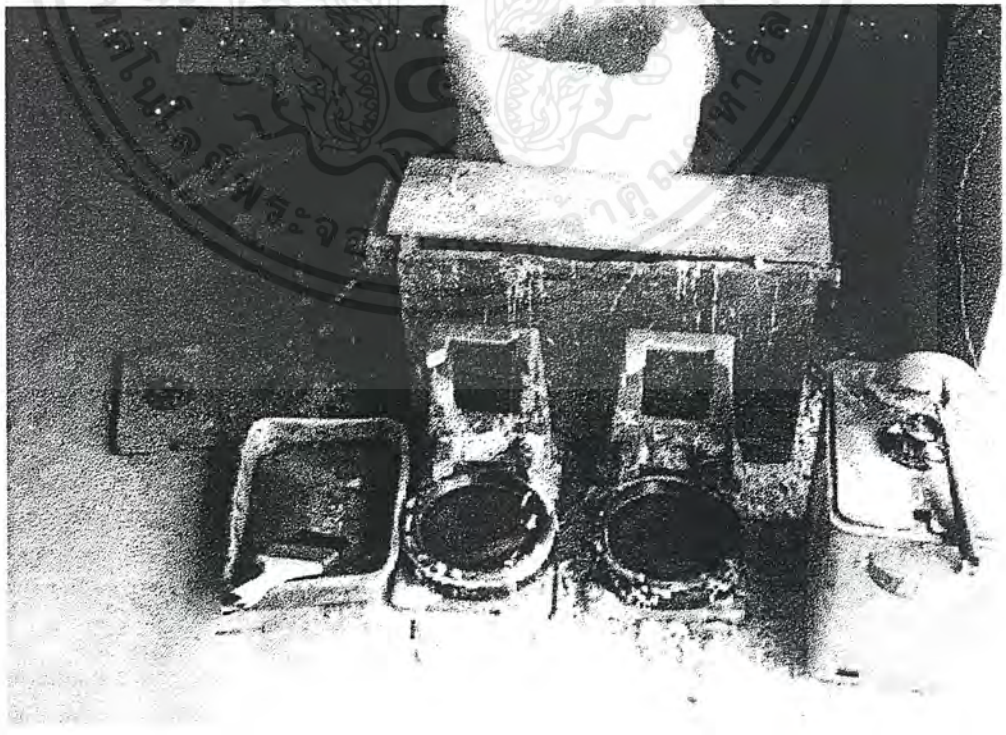
รูปที่ 7 ไม้ลูกข่างที่ใช้ในการทดสอบ

รูปที่ 8 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



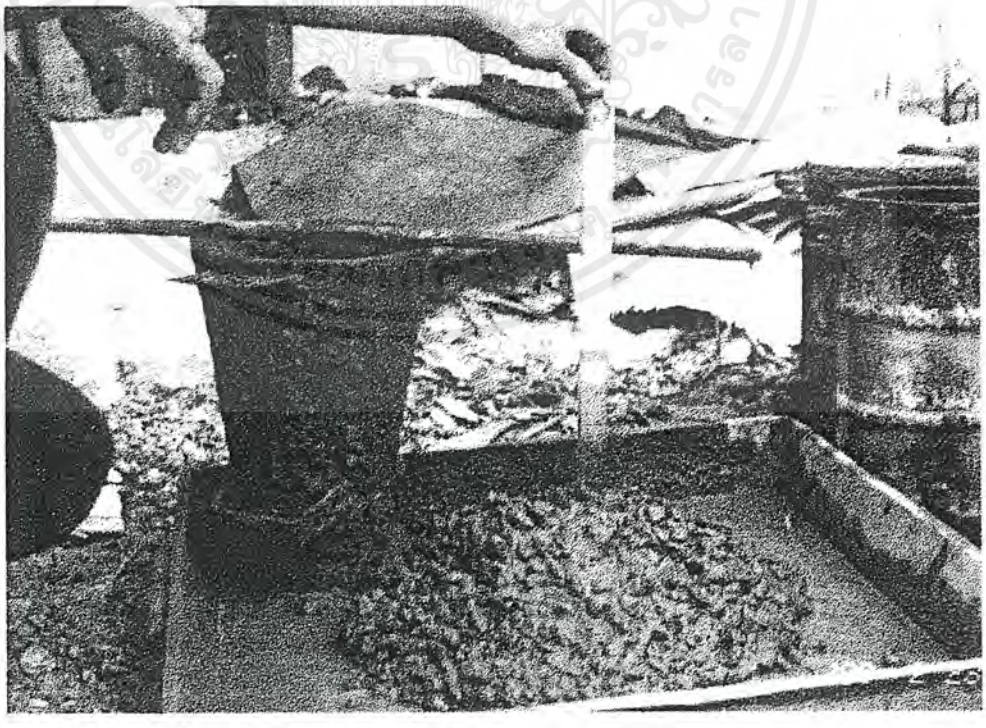
รูปที่ 10 อุปกรณ์การ Capped หัวแท่งคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 11 แบบหล่อแท่งคอนกรีตที่ประกอบเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 12 การเทคอนกรีตลงชุดทดสอบหาความขุบตัว



รูปที่ 13 การทดสอบหาค่าความขุบตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 14 การกระทุ้งคอนกรีตที่ใส่ลงในแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 15 การปรับแต่งผิวหน้าแบบทดสอบให้เรียบร้อย

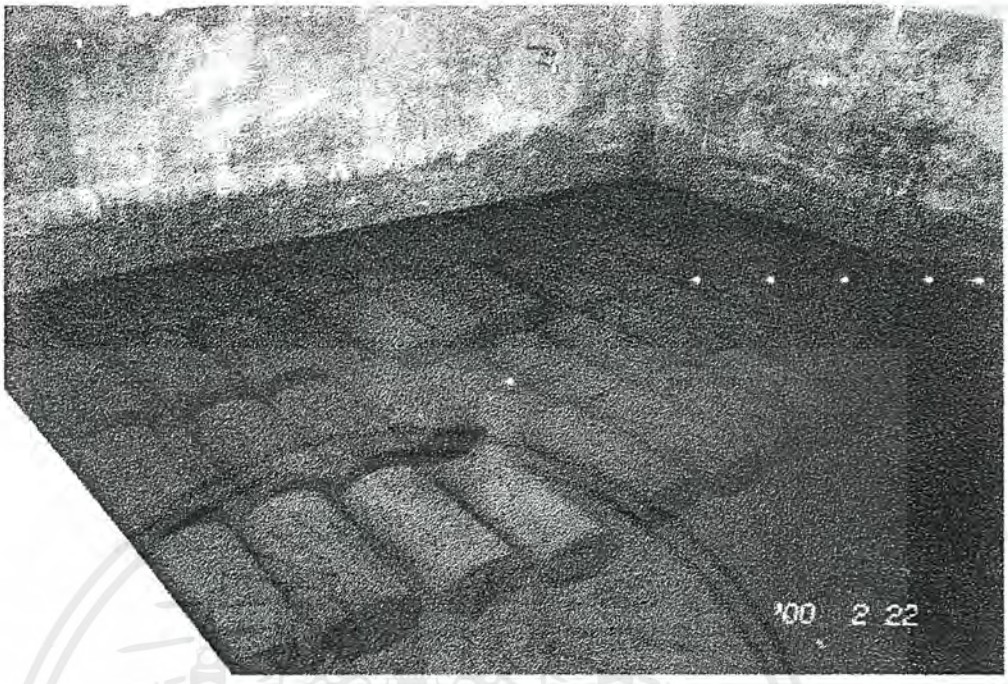
รูปที่ 16 แบบตัวอย่างทดสอบที่ทำการแต่งผิวหน้าเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

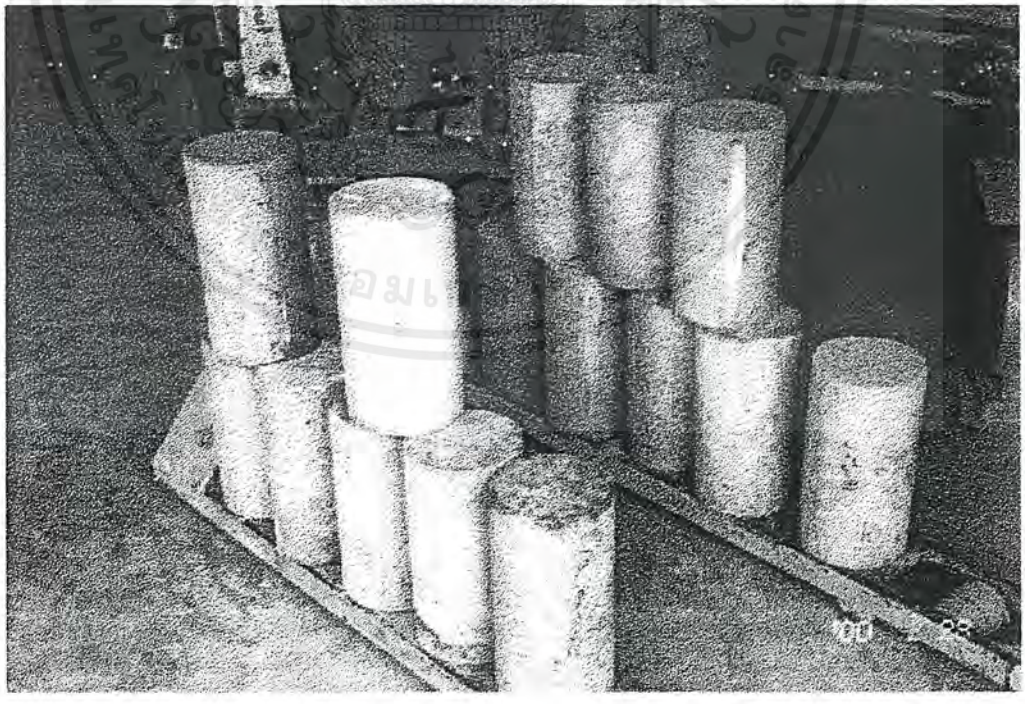
รูปที่ 17 การถอดแบบแท่งตัวอย่างทดสอบ

รูปที่ 18 แท่งตัวอย่างทดสอบที่แกะออกจากแบบหล่อเตรียมนำไปบ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



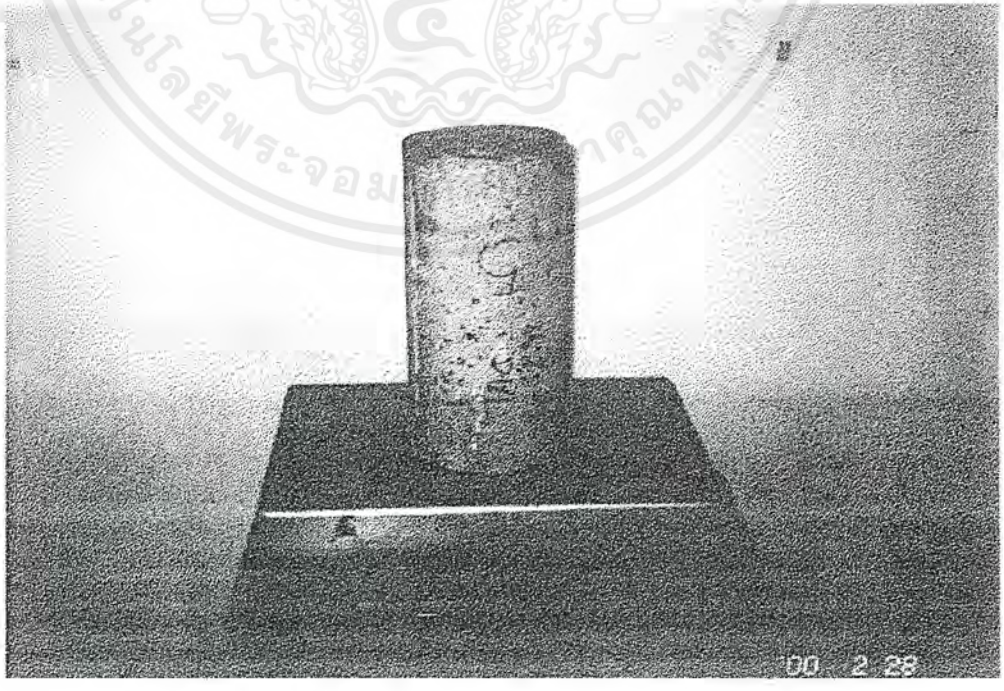
รูปที่ 19 การนำแท่งตัวอย่างทดสอบลงบ่มในบ่อบ่มคอนกรีต



รูปที่ 20 แท่งตัวอย่างทดสอบที่ทำการบ่มจนได้ระยะเวลาการบ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 21 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 22 การชั่งน้ำหนักของแท่งตัวอย่างทดสอบภายหลังการบ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

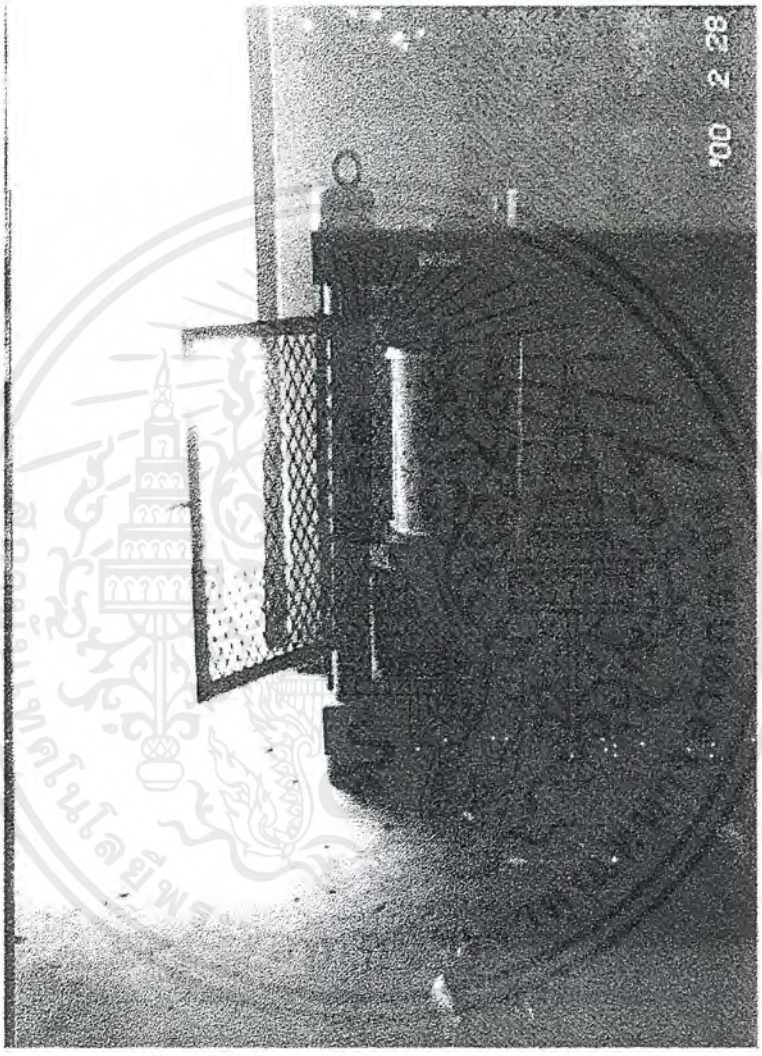
รูปที่ 23 การวัดความสูงของแท่งตัวอย่างทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 24 การ Capped หัวของแท่งตัวอย่างทดสอบ

รูปที่ 25 แท่งทดสอบที่ทำการ Capped หัวเรียบร้อยพร้อมที่จะนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 26 การทดสอบกำลังอัดของแท่งตัวอย่างทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 27 แท่งตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการทดสอบกำลังการรับแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ก.1

Compressive Strength

ชนิดของสารลดน้ำพิเศษ : *RHEOBUILD 1000*

ปริมาณ *2790* cc. / คอนกรีต 1 ลบ.เมตร

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนบ่ม (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังบ่ม (g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm^2)	กำลังประลัย (kg.)	ความเค้นประลัย (ksc)	Averae (ksc)
1	3	12909	13042	1.03		30.0	14.927	174.88	65000	371.68	
2	3	12891	13022	1.02		30.1	14.949	175.19	64000	365.32	
3	3	12873	12998	0.97	1.01	30.1	14.931	175.47	71000	404.63	381.22
4	3	12814	12945	1.02		30.2	14.949	174.98	65000	371.5	
5	3	12926	13059	1.03		30.0	14.938	175.59	69000	392.97	
1	7	12754	12901	1.15		30.0	14.905	174.69	82000	469.39	
2	7	12854	13001	1.14		30.1	14.915	175.12	84500	482.54	
3	7	12875	13015	1.09	1.13	30.1	14.958	175.49	79000	450.16	439.23
4	7	12895	13042	1.14		30.0	14.906	174.76	77000	440.59	
5	7	12502	12642	1.12		30.0	14.948	175.40	62000	353.48	
1	28	12833	13029	1.53		30.1	14.901	174.46	89000	510.15	
2	28	12835	13019	1.43		30.2	14.958	175.80	94000	534.71	
3	28	12861	13047	1.45	1.44	30.2	14.869	173.71	94000	541.13	547.69
4	28	12892	13067	1.36		30.1	14.908	174.61	107000	612.79	
5	28	12885	13067	1.41		30.0	14.968	176.03	95000	539.67	

ตารางผนวก ก.2

Compressive Strength

ชนิดของสารลดน้ำพิเศษ : *RHEOBUILD 1000*

ปริมาณ *4650* cc. / คอนกรีต 1 ลบ.เมตร

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนบ่ม (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังบ่ม (g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm^2)	กำลังประลัย (kg.)	ความเค้นประลัย (ksc)	Averae (ksc)
1	3	12907	13041	1.04		30.0	14.919	174.88	77600	443.73	
2	3	12880	13013	1.03		30.0	14.932	175.19	68200	389.30	
3	3	12929	13060	1.01	1.03	30.0	14.944	175.47	65800	375.00	387.71
4	3	12921	13053	1.02		30.1	14.923	174.98	76200	435.5	
5	3	12935	13070	1.04		30.0	14.949	175.59	51800	295.01	
1	7	12903	13048	1.12		30.2	14.911	174.69	93000	532.36	
2	7	12901	13047	1.13		30.2	14.929	175.12	88000	502.52	
3	7	12932	13076	1.11	1.12	30.0	14.945	175.49	88400	503.73	507.05
4	7	12914.4	13059	1.12		30.0	14.914	174.76	86000	492.09	
5	7	12945.7	13092	1.13		30.1	14.941	175.40	88500	504.57	
1	28	13121	13317	1.49		30.2	14.929	175.12	95000	542.50	
2	28	12836	13021	1.44		30.1	14.935	175.26	110000	627.7	
3	28	12876	13060	1.43	1.43	30.0	14.949	175.59	110000	626.48	571.02
4	28	12850	13029	1.39		30.1	14.915	174.79	87000	497.75	
5	28	12892	13075	1.42		30.0	14.914	174.76	98000	560.75	

ตารางผนวก ก.3

Compressive Strength

ชนิดของสารลดน้ำพิเศษ : *RHEOBUILD 1000*

ปริมาณ *9300* cc. / คอนกรีต 1 ลบ.เมตร

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนบ่ม (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังบ่ม (g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm^2)	กำลังประลัย (kg.)	ความเค้นประลัย (ksc)	Averae (ksc)
1	3	13188.8	13326	1.04		30.2	14.930	175.14	81000	462.49	
2	3	13134	13268	1.02		30.1	14.936	175.28	68000	387.95	
3	3	13161	13293	1.00	1.03	30.1	14.949	175.59	73400	418.03	417.94
4	3	12836	12971	1.05		30.2	14.926	175.05	61000	348.48	
5	3	12961	13098	1.06		30.0	14.948	175.56	83000	472.77	
1	7	12940	13094	1.19		30.0	14.925	175.02	85000	485.65	
2	7	11926	12063	1.15		30.0	14.932	175.19	86000	490.91	
3	7	12935	13082	1.14	1.15	30.0	14.933	175.21	81000	462.30	494.76
4	7	12831	12976	1.13		30.0	14.945	175.49	92500	527.09	
5	7	12870	13015	1.13		30.0	14.935	175.26	89000	507.83	
1	28	13112	13301	1.44		30.1	14.909	174.65	96000	549.68	
2	28	12844	13038	1.51		30	14.937	175.30	98000	559.03	
3	28	12869	13057	1.46	1.46	30.1	14.905	174.55	120000	687.47	609.71
4	28	12884	13063	1.39		30.1	14.912	174.72	120000	686.82	
5	28	12834	13027	1.50		30.2	14.926	175.05	99000	565.57	

ตารางผนวก ก.4

Compressive Strength

ชนิดของสารลดน้ำพิเศษ : *RHEOBUILD 1000R*

ปริมาณ *2790* cc. / คอนกรีต 1 ลบ.เมตร

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนบ่ม (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังบ่ม (g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm^2)	กำลังประลัย (kg.)	ความเค้นประลัย (ksc)	Averae (ksc)
1	3	12838	12972	1.04		30.0	14.979	176.29	74000	419.76	
2	3	12723	12853	1.02		30.0	14.961	175.87	69000	392.34	
3	3	12840	12975	1.05	1.03	30.0	14.910	174.67	52000	297.70	361.54
4	3	12881	13012	1.02		30.1	14.916	174.81	50000	286.02	
5	3	12732	12864	1.04		30.0	14.916	174.81	72000	411.87	
1	7	12884	13033	1.16		30.0	14.921	174.93	76000	434.46	
2	7	12868	13015	1.14		30.1	14.919	174.88	55000	314.50	
3	7	12773	12907	1.05	1.12	30.2	14.918	174.86	60000	343.14	385.39
4	7	12917	13063	1.13		30.0	14.910	174.67	74000	423.65	
5	7	12836.2	12980	1.12		30.1	14.928	175.09	72000	411.21	
1	28	12855	13047	1.49		30.1	14.914	174.76	75000	429.15	
2	28	12819	13011	1.50		30.0	14.942	175.42	78000	444.64	
3	28	12752	12937	1.45	1.44	30.2	14.917	174.83	77000	440.42	448.90
4	28	12684	12857	1.36		30.0	14.927	175.07	81000	462.67	
5	28	12757	12934	1.39		30.0	14.939	175.35	82000	467.63	

ตารางผนวก ก.5

Compressive Strength

ชนิดของสารลดน้ำพิเศษ : *RHEOBUILD 1000R*

ปริมาณ *4650* cc. / คอนกรีต 1 ลบ.เมตร

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนบ่ม (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังบ่ม (g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm^2)	กำลังประลัย (kg.)	ความเค้นประลัย (ksc)	Averae (ksc)
1	3	12860.5	12993	1.03		30.0	14.912	174.72	70000	400.65	
2	3	12931	13064	1.03		30.0	14.929	175.12	80000	456.84	
3	3	12919	13056	1.06	1.04	30.0	14.927	175.07	65000	371.28	399.91
4	3	12867	13001	1.04		30.2	14.938	175.33	89000	507.62	
5	3	12948	13081	1.03		30.0	14.915	174.79	46000	263.18	
1	7	12729	12874	1.14		30.1	14.943	175.44	79000	450.28	
2	7	13102	13253	1.15		30.1	14.938	175.3	79000	450.59	
3	7	13058	13203	1.11	1.13	30.1	14.951	175.633	85000	483.96	456.70
4	7	12882.4	13028	1.13		30.2	14.918	174.86	82000	468.95	
5	7	12949	13094	1.12		30.0	14.904	174.53	75000	429.73	
1	28	12821	13007	1.45		30.1	14.94	175.37	92000	524.59	
2	28	12904	13089	1.43		30.0	15.014	177.12	90000	508.14	
3	28	13089	13277	1.44	1.42	30.1	14.923	174.98	78000	445.78	500.03
4	28	12837	13010	1.35		30.1	14.91	174.67	90000	515.26	
5	28	12941	13125	1.42		30.2	14.956	175.75	89000	506.40	

ตารางผนวก ก.6

Compressive Strength

ชนิดของสารลดน้ำพิเศษ : *RHEOBUILD 1000*

ปริมาณ *9300* cc. / คอนกรีต 1 ลบ.เมตร

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนบ่ม (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังบ่ม (g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm^2)	กำลังประลัย (kg.)	ความเค้นประลัย (ksc)	Averae (ksc)
1	3	13173	13311	1.05		30.0	14.922	174.95	76000	434.41	
2	3	13298	13436	1.04		30.0	14.982	176.36	79000	447.94	
3	3	12726	12857	1.03	1.04	30.0	14.908	174.62	84000	481.03	449.63
4	3	12931	13063	1.02		30.2	14.911	174.69	75000	429.32	
5	3	12934	13070	1.05		30.1	14.952	175.66	80000	455.44	
1	7	13161	13314	1.16		30.0	14.939	175.35	80000	456.23	
2	7	13262	13412	1.13		30.2	14.912	174.72	82000	469.33	
3	7	13076	13229	1.17	1.15	30.2	14.929	175.12	80000	456.84	467.63
4	7	12886.8	13035	1.15		30.1	14.891	174.23	89000	510.83	
5	7	12874.8	13019	1.12		30.0	14.937	175.30	78000	444.94	
1	28	12860	13058	1.54		30.1	14.935	175.26	90000	513.53	
2	28	13017	13211	1.49		30.1	14.923	174.98	75000	428.63	
3	28	12860	13055	1.52	1.51	30.1	15	176.79	125000	707.07	566.76
4	28	12874	13068	1.51		30.1	14.968	176.03	93000	528.31	
5	28	13038	13231	1.48		30.0	14.934	175.23	115000	656.27	

ตารางผนวก ก.7

Compressive Strength

ชนิดของสารลดน้ำพิเศษ : *DARACEM*

ปริมาณ *2790* cc. / คอนกรีต 1 ลบ.เมตร

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนบ่ม (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังบ่ม (g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm^2)	กำลังประลัย (kg.)	ความเค้นประลัย (ksc)	Averae (ksc)
1	3	12852	12984	1.03		30.0	14.916	174.81	58000	331.79	
2	3	12867	13001	1.04		30.0	14.928	175.09	66000	376.94	
3	3	12923	13059	1.05	1.04	30.0	14.936	175.28	65000	370.83	367.73
4	3	12885	13018	1.03		30.0	14.927	175.07	68000	388.42	
5	3	12931	13068	1.06		30.0	14.939	175.35	65000	370.69	
1	7	13112	13264	1.16		30.0	14.976	176.22	80000	453.98	
2	7	12895	13043	1.15		30.1	14.923	174.98	59000	337.19	
3	7	12855	13000	1.13	1.15	30.1	14.911	174.69	69000	394.98	419.75
4	7	12709	12854	1.14		30.2	14.884	174.06	82000	471.10	
5	7	13101	13253	1.16		30.0	14.995	176.67	78000	441.51	
1	28	12864	13063	1.55		30.1	14.959	175.82	85000	483.45	
2	28	12899	13096	1.53		30.2	14.938	175.33	88000	501.92	
3	28	12879	13071	1.49	1.49	30.0	14.973	176.15	87000	493.90	474.97
4	28	12883	13071	1.46		30.0	14.954	175.70	85000	483.77	
5	28	12842	13024	1.42		30.0	14.917	174.83	72000	411.82	

ตารางผนวก ก.8

Compressive Strength

ชนิดของสารลดน้ำพิเศษ : *DARACEM*

ปริมาณ *4650* cc. / คอนกรีต 1 ลบ.เมตร

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนบ่ม (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังบ่ม (g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm^2)	กำลังประลัย (kg.)	ความเค้นประลัย (ksc)	Averae (ksc)
1	3	12878.8	13014	1.05		30.0	14.902	174.48	73000	418.38	
2	3	12876	13010	1.04		30.0	14.916	174.81	69000	394.71	
3	3	12910	13043	1.03	1.03	30.1	14.936	175.28	82000	467.82	420.19
4	3	13167	13301	1.02		30.2	14.911	174.69	71000	406.42	
5	3	13215	13351	1.03		30.2	14.885	174.09	72000	413.59	
1	7	12859	13012	1.19		30.0	14.905	174.55	69000	395.29	
2	7	12922	13074	1.18		30.0	14.963	175.91	77000	437.71	
3	7	12910	13058	1.15	1.16	30.1	14.926	175.05	83000	474.16	449.76
4	7	12862.4	13009	1.14		30.1	14.854	173.36	79000	455.70	
5	7	12801.3	12946	1.13		30.2	14.921	174.93	85000	485.91	
1	28	12834	13029	1.52		30.0	14.968	176.03	85000	482.87	
2	28	12775	12969	1.52		30.0	14.875	173.85	89000	511.93	
3	28	12900	13088	1.46	1.48	30.2	14.937	175.30	84000	479.17	477.55
4	28	12915	13098	1.42		30.0	14.943	175.44	75000	427.49	
5	28	12870	13059	1.47		30.0	14.915	174.79	85000	486.30	

ตารางผนวก ก.9

Compressive Strength

ชนิดของสารลดน้ำพิเศษ : *DARACEM*

ปริมาณ *9300* cc. / คอนกรีต 1 ลบ.เมตร

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนบ่ม (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังบ่ม (g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm^2)	กำลังประลัย (kg.)	ความเค้นประลัย (ksc)	Averae (ksc)
1	3	12927	13064	1.06		30.0	14.880	173.97	58000	333.39	
2	3	13169	13307	1.05		30.0	14.949	175.59	74000	421.45	
3	3	12915	13047	1.02	1.05	30.2	14.944	175.47	83000	473.02	431.92
4	3	12962	13097	1.04		30.1	14.916	174.81	87000	497.68	
5	3	12911	13049	1.07		30.2	14.928	175.09	76000	434.06	
1	7	12743	12890	1.15		30.1	14.926	175.05	77000	439.89	
2	7	12875	13026	1.17		30.0	14.960	175.84	87000	494.76	
3	7	12904	13054	1.16	1.15	30	14.947	175.54	78000	444.35	463.46
4	7	12948	13096	1.14		30.0	14.981	176.34	77000	436.66	
5	7	12927	13072	1.12		30.1	14.942	175.42	88000	501.65	
1	28	12882	13074	1.49		30.0	14.910	174.67	89000	509.53	
2	28	12825	13011	1.45		30.1	14.959	175.82	102000	580.14	
3	28	12905	13095	1.47	1.47	30.2	15.012	177.07	103000	581.70	522.66
4	28	12855	13045	1.48		30.1	14.949	175.59	90000	512.57	
5	28	12846	13034	1.46		30.0	14.910	174.67	75000	429.38	

ตารางผนวก ก.10

Compressive Strength

ชนิดของสารลดน้ำพิเศษ : *DARACEM 100*

ปริมาณ *2790* cc. / คอนกรีต 1 ลบ.เมตร

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนบ่ม (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังบ่ม (g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm^2)	กำลังประลัย (kg.)	ความเค้นประลัย (ksc)	Averae (ksc)
1	3	12882.4	13019	1.06		30.0	14.927	175.07	70000	399.84	
2	3	12871	13006	1.05		30.0	14.953	175.68	75000	426.91	
3	3	12925	13058	1.03	1.05	30	14.906	174.58	74000	423.88	412.03
4	3	12836	12972	1.06		30.1	14.951	175.63	71000	404.25	
5	3	12919	13053	1.04		30.2	14.932	175.19	71000	405.28	
1	7	12796	12943	1.15		30.1	14.897	174.37	76000	435.86	
2	7	12892	13044	1.18		30.0	14.929	175.12	79000	451.13	
3	7	12871	13020	1.16	1.16	30	14.905	174.55	75000	429.67	439.79
4	7	12917	13064	1.14		30.1	14.939	175.35	80000	456.23	
5	7	12867	13018	1.17		30.1	14.968	176.03	75000	426.06	
1	28	12835	13021	1.45		30.1	14.879	173.95	88000	505.91	
2	28	12858	13050	1.49		30.0	14.98	176.31	75000	425.38	
3	28	12684	12882	1.56	1.50	30.1	14.871	173.76	89000	512.21	493.14
4	28	12759	12953	1.52		30.2	14.934	175.23	92000	525.01	
5	28	12868	13058	1.48		30.0	14.923	174.98	87000	497.21	

ตารางผนวก ก.11

Compressive Strength

ชนิดของสารลดน้ำพิเศษ : *DARACEM 100*

ปริมาณ *4650* cc. / คอนกรีต 1 ลบ.เมตร

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนบ่ม (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังบ่ม (g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm^2)	กำลังประลัย (kg.)	ความเค้นประลัย (ksc)	Averae (ksc)
1	3	12877.5	13014	1.06		30.2	14.902	174.48	72000	412.65	
2	3	12875	13010	1.05		30.0	14.916	174.81	67000	383.27	
3	3	12907	13043	1.05	1.06	30	14.936	175.28	82000	467.82	414.43
4	3	13164	13301	1.04		30.1	14.911	174.69	77000	440.77	
5	3	13208	13351	1.08		30.2	14.885	174.09	64000	367.64	
1	7	12858	13012	1.2		30.1	14.905	174.55	83000	475.50	
2	7	12924	13074	1.16		30.1	14.963	175.91	85000	483.19	
3	7	12911	13058	1.14	1.16	30	14.926	175.05	77000	439.89	469.23
4	7	12863.6	13009	1.13		30.1	14.854	173.36	84000	484.54	
5	7	12796.3	12946	1.17		30.0	14.921	174.93	81000	463.05	
1	28	12839	13029	1.48		30.0	14.968	176.03	90000	511.27	
2	28	12782	12969	1.46		30.1	14.875	173.85	91000	523.44	
3	28	12898	13088	1.47	1.49	30.1	14.937	175.30	91000	519.10	517.47
4	28	12903	13098	1.51		30.0	14.943	175.44	92000	524.38	
5	28	12863	13059	1.52		30.1	14.915	174.79	89000	509.19	

ตารางผนวก ก.12

Compressive Strength

ชนิดของสารลดน้ำพิเศษ : *DARACEM 100*

ปริมาณ *9300* cc. / คอนกรีต 1 ลบ.เมตร

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนบ่ม (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังบ่ม (g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm^2)	กำลังประลัย (kg.)	ความเค้นประลัย (ksc)	Averae (ksc)
1	3	13182.6	13321	1.05		30.0	14.903	174.51	77000	441.24	
2	3	12867	13000	1.03		30.0	14.85	173.27	74000	427.08	
3	3	13292	13432	1.05	1.05	30	14.885	174.09	83000	476.78	462.88
4	3	12900	13037	1.06		30.1	14.952	175.66	85000	483.90	
5	3	12944	13079	1.04		30.2	14.929	175.12	85000	485.39	
1	7	13086	13235	1.14		30.0	14.912	174.72	95000	543.73	
2	7	13196	13346	1.14		30.1	14.969	176.06	88000	499.84	
3	7	13014	13168	1.18	1.17	30.2	14.887	174.13	103000	591.50	546.48
4	7	12898	13054	1.21		30.1	14.925	175.02	95000	542.79	
5	7	12834	12987	1.19		30.1	14.921	174.93	97000	554.51	
1	28	12841	13026	1.44		30.1	14.908	174.62	104000	595.57	
2	28	13060	13247	1.43		30.0	14.941	175.40	103000	587.24	
3	28	12864	13051	1.45	1.45	30.1	14.898	174.39	108000	619.30	601.02
4	28	12911	13097	1.44		30.0	14.955	175.73	105000	597.52	
5	28	12855	13047	1.49		30.2	14.927	175.07	106000	605.47	

ตารางผนวก ก.13

Compressive Strength

คอนกรีตธรรมดาไม่ผสมสารลดน้ำพิเศษ

Water Cement Ratio : 0.43

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนบ่ม (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังบ่ม (g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm^2)	กำลังประลัย (kg.)	ความเค้นประลัย (ksc)	Averae (ksc)
1	3	12919	13053	1.04		30.1	14.95	175.61	44000	250.56	
2	3	12679	12812	1.05		30.0	14.925	175.02	49000	279.96	
3	3	12752	12885	1.04	1.05	30	14.927	175.07	47000	268.47	269.69
4	3	12728	12865	1.08		30	14.92	174.91	50000	285.87	
5	3	12787	12923	1.06		30.2	14.903	174.51	46000	263.60	
1	7	12806	12960	1.2		30.1	14.941	175.40	55000	313.57	
2	7	12824	12977	1.19		30.0	14.93	175.14	56000	319.75	
3	7	12892	13042	1.16	1.18	30	14.908	174.62	54000	309.24	321.75
4	7	12797	12947	1.17		30.2	14.944	175.47	59000	336.24	
5	7	12823	12974	1.18		30.2	14.957	175.77	58000	329.97	
1	28	12748	12942	1.52		30.1	14.935	175.26	64000	365.18	
2	28	12807	13004	1.54		30.0	14.926	175.05	65000	371.33	
3	28	12697	12885	1.48	1.51	30	14.938	175.33	68000	387.85	382.07
4	28	12863	13057	1.51		30.2	14.45	164.06	67000	408.39	
5	28	12881	13076	1.51		30.1	14.915	174.79	66000	377.60	

ภาคผนวก ข.

ราคาของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ข.1 แสดงราคาส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ

คอนกรีตผสมสารลดน้ำพิเศษ		ซีเมนต์	สารลดน้ำพิเศษ	หิน	ทราย	ราคารวม	ราคาที่เพิ่มขึ้นจากคอนกรีตธรรมดา	% ราคาที่เพิ่มขึ้นจากคอนกรีตธรรมดา
ชนิด	ปริมาณ (CC.)	(บาท)	(บาท)	(บาท)	(บาท)	(บาท)	(บาท)	(บาท)
RHEOBUILD1000	2790	1163	78	116	72	1429	78	5.74
	4650	1163	130	116	72	1481	130	9.59
	9300	1163	260	116	72	1611	260	19.23
RHEOBUILD1000R	2790	1163	78	116	72	1429	78	5.74
	4650	1163	130	116	72	1481	130	9.59
	9300	1163	260	116	72	1611	260	19.23
DARACEM	2790	1163	81	116	72	1431	80	5.94
	4650	1163	135	116	72	1485	134	9.94
	9300	1163	270	116	72	1620	269	19.92
DARACEM100	2790	1163	81	116	72	1431	80	5.94
	4650	1163	135	116	72	1485	134	9.94
	9300	1163	270	116	72	1620	269	19.92
คอนกรีตธรรมดา	-	1163		116	72	1351	-	-

หมายเหตุ

- ราคาที่ได้เป็นราคาขายปลีกและปริมาณส่วนผสมต่างได้มาจากตารางที่ 5.1

- ซีเมนต์	ราคา	125	บาท/50 กก.
- สารลดน้ำ			
1. RHEOBUILD1000	ราคา	28	บาท/ ลิตร
2. RHEOBUILD1000R	ราคา	28	บาท/ ลิตร
3. DARACEM	ราคา	29	บาท/ ลิตร
4. DARACEM100	ราคา	29	บาท/ ลิตร
- หิน	ราคา	310	บาท/ ลบ.ม.
- ทราย	ราคา	270	บาท/ ลบ.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ข.2 เปรียบเทียบราคาและกำลังที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษ

คอนกรีตผสมสารลดน้ำพิเศษ		ปริมาณสารที่เพิ่มขึ้น	กำลังที่เพิ่มขึ้น	ราคาที่เพิ่มขึ้น
ชนิด	ปริมาณ (cc.)	(cc.)	(ksc)	(บาท)
RHEOBUILD1000	2790	-	-	-
	4650	1860	23.33	52
	9300	4650	38.69	130
RHEOBUILD1000R	2790	-	-	-
	4650	1860	51.13	52
	9300	4650	66.73	130
DARACEM	2790	-	-	-
	4650	1860	2.61	54
	9300	4650	45.11	135
DARACEM100	2790	-	-	-
	4650	1860	24.33	54
	9300	4650	83.55	135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

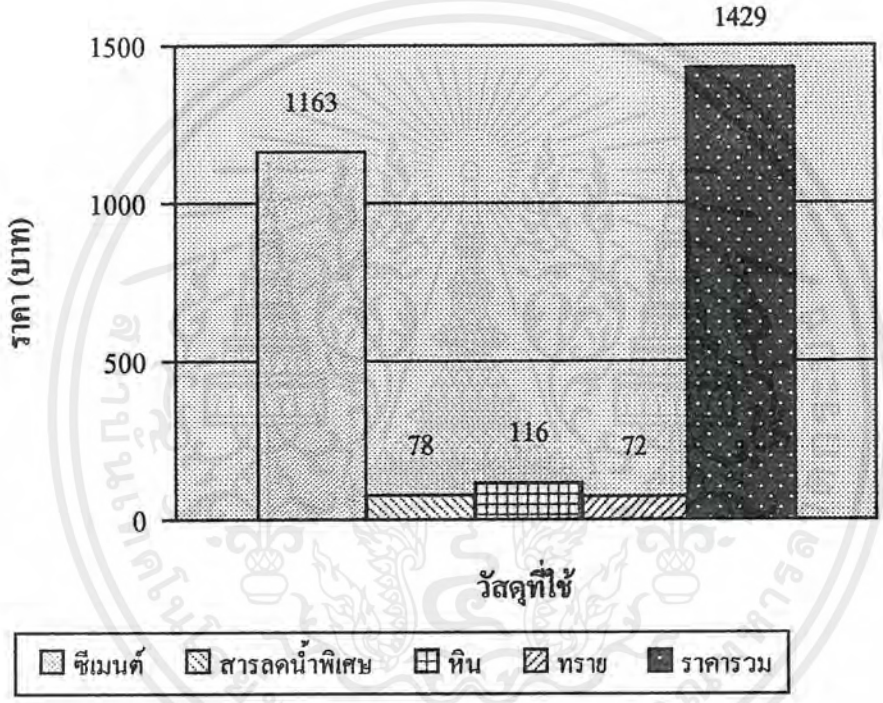
ตารางผนวก ข3 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบด้านราคาและกำลังของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ DARACEM100 กับคอนกรีตธรรมดา

กำลังที่ 28 วัน (ksc)	คอนกรีตธรรมดา 1 ลบ.เมตร							คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ 1 ลบ.เมตร								
	ปูนซีเมนต์		หิน		ทราย		ราคารวม (บาท)	ปูนซีเมนต์		หิน		ทราย		สารลดน้ำพิเศษ		ราคารวม (บาท)
	ปริมาณ (กก.)	ราคา (บาท)	ปริมาณ (กก.)	ราคา (บาท)	ปริมาณ (กก.)	ราคา (บาท)		ปริมาณ (กก.)	ราคา (บาท)	ปริมาณ (กก.)	ราคา (บาท)	ปริมาณ (กก.)	ราคา (บาท)	ปริมาณ (cc.)	ราคา (บาท)	
400	526	1315	992	116	639	67	**1498**	465	1163	992	116	690	72	2790	81	**1432**
500	606	1515	992	116	624	65	**1696**	465	1163	992	116	690	72	4650	135	**1486**
600	714	1785	992	116	484	51	**1952**	465	1163	992	116	690	72	9300	270	**1621**

หมายเหตุ

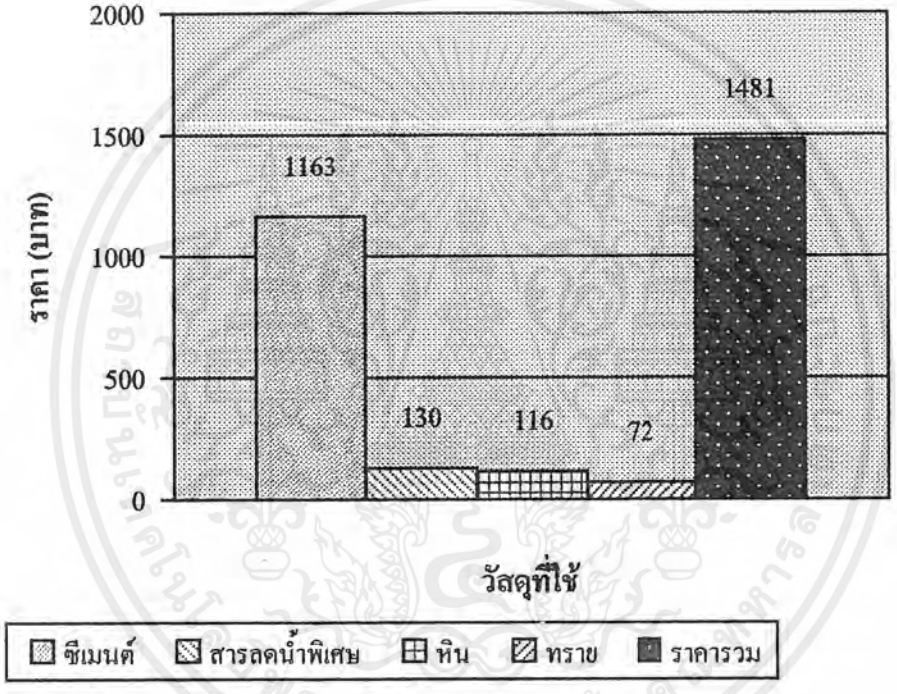
วิธีการคำนวณปริมาณส่วนผสมกล่าวไว้ในบทที่ 4

รูปผนวก ข.1 รูปแผนภูมิแท่งแสดงราคาของวัสดุผสมในคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000 และ RHEOBUILD1000R ในปริมาณ 2790 cc.



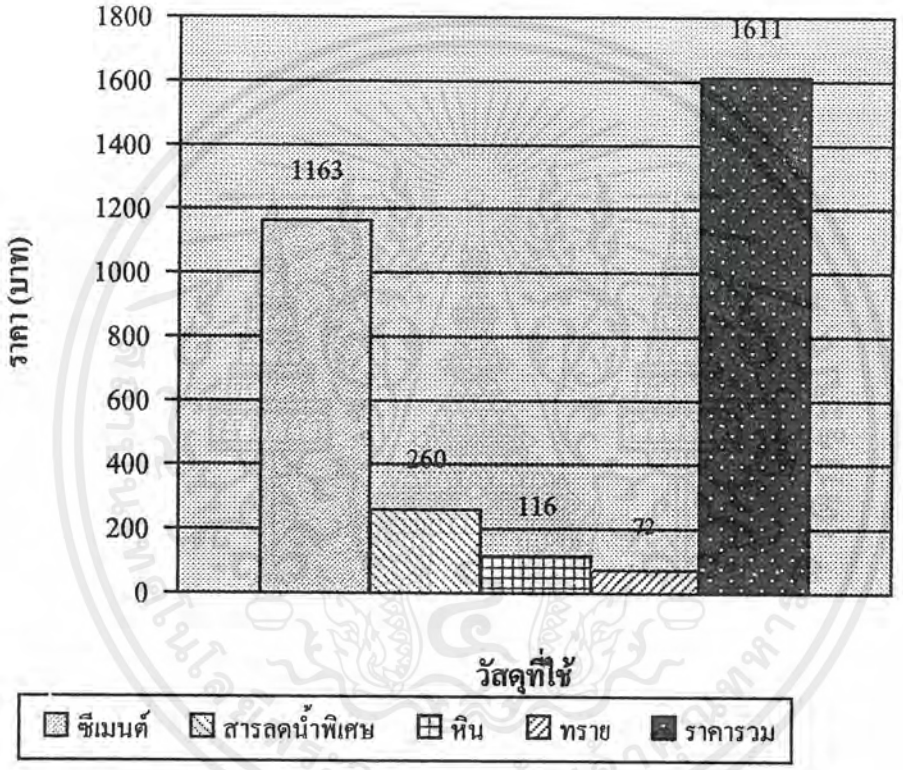
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ข.2 รูปแผนภูมิแท่งแสดงราคาของวัสดุผสมในคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000 และ RHEOBUILD1000R ในปริมาณ 4650 cc.



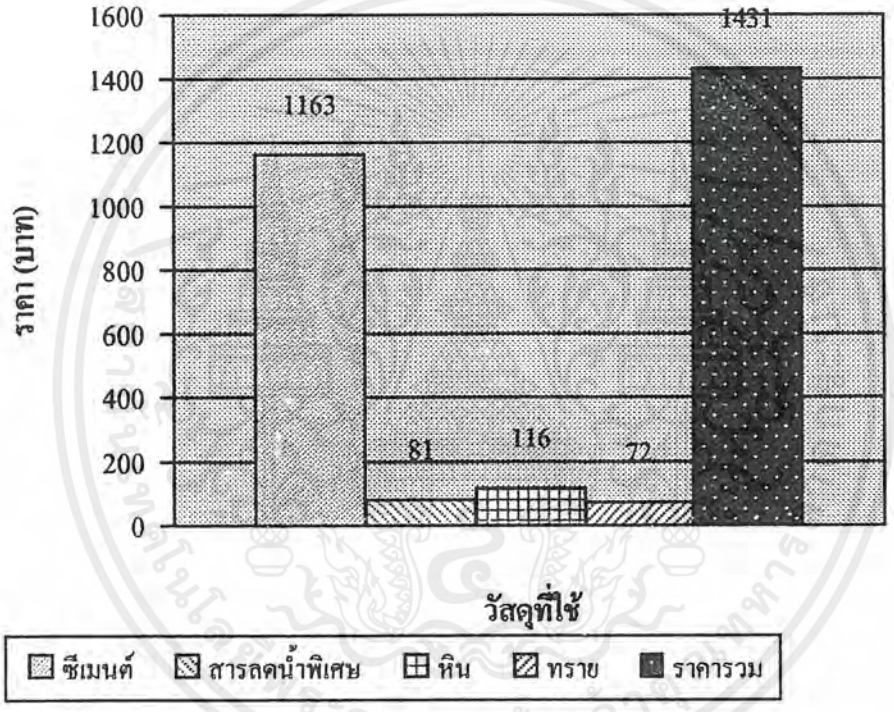
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ข.3 รูปแผนภูมิแท่งแสดงราคาของวัสดุผสมในคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำพิเศษ RHEOBUILD1000 และ RHEOBUILD1000R ในปริมาณ 9300 cc.



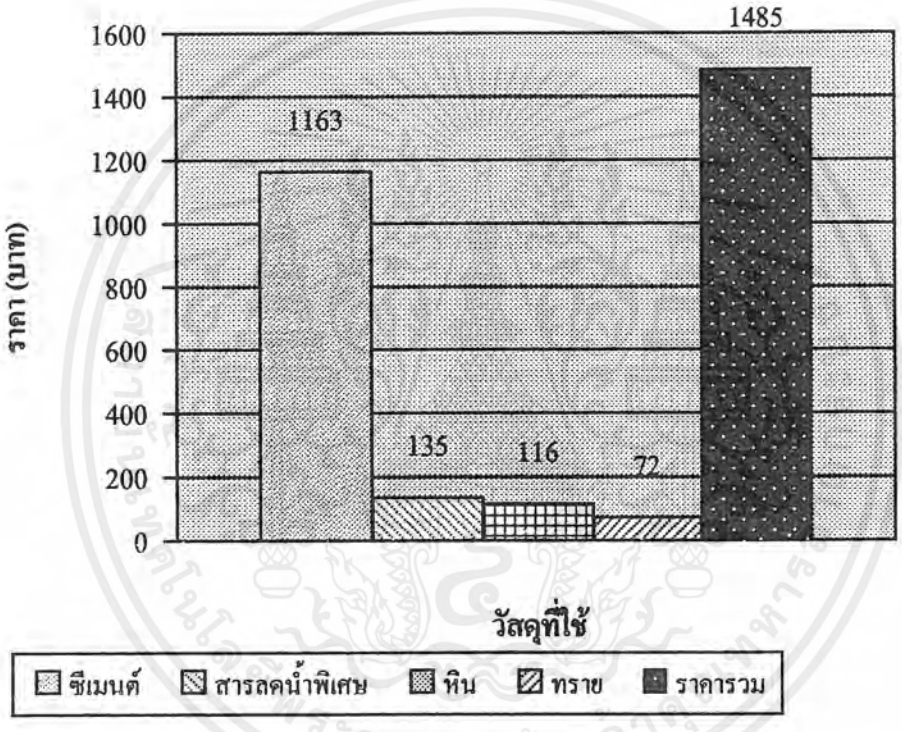
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ข.4 รูปแผนภูมิแท่งแสดงราคาของวัสดุผสมในคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำพิเศษ DARACEM และ DARACEM100 ในปริมาณ 2790 cc.



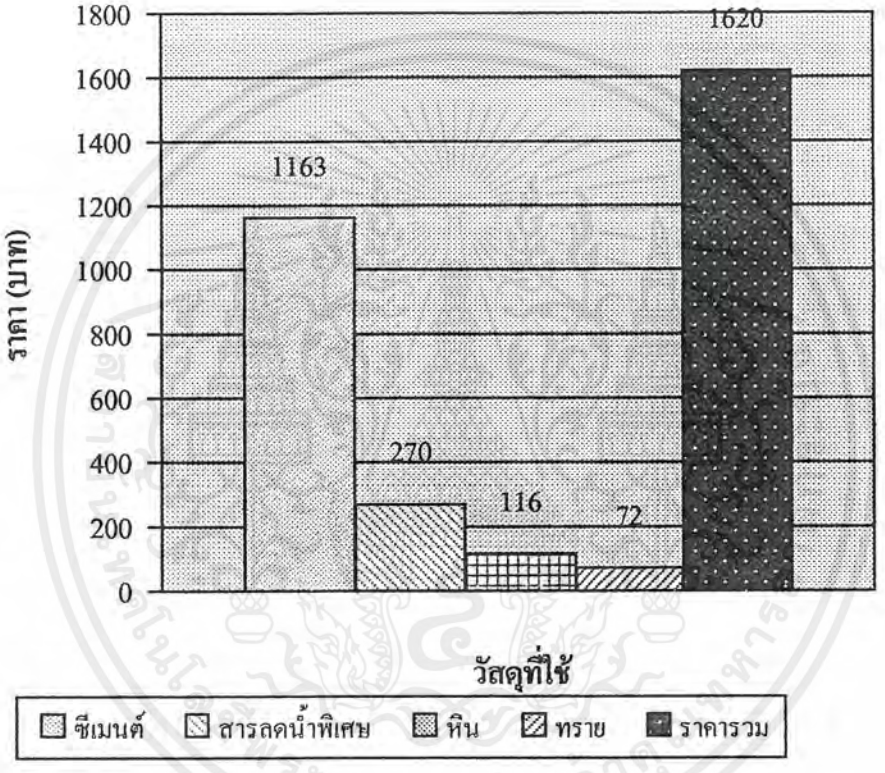
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ข.5 รูปแผนภูมิแท่งแสดงราคาของวัสดุผสมในคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำพิเศษ DARACEM และ DARACEM100 ในปริมาณ 4650 cc.



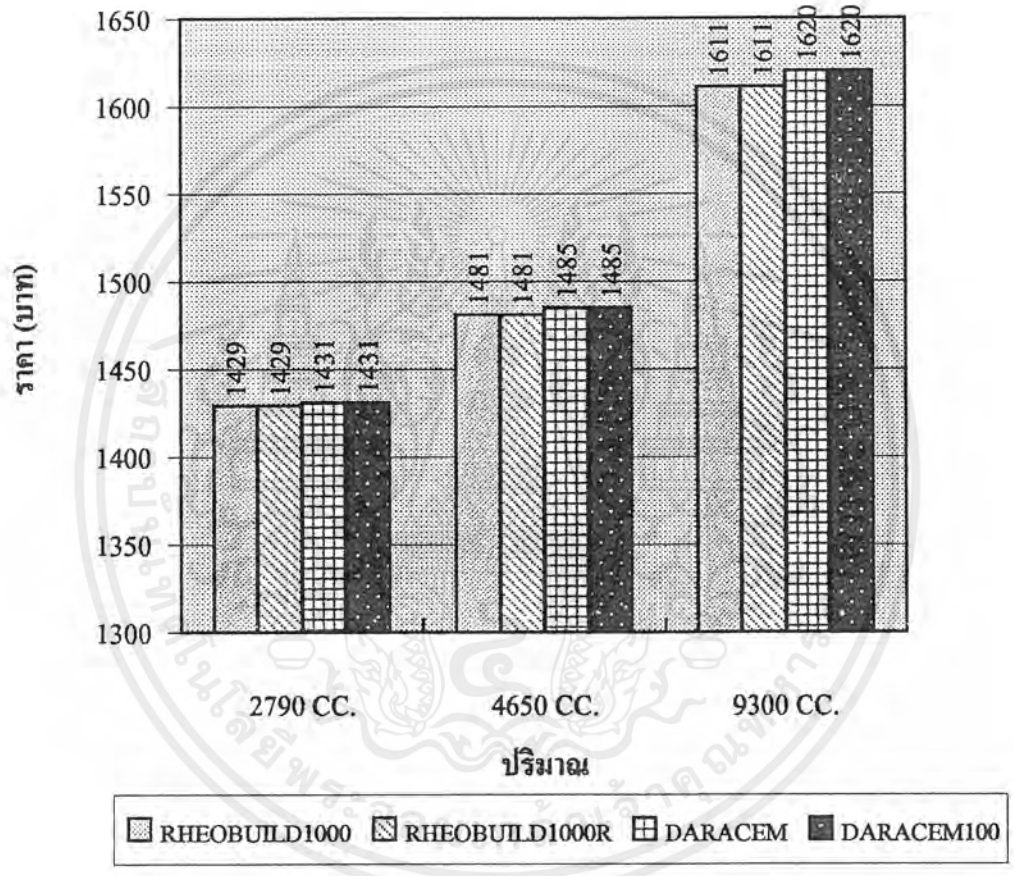
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ข.6 รูปแผนภูมิแท่งแสดงราคาของวัสดุผสมในคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำพิเศษ DARACEM และ DARACEM100 ในปริมาณ 9300 cc.



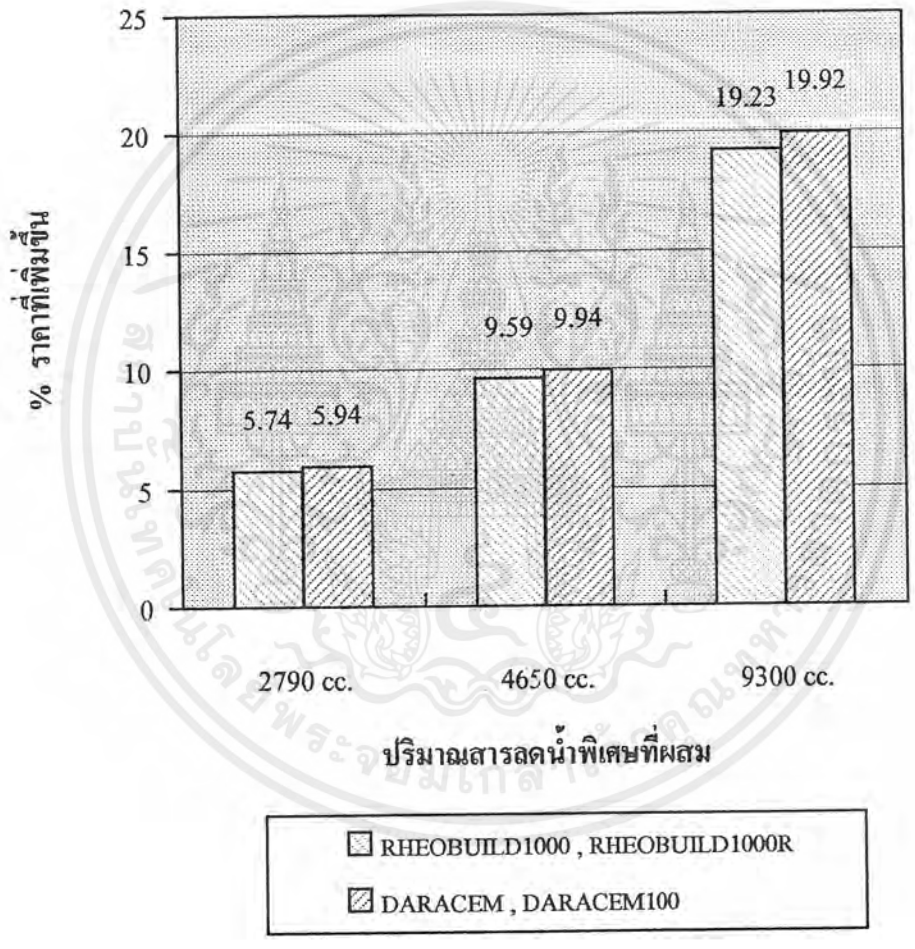
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ข.7 รูปแผนภูมิแท่งแสดงราคารวมของวัสดุผสมในคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำพิเศษชนิดต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ข8 แสดงเปอร์เซนต์ราคาที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค
- นิพนธ์ สาดสูงเนินและณรงค์ ธนสัตยาวิบูล. การศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ผสมไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษ. ปริญญานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ผศ.ศิริวัฒน์ ไชยชนะ. ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ACI Committee 212 1989. Chemical Admixture for Concrete. In ACI Materials Journal. Vol.86 NO.3 , May-June
- Rimon, M.R. 1978. Chemical Admixture for Concrete. Division of John weley & son, Inc., New York.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้