คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

BASIC PROPERTIES OF CONCRETE CONTAINING STRENGTH ENHANCING MINERAL ADMIXTURE

อธิกานต์ ธิวงศ์คำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

อธิกานต์ ชิวงศ์คำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด Basic Properties of Concrete Containing Strength Enhancing Mineral Admixture
ชื่อ - นามสกุล	นายอธิกานต์ ธิวงศ์คำ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ำมาตร, ปร.ด.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2558

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

จตุพล ตั้งปกาศิต ..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์สมนึก ตั้งเติมสิริกุล, D.Eng.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์หมิง จิ๋ง, D.Eng.)

ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์ ..... กรรมการ

(อาจารย์ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์, Ph.D.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ำมาตร, ปร.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 1 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด
ชื่อ – นามสกุล	นายอธิกานต์ ธิวงศ์คำ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ำมาตร, ปร.ด.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการค้นคว้าวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านวัสดุคอนกรีต นักวิจัยและวิศวกรมีความรู้ความเข้าใจมากขึ้น ทำให้มีผู้คิดค้นสังเคราะห์สารเพิ่มกำลังอัดชนิดหนึ่ง เพื่อช่วยปรับปรุงปฏิกิริยาในส่วนผสมปูนซีเมนต์ โดยส่วนผสมที่สังเคราะห์จะช่วยในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งสารเพิ่มกำลังอัดชนิดนี้ถูกพบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับปูนซีเมนต์ มีนักวิจัยได้ทดลองแทนที่สารเพิ่มกำลังอัดในคอนกรีต และพบว่าทำให้ปฏิกิริยาในช่วงอายุเริ่มแรกสามารถพัฒนากำลังไปได้ดี ทำให้มีการประเมินกันว่า การแทนที่สารเพิ่มกำลังอัดจะช่วยทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไปทั้งในด้านของคุณสมบัติเบื้องต้นและด้านความคงทน

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด โดยใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) และโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC1) และประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน (OPC1+LP) ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก ส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 (OPC3) ร้อยละ 3.5 4.5 และ 5.5 โดยน้ำหนัก

ผลการศึกษาพบว่า การขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดมีค่าน้อยกว่าของ OPC1, OPC3 และ OPC1+LP โดยเพสต์ Replacement มีค่าการขยายตัวออโตเคลฟน้อยกว่าของ Addition และการผสมสารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากให้ค่าการขยายตัวออโตเคลฟมากขึ้น ส่วนการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ของมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดมีค่ามากกว่าของ OPC1, OPC3 และ OPC1+LP โดยมอร์ต้าร์ Replacement มีค่าการขยายตัวใน $Ca(OH)_2$ น้อยกว่าของ Addition และการใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากให้ค่าการขยายตัวใน $Ca(OH)_2$ มากขึ้น นอกจากนี้พบว่า ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่การก่อตัวของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดมีค่ามากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบกับของ OPC1, OPC3 และ OPC1+LP ส่วนการผสมปริมาณของสารเพิ่มกำลังอัดที่ต่างกัน ให้ทั้งค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว และการก่อตัวของคอนกรีตที่ไม่แตกต่างกัน และพบว่า กำลังอัดประลัยและกำลังดึงของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดมีค่ามากกว่าของ OPC1, OPC3 และ OPC1+LP โดยคอนกรีตที่ผสมสารเพิ่มกำลังอัดทั้ง Addition และ Replacement รวมทั้งการผสมปริมาณของสารเพิ่มกำลังอัดที่ต่างกัน ให้ค่ากำลังอัดประลัยและกำลังดึงที่ไม่แตกต่างกัน สุดท้ายพบว่า การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดมีค่ามากกว่าของ OPC1 โดยคอนกรีต Replacement มีค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสน้อยกว่าของ Addition และการใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากให้ค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสที่ไม่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: สารเพิ่มกำลังอัด การขยายตัว การก่อตัว กำลังอัดประลัย กำลังดึง

Thesis Title	Basic Properties of Concrete Containing Strength Enhancing Mineral Admixture
Name - Surname	Mr. Athikarn Thiwongkham
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
Thesis Co-Advisor	Mr. Parnthep Julnipitawong, Ph.D.
Academic Year	2015

ABSTRACT

At present, there are a lot of technological development researches on concrete materials. Those provide researchers and engineers have greater knowledge and understanding. They have created strength enhancing mineral admixture that helps improve the reaction in portland cement mixture. This synthetic mixture helps hydration reaction. Its chemical composition is similar to that of portland cement. Researchers have tried out to replace strength enhancing mineral admixture in concrete and it was found that its reaction in early strength development went well. It was expected that the replacement of strength enhancing mineral admixture will help change both basic properties and durability concrete.

This research aimed to study the basic properties of concrete containing strength enhancing mineral admixture (SA) by adding and replacing it in portland cement type 1 (OPC1), portland cement type 1 mixed with limestone powder (OPC1+LP) at 5.5, 6.5 and 7.5% by weight, and 3.5, 4.5 and 5.5% by weight in portland cement type 3 (OPC3).

It was found that the autoclave expansion of paste containing SA was less than that of OPC1, OPC3 and OPC1+LP paste. The autoclave expansion of paste containing SA with partial replacement was lower than that of paste containing SA addition. Moreover, the more mixture of SA, the more autoclave expansion occurred whereas the expansion in calcium hydroxide solution of mortar containing SA was higher than OPC1, OPC3 and OPC1+LP mortar. The expansion in calcium hydroxide solution of mortar containing SA with partial replacement was lower than that of

mortar containing SA addition. In addition, the more addition of SA, the more expansion in calcium hydroxide solution occurred. Besides, slump and slump loss of concrete containing SA was lower than those of OPC1, OPC3 and OPC1+LP concrete whereas setting time of concrete containing SA was higher. However, using different quantity of SA gave the same results of slump, slump loss and setting time of concrete. Furthermore, compressive and tensile strength of concrete containing SA was higher than those of OPC1, OPC3 and OPC1+LP concrete. Adding or replacing different quantity of SA yielded the same results. Finally, autogenous shrinkage of concrete containing SA was more than that of OPC1 concrete. The autogenous shrinkage of SA replacement concrete was lower than that of SA addition concrete. In addition, adding more quantity of SA caused the same autogenous shrinkage.

Keywords: strength enhancing mineral admixture, expansion, setting time, compressive strength, tensile strength

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วง หากไม่ได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา พร้อมแนะนำแนวทางในการดำเนินงานวิจัย และวิธีการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณอาจารย์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อันได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หมิง จิ๋ง ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ตั้งเติมสิริกุล จากสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ความเมตตา ความเข้าใจ พร้อมทั้งความรู้อันมีประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย ขอขอบพระคุณ ดร.ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์ ซึ่งได้ให้ความรู้ คำแนะนำตลอดจนเอื้อเฟื้อจัดหาวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และประสบการณ์อันมีค่ายิ่งในการดำเนินชีวิต

ท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อธวัช คุณแม่อรทัย ธิวงศ์คำ ที่ให้ทุกสิ่งทุกอย่างในชีวิตลูก แม้สิ่งต่าง ๆ เหล่านั้นจะได้มาอย่างยากลำบาก และด้วยหยาดเหงื่อของท่าน ให้โอกาสลูกจนมีโอกาสศึกษาเล่าเรียนจนถึงระดับนี้

อธิกานต์ ธิวงศ์คำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... (3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... (5)
กิตติกรรมประกาศ ..... (7)
สารบัญ ..... (8)
สารบัญตาราง ..... (10)
สารบัญรูป ..... (11)
บทที่ 1 บทนำ 15
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 15
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 16
1.3 ขอบเขตของการศึกษา 16
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 17
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 17
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 44
บทที่ 3 วิธีการศึกษา 51
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา 51
3.2 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา 54
3.3 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา 60
3.4 รายละเอียดวิธีการศึกษา 65
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ 73
4.1 การขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ 73
4.2 การขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ 77
4.3 ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต 80
4.4 การก่อตัวของคอนกรีต 86

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต 90
4.6 กำลังดึงของคอนกรีต 94
4.7 การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต 98
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา 100
5.1 สรุปผลการศึกษา 100
บรรณานุกรม 101
ภาคผนวก 105
ภาคผนวก ก ผลการทดลองการขยายตัวออโตเคลฟ 106
ภาคผนวก ข ผลการทดลองการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 108
ภาคผนวก ค ผลการทดลองค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว 110
ภาคผนวก ง ผลการทดลองการก่อตัว 113
ภาคผนวก จ ผลการทดลองกำลังอัดประลัย 116
ภาคผนวก ฉ ผลการทดลองกำลังดึง 119
ภาคผนวก ช ผลการทดลองการหดตัวแบบออโตจีนัส 122
ภาคผนวก ซ ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ 124
ประวัติผู้เขียน 138

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนประเภทที่ 1 ถึง 5 18

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 20

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 21

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของหินปูนประเภทโดโลมิติก (Dolomitic) และโดโลไมท์ (Dolomite) 23

ตารางที่ 2.5 ค่ายุบตัวและค่าคอมแพคติงแฟคเตอร์ของคอนกรีตที่มีมวลรวม 19 และ 38 มม. 28

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และสารเพิ่มกำลังอัดของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา 53

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของเพสต์โดยน้ำหนัก (กรัม) ที่ใช้ในการทดสอบการขยายตัวออโตเคลฟ (Autoclave Expansion) 61

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์โดยน้ำหนัก (กรัม) ที่ใช้ในการทดสอบการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Expansion in Calcium Hydroxide Solution) 62

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ใช้ในการทดสอบค่าการยุบตัว (Slump) การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) การก่อตัว (Setting Time) กำลังอัดประลัย (Compressive Strength) และกำลังดึง (Tensile Strength) โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.30 โดยน้ำหนัก 63

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(W/B) เท่ากับ 0.30 โดยน้ำหนัก 64

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 สารประกอบหลักในปูนเม็ด 19
รูปที่ 2.2 กรวย เหล็กกระทุ้ง และถาดรอง สำหรับทดสอบค่าการยุบตัว 29
รูปที่ 2.3 ลักษณะการยุบตัวของคอนกรีต 29
รูปที่ 2.4 เครื่องเพเนโตรมิเตอร์และเข็ม ที่ใช้สำหรับทดสอบหาการก่อตัวของคอนกรีต 30
รูปที่ 2.5 คอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดโดยเลือกด้านที่เรียบ 2 ด้านตรงข้ามกันมาทดสอบ 33
รูปที่ 2.6 อุปกรณ์เคลือบผิวหน้าคอนกรีต และคอนกรีตที่เคลือบผิวแล้ว 33
รูปที่ 2.7 รอยแตกร้าวของคอนกรีตภายใต้แรงอัดที่พบโดยทั่วไป 35
รูปที่ 2.8 การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีผ่าซีก 37
รูปที่ 2.9 การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีผ่าซีก (ต่อ) 38
รูปที่ 2.10 การแตกของคอนกรีตเนื่องจากการทดสอบแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก 38
รูปที่ 2.11 การทดสอบการรับแรงดึงของคานคอนกรีตโดยวิธีดัด 38
รูปที่ 2.12 การทดสอบการรับแรงดึงของคานคอนกรีตโดยวิธีดัด (ต่อ) 39
รูปที่ 2.13 แบบจำลองการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและออโตจีนัส 41
รูปที่ 2.14 อัตราการหดตัวแบบออโตจีนัส 42
รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายขยายขนาด 3500 เท่า โดยใช้วิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 51
รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายขยายขนาด 3500 เท่า โดยใช้วิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ของสารเพิ่มกำลังอัด 52
รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายขยายขนาด 3500 เท่า โดยใช้วิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ของผงหินปูน 52
รูปที่ 3.4 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล 55
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ทดสอบการยุบตัว 55
รูปที่ 3.6 เครื่องหาเวลาการก่อตัวของคอนกรีต 55

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.7 ตะแกรงร่อนมาตรฐานขนาดเบอร์ 4 56
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบแรงกดมาตรฐาน (Universal Testing Machine) 56
รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ประกอบเครื่องทดสอบการต้านทานแรงดัด 56
รูปที่ 3.10 เครื่องเปรียบเทียบความยาว (Length Comparator) 57
รูปที่ 3.11 หม้อต้ม Autoclave 57
รูปที่ 3.12 เครื่องผสมคอนกรีต 57
รูปที่ 3.13 เครื่องผสมมอร์ต้าร์ 58
รูปที่ 3.14 เครื่องสำหรับจี้คอนกรีต 58
รูปที่ 3.15 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต 58
รูปที่ 3.16 แบบหล่อตัวอย่างเพสต์และมอร์ต้าร์ 59
รูปที่ 3.17 ถังบ่มตัวอย่าง 59
รูปที่ 3.18 ชิ้นตัวอย่างเพสต์ที่บ่มในหม้อต้ม Autoclave 66
รูปที่ 3.19 ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่บ่มในน้ำที่ผสมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซต์ 67
รูปที่ 3.20 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อเวลาผ่านไป 68
รูปที่ 3.21 กราฟแสดงวิธีการหาเวลาการก่อตัวของคอนกรีต 69
รูปที่ 3.22 การกดก้อนตัวอย่างคอนกรีตด้วยเครื่องทดสอบแรงกดมาตรฐาน 70
รูปที่ 3.23 การทดสอบกำลังดึง (Tensile Strength) โดยวิธี Flexural Strength 71
รูปที่ 4.1 การขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด 74
รูปที่ 4.2 การขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และเพสต์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด 75
รูปที่ 4.3 การขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และเพสต์ผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด 76
รูปที่ 4.4 การขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด 77

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5 การขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด 78

รูปที่ 4.6 การขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด 79

รูปที่ 4.7 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด 80

รูปที่ 4.8 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด 81

รูปที่ 4.9 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด 82

รูปที่ 4.10 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด 83

รูปที่ 4.11 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด 84

รูปที่ 4.12 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด 86

รูปที่ 4.13 การก่อตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด 87

รูปที่ 4.14 การก่อตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด 88

รูปที่ 4.15 การก่อตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด 90

รูปที่ 4.16 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ที่อายุ 7 วัน และ28 วัน 91

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.17 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ที่อายุ 7 วัน และ28 วัน 92
รูปที่ 4.18 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด 94
รูปที่ 4.19 กำลังดึงของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน 95
รูปที่ 4.20 กำลังดึงของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน 96
รูปที่ 4.21 กำลังดึงของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด 98
รูปที่ 4.22 การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด 99

บทที่ 1
บทนำ

สำหรับบทนำเป็นการศึกษาถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตเป็นวัสดุสำคัญชนิดหนึ่งที่นำมาใช้ในงานก่อสร้าง การนำคอนกรีตไปใช้งานต้องเข้าใจคุณสมบัติของคอนกรีตที่เลือกมาใช้งาน จากข้อมูลและผลการทดสอบทางวิศวกรรม พบว่า คุณสมบัติของคอนกรีตจะถูกพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น การยุบตัว การก่อตัว กำลัง การขยายตัว การหดตัว และปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณและจำนวนสัดส่วนผสมที่ใช้ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมที่ใช้กับคุณสมบัติคอนกรีต จึงเป็นสิ่งจำเป็นและควรนำมาศึกษาค้นคว้าวิจัย เพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีนำไปใช้โดยมีประสิทธิภาพแข็งแรงตลอดอายุการใช้งาน ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงซ่อมแซมในอนาคตได้ [1]

ปัจจุบันการค้นคว้าวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านวัสดุคอนกรีต นักวิจัยและวิศวกรมีความรู้ความเข้าใจมากขึ้น และได้มีงานวิจัยที่ระบุแนวทางการเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการพัฒนาคอนกรีต ทำให้มีผู้คิดค้นสังเคราะห์สารเพิ่มกำลังอัดชนิดหนึ่ง เพื่อช่วยปรับปรุงปฏิกิริยาในส่วนผสมปูนซีเมนต์ โดยส่วนผสมที่สังเคราะห์จะช่วยในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ในปูนซีเมนต์ ซึ่งสารเพิ่มกำลังอัดชนิดนี้ถูกพบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับองค์ประกอบในบางส่วนของปูนซีเมนต์ มีนักวิจัยได้ทดลองแทนที่สารเพิ่มกำลังอัดในคอนกรีต และพบว่าทำให้ปฏิกิริยาในช่วงอายุเริ่มแรกสามารถพัฒนากำลังไปได้ดี [2] ทำให้มีการประเมินกันว่า การแทนที่สารเพิ่มกำลังอัดจะช่วยทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป ทั้งในด้านของคุณสมบัติเบื้องต้นและด้านความคงทน

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆ ของสารเพิ่มกำลังอัด ซึ่งเป็นวัสดุผสมเพิ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาวได้ เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานสารเพิ่มกำลังอัดอย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงได้เลือกทำการศึกษาถึงการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ การขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซต์ของมอร์ต้าร์ ค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว การก่อตัว กำลังอัดประลัย กำลังดึง และการหดตัวแบบออโตจีนัสในคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดและวัสดุประสานชนิดอื่น ๆ เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ล้วน เพื่อนำผลงานวิจัยอันเป็นประโยชน์นี้ไปใช้พัฒนาเทคโนโลยีด้านวัสดุคอนกรีตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด (การขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ การขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซต์ของมอร์ต้าร์ ค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว การก่อตัว กำลังอัดประลัย กำลังดึง และการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต)

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของสารเพิ่มกำลังอัดต่อคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ผงหินปูน และสารเพิ่มกำลังอัด

1.3.2 ทดสอบการขยายตัวออโตเคลฟ (Autoclave Expansion) ของเพสต์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด

1.3.3 ทดสอบการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซต์ (Expansion in Calcium Hydroxide Solution) ของมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด

1.3.4 ทดสอบค่าการยุบตัว (Slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

1.3.5 ทดสอบการก่อตัว (Setting Time) ของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

1.3.6 ทดสอบกำลังอัดประลัย (Compressive Strength) ของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

1.3.7 ทดสอบกำลังดึง (Tensile Strength) ของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

1.3.8 ทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) ของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

1.4.2 ทำให้ทราบถึงผลกระทบของสารเพิ่มกำลังอัดต่อคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต

1.4.3 ทำให้สามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ เป็นแนวทางในการเลือกใช้สัดส่วนผสมที่มีส่วนผสมของสารเพิ่มกำลังอัด สำหรับนำไปใช้ในงานคอนกรีตประเภทต่างๆได้อย่างมีคุณภาพ

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ผงหินปูน สารเพิ่มกำลังอัด และสารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต รวมถึงทฤษฎีพื้นฐานด้านคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตได้แก่ การขยายตัวของเพสต์และมอร์ต้าร์ การยุบตัว การก่อตัว กำลังและการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

2.1.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีต และปูนซีเมนต์ที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงานที่นำไปใช้ นอกจากนี้ยังมีปูนซีเมนต์อื่นที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เหมาะสมกับงานที่หลากหลาย โดยเฉพาะด้านความแข็งแรง ความทนทาน ความสวยงาม และการใช้งานเฉพาะด้าน คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่เป็นวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันในขั้นตอนการเผาเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ การปรับส่วนประกอบของวัตถุดิบจะทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป องค์ประกอบของปูนซีเมนต์สามารถปรับให้เหมาะสมกับการใช้งานประเภทต่างๆ โดยมาตรฐาน ASTM C150 ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ตามข้อกำหนดเกณฑ์คุณลักษณะทางเคมีและทางกายภาพเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานประเภทต่างๆ แต่ในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาเฉพาะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 ผสมกับส่วนประกอบอื่น เช่น สารเพิ่มกำลังอัด ผงหินปูน เท่านั้น

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีต หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไป ที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศที่รุนแรงหรือในที่ที่มีอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษ หรือความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวกับน้ำจะไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงขั้นอันตรายที่คอนกรีตจะแตกร้าวเสียหาย นิยมใช้กันมากที่สุด สำหรับงานคอนกรีตทั่วไป ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังและเกิดความร้อนปานกลาง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ได้แก่ ตราช้าง

ตราเพชร (เม็ดเดียว) ตราพญานาคเขียว ตราTPI (แดง) ตราภูเขา ตราดาวเทียม และตรานกอินทรีย์ (ฟ้า) เป็นต้น

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (Rapid Hardening Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสูงเพราะมีปริมาณ C_3S สูง และมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาก เหมาะสำหรับงานที่ต้องการใช้งานเร็ว เช่น งานซ่อมแซม งานที่ต้องการถอดแบบเร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต เสาไฟฟ้าคอนกรีต ผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป แต่ไม่ควรใช้ปูนประเภทนี้ในงานคอนกรีตขนาดใหญ่เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดขึ้นสูงมากในช่วงแรกอาจทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้ ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ได้แก่ ตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราพญานาคสีแดง ตราทีพีไอสีดำ และตราเอกซีเมนต์สีแดง เป็นต้น

สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์คือ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF เนื่องจากมีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์ (แสดงดังตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนประเภทที่ 1 ถึง 5 [3,4,5]

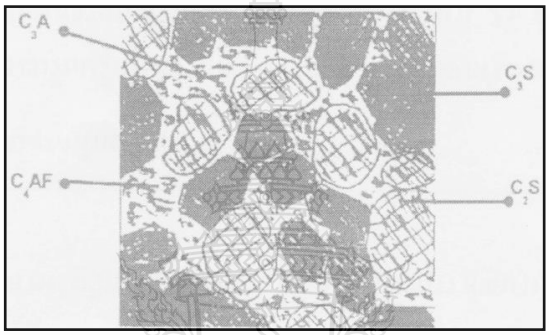
ส่วนประกอบ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท				
	1	2	3	4	5
C_3S	49	46	56	25	30
C_2S	25	29	15	50	46
C_3A	12	6	12	5	5
C_4AF	8	12	8	12	13
ความละเอียดของเบลน (ซม^2/กรัม)	3000	3000	4500	3000	3000
กำลังอัดที่อายุ 3 วัน (กก/ซม^2)	180	150	310	80	120
ความร้อนของปฏิกิยาไฮเดรชันที่ 28 วัน (จูล/กรัม)	400	330	430	270	310

หมายเหตุ *กำลังอัดของคอนกรีตวัดจากลูกบาศก์มอร์ต้าร์ขนาด 50 มม.

2.1.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัตถุดิบสำคัญในคอนกรีต ผลิตจากธาตุ 2 ประเภทหลัก คือ วัสดุธาตุปูนซึ่งเป็นออกไซด์ของธาตุแคลเซียมและธาตุซิลิกอน ซึ่งมีออกไซด์หลัก (Major Oxides) คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันได้กว่าร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 10 เป็นออกไซด์รอง (Minor Oxides) ได้แก่

แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และยังมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่นผสมอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) และฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) นอกจากนี้ยังมีสิ่งที่แปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจะจัดรวมอยู่ในการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue) ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบการเผาและการเย็นลงของปูนเม็ดขนาดและรูปร่างของสารประกอบสามารถใช้กล้องจุลทรรศน์ธรรมดาส่องดูได้สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ 4 ชนิด ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สารประกอบหลักในปูนเม็ด [6]

1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต $3CaO{\cdot}SiO_2 (C_3S)$

ไตรแคลเซียมซิลิเกต เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึกสีเทาแก่ คุณสมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตนี้ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และแข็งตัวให้กำลังค่อนข้างดี โดยเฉพาะ 7 วันแรก โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 45 ถึง 55

2) ไดแคลเซียมซิลิเกต $2CaO{\cdot}SiO_2 (C_2S)$

ไดแคลเซียมซิลิเกตมีหลายรูปแบบ โดยที่อุณหภูมิปกติ C_2S จะอยู่ในรูปเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกตมีลักษณะเป็นเม็ดกลม มีคุณสมบัติเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดอย่างค่อนข้างช้าและช้ากว่า C_3S มาก แต่ในระยะยาวจะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับ C_3S โดยปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 15 ถึง 35

3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต $3CaO \cdot Al2O_3$ (C_3A)

ไตรแคลเซียมอลูมิเนตลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยม มีสีเทาอ่อน ทำปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมากและทำให้ก่อตัวทันที (Flash Set) การพัฒนากำลังเร็วภายใน 1 ถึง 2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำมากเมื่อเทียบกับ C_3S และ C_2S โดยปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 7 ถึง 15

4) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรด์ $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ (C_4AF)

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์อยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (Solid Solution) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็วภายในไม่กี่นาที แต่กำลังค่อนข้างต่ำและต่ำกว่า C_3A โดยปริมาณของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 5 ถึง 10

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [7]

องค์ประกอบทางเคมี	สัญลักษณ์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ค่าเฉลี่ย
CaO	C	60 - 67	64.1
SiO_2	S	17 - 25	20.2
Al_2O_3	A	3 - 8	5.9
Fe_2O_3	F	0.5 - 6.0	3.2
MgO	M	0.1 - 4.0	1.0
Na_2O	N	0.1 - 1.8	0.1
K_2O	K	0.1 - 1.8	0.4
SO_3	$\overline{S}$	0.5 - 3.0	2.6
สารประกอบอื่นๆ	-	0.5 - 3.0	0.8
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition)	LOI	0.1 - 3.0	1.2
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (insoluble residue)	-	0.20 - 0.75	0.5

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [7]

คุณสมบัติ	สารประกอบหลัก			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วกว่า (นาที)
การพัฒนากำลัง	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (1 วัน)	เร็วมาก (1 วัน)
กำลังประลัย	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง

2.1.1.2 ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

1) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3CaO.2SiO_23H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide : $Ca(OH_2)$ หรือ CH) แสดงดังสมการที่ 2.1

$$2(3CaO.SiO_2)+6H_2O \text{ ----> } 3CaO.2Sio_23H_2O+3Ca(OH)_2 \qquad (2.1)$$

2) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH แสดงดังสมการที่ 2.2

$$2(2CaO.SiO_2)+4H_2O \text{ ----> } 3CaO.2Sio_23H_2O+Ca(OH)_2 \qquad (2.2)$$

3) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดและทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว แสดงดังสมการที่ 2.3

$$3CaO.Al_2O_3+6H_2O \text{ ----> } 3CaO.Al_2O_3.6H_2O \qquad (2.3)$$

เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซั่มเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (Clinker) โดยยิปซั่ม (Gypsum : $CaSO4.2H_2O$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตก่อให้เกิดชั้นบางๆ ของแอทริงไจท์ (Ettringite : $3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต แสดงดังสมการที่ 2.4

$$3CaO.Al_2O_3+Ca.SO_4.2H_2O \text{ ----> } 3CaO.Al_2O_3Ca.SO_4 .31H_2O \qquad (2.4)$$

4) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซั่ม แสดงดังสมการที่ 2.5

$$4CaO.Al_2O_3Fe_2O_3+Ca.SO_4.2H_2O \text{ ----> } CaO.(Al_2O_3.Fe_2O_3).3CaSO_4 \qquad (2.5)$$

เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจะลดลงเนื่องจากการเกิดชั้นเคลือบของแอทริงไจท์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มของอิออนแคลเซียมไฮดรอกไซต์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเพสต์มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งทำให้เกิด CSH เพิ่มมากขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้แอทริงไจท์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนตและเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต และซัลโฟเฟอไรท์แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.1.2 ผงหินปูน

ผงหินปูนเป็นผลพลอยได้จากการย่อยหิน เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยปกติแล้วผงหินปูนจำนวนมากเหล่านี้มักจะถูกกองเก็บไว้ในบริเวณแหล่งหินย่อย ๆ นั้น โดยอนุภาคของผงหินปูนมีขนาดเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถก่อให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อมและยังส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ที่อยู่อาศัยในบริเวณใกล้เคียงแหล่งย่อยหินเหล่านั้น

ผงหินปูน (Limestone Powder) ในประเทศไทยมีเหมืองที่ทำการผลิตอยู่ 2 แหล่งใหญ่ด้วยกันคือ เหมืองหินปูนโดโลมิติกจังหวัดสระบุรี และผงหินปูนจากเหมืองหินปูนชนิดโดโลไมท์จังหวัดกาญจนบุรี

หินปูนชนิดโดโลมิติก (Dolomitic) และโดโลไมท์ (Dolomite) จัดอยู่ในจำพวกหินคาร์บอเนต (Carbonate Rock) โดยหินคาร์บอเนตที่มีองค์ประกอบของแร่โดโลไมท์อยู่ในปริมาณร้อยละ 10 ถึง 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโดโลมิติก ในขณะที่มีปริมาณของแร่โดโลไมท์มากกว่าร้อยละ 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโดโลไมท์ โดยหินปูนทั้ง 2 ประเภทมีคุณสมบัติทางกายภาพ

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของหินปูนประเภทโดโลมิติก (Dolomitic) และโดโลไมท์ (Dolomite) [8]

คุณสมบัติทางกายภาพ	**ประเภทของหินปูน**	
	โดโลมิติก	**โดโลไมท์**
รูปผลึก	Hexagonal/Rhombohedral	Hexagonal/Rhombohedral
ความแข็ง	3.0 – 3.5 (Mohr'Scale)	3.0 – 3.5 (Mohr'Scale)
ความถ่วงจำเพาะ	2.65 – 2.75	2.82
สี	สีขาว สีเทา หรือสีชมพู	สีขาว สีเทา หรือสีชมพู
แร่ธาตุที่เจือปน	Fe, Mn, Co, Zn, Mg	Fe, Mn, Co, Zn, Pb

องค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูนจะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (Inert Material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive Material) มีรายละเอียดดังนี้

2.1.2.1 วัสดุเฉื่อยไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีจึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตอีกด้วย ในขณะเดียวกันก็อาจส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนเพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้นก็สามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงพอ และ/หรือให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมีดังสมการที่ 2.6 และสมการที่ 2.7

$$CaCO_3\text{-}H_2O\text{-heat} \text{ ----> } Ca(OH)_2 + Co_2 \quad (2.6)$$

$$MgCO_3\text{-}H_2O\text{-heat} \text{ ----> } Mg(OH)_2 + CO_2 \quad (2.7)$$

2.1.1.2 วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ดังสมการที่ 2.8

$$CaO + H_2O \text{ ----> } Ca(OH)_2 \quad (2.8)$$

ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากสมการข้างต้นนี้ สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์

การนำเอาผงหินปูนและวัสดุปอซโซลานมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูนและวัสดุปอซโซลานจากแหล่งต่าง ๆ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสาน ซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของวัสดุทั้งสองให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.1.3 สารเพิ่มกำลังอัด (Strength Enhancing Mineral Admixture)

สารเพิ่มกำลังอัดสำหรับคอนกรีต ผลิตตามมาตรฐาน ASTM C150, ASTM C465, TIS 15 และ TIS 15 volume 20 [9] เป็นสารผสมคอนกรีตที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นสารประกอบของแคลเซียมที่สามารถปล่อยสารแคลเซียมได้หลังจากที่คอนกรีตเริ่มมีการเซตตัว มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว - เทา โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 2.95 และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ได้แก่

- ช่วยพัฒนากำลังของคอนกรีตให้เพิ่มขึ้นทั้งในช่วงต้นและช่วงปลาย
- ช่วยลดการเยิ้มน้ำ (Bleeding) ของคอนกรีตสด
- ช่วยลดการหดตัว (Shrinkage) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการแตกร้าวของคอนกรีต
- ช่วยให้คอนกรีตมีการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) น้อย ทำให้มีความสะดวกมากขึ้น กับลักษณะงานที่ต้องใช้ความรวดเร็วในการถอดแบบหล่อ
- เป็นสารเคมีที่ไม่ส่งผลในการเร่งการก่อตัว (Setting Time) ของคอนกรีต
- สามารถใช้งานร่วมกับวัสดุประสานอื่น ๆ ได้ดี

2.1.4 สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต (Concrete Admixture)

สารเคมีผสมเพิ่มเป็นสารผสมเพิ่มที่ได้จากธรรมชาติหรือผลิตจากกรรมวิธีสังเคราะห์ทางเคมี โดยสารผสมเพิ่มจะใช้ผสมเพิ่มลงไปในส่วนผสมคอนกรีตก่อนผสมหรือขณะผสมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต ที่มักนิยมนำมาใช้ในประเทศไทย ได้แก่ สารกักกระจายฟองอากาศ สารลดน้ำ สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว และสารเร่งการก่อตัว แบ่งตามมาตรฐาน ASTM C494 [10] ได้ 8 ประเภท

2.1.4.1 ประเภท A สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducers หรือ Plasticizers)

สารเคมีผสมเพิ่มซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้ว สามารถลดปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีตได้โดยที่ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิม

2.1.4.2 ประเภท B สารหน่วงการแข็งตัว (Retarders)

สารเคมีผสมเพิ่มซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้ว ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตยาวนานขึ้น

2.1.4.3 ประเภท C สารเร่งการก่อตัว (Accelerators)

สารเคมีผสมเพิ่มซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสั้นลง

2.1.4.4 ประเภท D สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว (Water Reducing and Set Tetarding Admixtures)

สารเคมีผสมเพิ่มซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้ว สามารถลดปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต โดยความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิม และทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตยาวนานขึ้น

2.1.4.5 ประเภท E สารลดน้ำ และ เร่งการก่อตัว (Water Reducing and Set Accelerating Admixtures)

สารเคมีผสมเพิ่มซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้วสามารถลดปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต โดยที่ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิม และทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสั้นลง

2.1.4.6 ประเภท F สารลดน้ำระดับสูง (High Range Water Reducing Admixtures หรือ Superplasticizer)

สารเคมีผสมเพิ่มซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้ว สามารถลดปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรคอนกรีตได้อย่างน้อยร้อยละ 12 โดยที่ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิม

2.1.4.7 ประเภท G สารลดน้ำระดับสูงและหน่วงการแข็งตัว (High Range Water Reducing And Set Retarding Admixture หรือ Set Tetarding Superplasticizer)

สารเคมีผสมเพิ่มซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้ว สามารถลดปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรคอนกรีตได้ อย่างน้อยร้อยละ 12 โดยที่ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิม และระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตยาวนานขึ้น

2.1.4.8 ประเภทอื่น ๆ

- สารป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริม
- สารกันซึม
- สารกักกระจายฟองอากาศ (Air Entraining Agents)
- สารเพิ่มความหนืด (Thickening)
- สารผสมเพิ่มเพื่อช่วยในการปั๊มคอนกรีต (Pumping Aids)

2.1.5 การขยายตัวของเพสต์และมอร์ต้าร์

คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์เมื่อบ่มในน้ำจะเกิดการขยายตัวหรือการบวม (Swelling) และมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ดูดเข้าไปในซีเมนต์เพสต์ทำให้เกิดแรงต้านแรงยึดเกาะกันและทำให้แรงตึงผิวของอนุภาคซีเมนต์เจลลดลงจึงทำให้คอนกรีตขยายตัว

ซีเมนต์เพสต์ถือเป็นต้นกำเนิดของการขยายตัว โดยมีการขยายตัวสูงมากประมาณ $2{,}000 \times 10^{-6}$ ส่วนคอนกรีตมีการขยายตัวต่ำมากคือประมาณ 200×10^{-6} เพราะคอนกรีตมีมวลรวมซึ่งไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงปริมาตรผสมอยู่ในปริมาณสูงประมาณร้อยละ 70 ของปริมาตรทั้งหมด การขยายตัวของคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเลซึ่งมีความดันสูงด้วย ที่ความลึก 100 เมตรน้ำทะเลจะมีความดัน 10.0 เมกะปาสกาล คอนกรีตที่แช่อยู่ในความลึกระดับนี้ 3 ปี มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นกว่า 8 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่อยู่ในบรรยากาศธรรมดา การขยายตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างมากของคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลเนื่องมาจากการแทรกซึมเข้าของน้ำทะเลภายใต้ความดัน และรวมถึงการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตในปริมาณมากขึ้น [11]

2.1.6 การยุบตัวของคอนกรีต

การทดสอบหาค่ายุบตัว (Slump Test) เป็นวิธีที่ใช้กันมานานและนิยมมากที่สุดเพราะทำได้ง่าย ใช้เวลาสั้น ๆ เหมาะสำหรับการทดสอบคอนกรีตในภาคสนาม เครื่องมือประกอบด้วยกรวยตัดและเหล็กกระทุ้งดังรูปที่ 2.2 กรวยตัดตอนบนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม. ตอนล่างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 203 มม. สูง 305 มม. มีหูจับ และมีแผ่นเหล็กยื่นออกมาให้เท้าเหยียบทั้งสองข้าง ส่วนเหล็กกระทุ้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 600 มม. ปลายกลมมน

วิธีทดสอบมีอยู่ในมาตรฐาน ASTM C143 [12] โดยบรรจุคอนกรีตสดลงในแบบ 3 ชั้น ๆ ละประมาณเท่ากันโดยปริมาตร แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้ง 25 ครั้งกระจายให้ทั่วถึงตลอดหน้าตัด เมื่อครบ 3 ชั้นจึงใช้เหล็กกระทุ้งปาดหน้าคอนกรีตให้ได้ระดับกับขอบกรวย เมื่อยกแบบขึ้นในแนวดิ่ง คอนกรีตภายใต้น้ำหนักของตัวเองจะยุบตัวลงมา ค่ายุบตัวที่ได้จากการทดสอบอาจมีความผิดพลาดจากความเสียดทานที่ผิวภายในของกรวยตัด ดังนั้นก่อนการทดสอบจึงต้องเช็ดผิวในของกรวยให้เปียกเพื่อลดความเสียดทาน การวัดค่ายุบตัวของคอนกรีตควรวัดให้ละเอียดถึง 5 มม. ตารางที่ 2.5 บอกระดับความสามารถเทได้ของคอนกรีตกับค่าการยุบตัว

ลักษณะการยุบตัวของคอนกรีตที่พบมีอยู่ 3 แบบคือ การยุบตัวจริง (True Slump) การยุบตัวเฉือน (Shear Slump) และการยุบตัวฮวบ (Collapse Slump) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การยุบตัวจริงเกิดจากการทรุดตัวของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักของตัวเอง คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุละเอียด

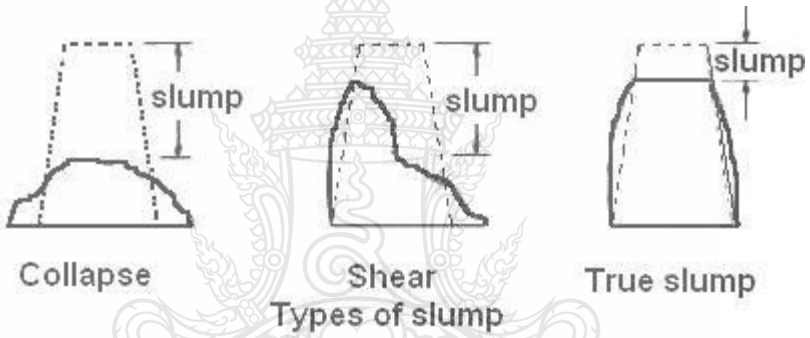
และหยาบที่ดีส่วนมากแล้วมีการทรุดตัวจริง การยุบตัวเฉือนเกิดจากการเลื่อนไถลของคอนกรีตส่วนบนในลักษณะเฉือนลงไปด้านข้าง หากการทดสอบในครั้งแรกได้ผลเป็นการยุบตัวเฉือนควรทำการทดสอบคอนกรีตนั้นอีกครั้งหนึ่ง เพราะการยุบตัวเฉือนอาจเกิดจากการยกกรวยขึ้นไม่ตรง แต่ถ้าการทดสอบอีกครั้งยังได้ผลเป็นการยุบตัวเฉือนเช่นเดิม แสดงว่าคอนกรีตดังกล่าวกระด้างไม่เกาะกันเพราะมีส่วนผสมของวัสดุหยาบ (หิน) ค่อนข้างมากหรือมีปูนซีเมนต์น้อยไป ซึ่งต้องทำการปรับส่วนผสมใหม่เพื่อให้ได้การยุบตัวจริง การยุบตัวฮวบเกิดเมื่อคอนกรีตมีน้ำผสมมากจนทำให้เหลวและยุบตัวลงไหลกองติดที่พื้น คอนกรีตที่มีการยุบตัวฮวบควรใช้ด้วยความระมัดระวังเพราะมีแนวโน้มจะเกิดการแยกตัวได้ง่ายถ้ามีการจี้เขย่าที่มากเกินไป

คอนกรีตที่มีส่วนผสมที่คล้ายกันจะมีความสามารถเทได้ใกล้เคียงกันเมื่อมีค่าการยุบตัวเท่ากัน แต่ในทางกลับกันเมื่อคอนกรีตสองชนิดมีค่าการยุบตัวเท่ากัน คอนกรีตทั้งสองอาจแตกต่างกันมาก เช่น คอนกรีตชนิดแรกมีค่าการยุบตัวต่ำเพราะกระด้างและมีน้ำผสมอยู่น้อย และคอนกรีตอีกชนิดหนึ่งมีค่าการยุบตัวต่ำเช่นกันแต่มีการเกาะตัวดี การทดสอบค่าการยุบตัวไม่สามารถแยกแยะความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวต่ำ เช่น มีค่าการยุบตัวเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงต้องวัดความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวต่ำมากด้วยวิธีอื่น

ตารางที่ 2.5 ค่ายุบตัวและค่าคอมแพคติงแฟคเตอร์ของคอนกรีตที่มีมวลรวม 19 และ 38 มม. [13]

ระดับความสามารถทำงานได้	ค่าการยุบตัว (มม.)	ค่าคอมแพคติงแฟคเตอร์
ต่ำมาก	0-25	0.78
ต่ำ	25-50	0.85
ปานกลาง	50-100	0.92
สูง	100-175	0.95

รูปที่ 2.2 กรวย เหล็กกระทุ้ง และถาดรอง สำหรับทดสอบค่าการยุบตัว



รูปที่ 2.3 ลักษณะการยุบตัวของคอนกรีต [14]

2.1.7 การก่อตัวของคอนกรีต

การก่อตัวของคอนกรีต (Setting Time of Concrete) ไม่สามารถประมาณได้จากการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์เพราะมีค่าแตกต่างกันมากพอสมควร ดังนั้นจึงต้องวัดระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ซึ่งจะช่วยในการวางแผนก่อสร้าง การลำเลียง การขนส่ง และการเทคอนกรีตเข้าแบบ และสามารถใช้วัดความมีประสิทธิภาพของสารผสมเพิ่มจำพวกสารหน่วงและสารเร่งการก่อตัวของคอนกรีต

รูปที่ 2.4 เป็นเครื่องเพเนโตรมิเตอร์ (Penetrometer) และเข็มที่ใช้สำหรับทดสอบหาการก่อตัวของคอนกรีต การก่อตัวของคอนกรีตสามารถหาได้โดยการวัดความต้านทานการทะลวง (Penetration Resistance) ของมอร์ต้าร์ ซึ่งได้จากการร่อนคอนกรีตที่ต้องการทดสอบผ่านตะแกรงเบอร์ 4 โดยเอามวลรวมหยาบออก วิธีนี้ใช้ได้กับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวมากกว่าศูนย์ วิธีการทดสอบ

มีอยู่ในมาตรฐาน ASTM C403 [15] ภายหลังการร่อนเอามวลรวมหยาบออกจึงทำโดยการบรรจุมอร์ต้าร์ในภาชนะรูปทรงกระบอกหรือรูปลูกบาศก์ขนาดไม่ต่ำกว่า 15 ซม. เพื่อให้สามารถใช้เข็มขนาดต่าง ๆ เพื่อทำการทดสอบได้อย่างน้อย 10 ครั้ง เลือกขนาดเข็มให้พอเหมาะกับความแข็งแรงของมอร์ต้าร์ ใส่แรงกดในแนวดิ่งลงบนเครื่องมือวัดความต้านทานการทะลวงอย่างสม่ำเสมอจนเข็มสามารถทะลวงลงในมอร์ต้าร์ลึก 1 นิ้วภายใน 10 วินาที ความต้านทานการทะลวงคำนวณได้จากแรงกดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของเข็ม สำหรับคอนกรีตธรรมดาจะทำการทดสอบครั้งแรกในเวลาประมาณ 3 ถึง 4 ชั่วโมงหลังการผสม และทุกชั่วโมง หรือทุกครึ่งชั่วโมงหลังจากนั้น สำหรับคอนกรีตที่ใส่สารเร่งการก่อตัวจะทำการทดสอบครั้งแรกในเวลา 1 ถึง 2 ชั่วโมงหลังการผสมและทุกครึ่งชั่วโมงหรือทุก 15 นาที หลังจากนั้น

รูปที่ 2.4 เครื่องเพเนโตรมิเตอร์และเข็ม ที่ใช้สำหรับทดสอบหาการก่อตัวของคอนกรีต [16]

เวลาสำหรับการก่อตัวระยะต้นคือ เวลานับตั้งแต่ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงเวลาที่มอร์ต้าร์มีความต้านทานการทะลวง 3.5 เมกะปาสกาล (500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และเวลาสำหรับการก่อตัวสุดท้ายคือเวลานับตั้งแต่ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงเวลาที่มอร์ต้าร์มีความต้านทานการทะลวง 27.6 เมกะปาสกาล (4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากกราฟของความต้านทานการทะลวงและเวลา

2.1.8 กำลังของคอนกรีต

2.1.8.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

รูปทรงของคอนกรีตที่นิยมใช้ในการทดสอบเพื่อหากำลังอัดของคอนกรีต มี 2 แบบ คือ รูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก

1) คอนกรีตรูปลูกบาศก์

แบบหล่อคอนกรีตรูปลูกบาศก์เป็นแบบเหล็กขนาด 15 ซม. ทำจากเหล็กหล่อหรือเหล็กเหนียว ผิวเรียบ และสามารถป้องกันไม่ให้น้ำปูนรั่วออกจากแบบในระหว่างเท หรือมีคอนกรีตอยู่ในแบบ ก่อนการหล่อคอนกรีตจะใช้น้ำมันทาบาง ๆ ที่ด้านในของแบบหล่อเพื่อให้สามารถถอดแบบได้ง่ายขึ้น การทาน้ำมันมากเกินไปจะทำให้คอนกรีตผสมกับน้ำมันส่วนเกินทำให้มีปัญหาเรื่องการแข็งตัวและลดกำลังของคอนกรีต

การหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ใช้มาตรฐาน BS 1881 Part 108 [17] โดยใส่คอนกรีตสดลงในแบบมาตรฐานขนาด 15x15x15 ซม.^{3} จำนวน 3 ชั้น แต่ละชั้นให้เขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบโต๊ะหรือกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งอย่างน้อย 35 ครั้ง เหล็กกระทุ้งมีน้ำหนัก 1.8 กก. ยาว 38 ซม. หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.5 ซม. กระทุ้งคอนกรีตอย่างเต็มที่เพื่อให้เป็นตัวแทนของคอนกรีตที่หล่อในอาคารต่าง ๆ ซึ่งได้รับการกระทุ้งหรือเขย่าให้แน่นอย่างเต็มที่เช่นเดียวกัน แต่การกระทุ้งจะต้องไม่มากจนทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัว ภายหลังจากการกระทุ้งเรียบร้อยแล้วจึงปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ ทิ้งคอนกรีตไว้ 24 ± 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 15 ถึง 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 จากนั้นถอดแบบออกและนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง18 ถึง 22 องศาเซลเซียส การทดสอบนิยมทำเมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน ซึ่งมักเป็นอายุที่ใช้ในการออกแบบ แต่ทั้งนี้ยังสามารถทำการทดสอบที่อายุอื่นเช่นที่ 3, 7, 14 และ 90 วัน ก็ได้ หากทำการออกแบบกำลังของคอนกรีตที่ใช้งานตามอายุดังกล่าว

การทดสอบกำลังอัดใช้คอนกรีตที่ผ่านการบ่มและอยู่ในสภาพเปียก โดยใช้หน้าที่เรียบของคอนกรีต 2 ด้านตรงกันข้ามเป็นด้านรับแรง (ดูรูปที่ 2.5) ดังนั้นผิวหน้าด้านที่ปาดให้เรียบจะตั้งฉากกับแกนของแรงกด การให้น้ำหนักกระทำแก่คอนกรีตใช้อัตราคงที่ที่ทำให้เกิดความเค้นเท่ากับ 0.40 เมกะปาสกาลต่อวินาที จนกระทั่งคอนกรีตวิบัติและไม่สามารถรับแรงที่สูงขึ้นได้ต่อไปอีก การให้อัตรากดต่อคอนกรีตที่เร็วมาก ๆ จะทำให้กำลังที่ทดสอบได้สูงกว่าความเป็นจริง และในทางกลับกันการให้อัตรากดที่ช้ามากจะทำให้กำลังที่ทดสอบได้ต่ำกว่าความจริง

2) คอนกรีตรูปทรงกระบอก

แบบหล่อมาตรฐานสำหรับเตรียมตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ทำจากเหล็กมีความแข็งแรงผิวด้านในเรียบ สามารถคงรูปทรงกระบอก และสามารถป้องกันน้ำปูนไม่ให้รั่วออกมาจากแบบหล่อได้

มาตรฐาน ASTM C192 [18] ได้กำหนดให้หล่อคอนกรีตลงแบบมาตรฐานเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีปริมาตรคอนกรีตเท่า ๆ กัน แต่ละชั้นกระทุ้ง 25 ครั้ง ด้วยเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 61 ซม. โดยชั้นที่ 2 และ 3 ต้องกระทุ้งให้ทะลุลงไปยังชั้นที่ต่ำกว่าประมาณ 2.5 ซม. เพื่อให้เกิดความต่อเนื่อง เมื่อครบทั้ง 3 ชั้น แล้วจึงทำการปาดผิวหน้าของคอนกรีตให้เรียบ และทิ้งคอนกรีตไว้ที่อุณหภูมิระหว่าง 16 ถึง 27 องศาเซลเซียส โดยไม่รบกวนจนคอนกรีตแข็งตัว การถอดแบบจะทำเมื่อคอนกรีตมีอายุ 24 ± 8 ชั่วโมงและนำไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส และทำการทดสอบกำลังตามอายุที่กำหนด

เนื่องจากการหล่อคอนกรีตแบบนี้ผิวด้านบนของคอนกรีตจะไม่เรียบพอ ASTM C617 [19] ระบุให้ผิวหน้าของคอนกรีตที่นำมาทดสอบต้องเรียบและแตกต่างกันไม่เกิน 0.05 มม. ซึ่งอาจทำได้โดยการขัดผิวให้เรียบแต่เป็นวิธีที่สิ้นเปลืองและใช้เวลามาก ดังนั้นจึงนิยมใช้การเคลือบหัว (Capping) คอนกรีต ซึ่งมีอยู่ 3 แบบ ได้แก่ การใช้ซีเมนต์เพสต์ข้นเททับบนหัวคอนกรีตตอนเทเสร็จใหม่ ๆ การใช้กำมะถัน และปูนปลาสเตอร์กำลังสูงเคลือบหัวคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว การทดสอบคอนกรีตโดยไม่ทำให้ผิวหน้าเรียบจะทำให้กำลังที่ทดสอบมีค่าต่ำกว่าที่ควรจะเป็นผิวหน้าของคอนกรีตที่ไม่เรียบหรือเอียง 0.25 มม. อาจทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงได้ถึงร้อยละ 33 และจะลดลงมากกว่านี้เมื่อเป็นคอนกรีตกำลังสูง กำลังของวัสดุที่ใช้เคลือบหัวคอนกรีตควรเท่ากับหรือใกล้เคียงกับกำลังอัดของคอนกรีตที่ทดสอบ ผิวเคลือบหัวคอนกรีตควรบางประมาณ 1.5 ถึง 3 มม. ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับแรงของคอนกรีตภายใต้การทดสอบกำลังอัด นอกจากนี้ภายหลังการเคลือบหัวคอนกรีตแล้วต้องทิ้งให้วัสดุที่เคลือบคอนกรีตแข็งตัว เช่น ถ้าวัสดุเคลือบผิวเป็นกำมะถันควรทิ้งให้แข็งตัวอย่างน้อย 2 ชั่วโมง มิฉะนั้นเมื่อทดสอบการรับกำลังอัดคอนกรีตผิวเคลือบที่ยังไม่แข็งตัวเต็มที่จะแตกเสียหายก่อนทำให้กำลังอัดที่ได้ต่ำลงกว่าความเป็นจริง โดยทั่วไปนิยมใช้กำมะถันเคลือบหัวคอนกรีตสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังไม่สูงมาก กรณีที่คอนกรีตมีกำลังสูงมากจะให้การขัดผิวหน้าให้เรียบ กำมะถันที่ใช้เคลือบผิวหน้าไม่ควรนำกลับมาใช้ใหม่หลายครั้ง เพราะจะมีเศษคอนกรีต ฝุ่น และทรายปนกลับมาทำให้คุณภาพของกำมะถันลดลง นอกจากนี้กำมะถันที่นำกลับมาใช้อีกหรือที่เหลืออยู่ในหม้อต้มและผ่านการต้มหลายครั้งจะมีกำลังต่ำลง ดังนั้นจึงควรตรวจสอบว่ากำมะถันที่ใช้ไม่มีปัญหาดังกล่าว

รายละเอียดของการเคลือบหัวคอนกรีตมีอยู่ในมาตรฐาน ASTM C617 [19] ในการเคลือบด้วยกำมะถันจะใช้แบบเหล็กผิวเรียบและแท่นสำหรับตั้งคอนกรีตให้ตรงดังแสดงในรูปที่ 2.6 การเคลือบหัวทำโดยการเทกำมะถันเหลวซึ่งต้มที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียสลงบนแบบเหล็กที่ทาน้ำมันเครื่องบาง ๆ เพื่อป้องกันกำมะถันติดผิวหน้าแบบเหล็กจากนั้นจึงคว่ำหัวคอนกรีตที่ต้องการเคลือบลงบนกำมะถันเหลวและให้ตั้งฉากกับผิวหน้าของแบบเหล็ก หลังจากนั้นรอให้กำมะถันแข็งตัวซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 ถึง 2 นาที สามารถดึงคอนกรีตที่มีกำมะถันเคลือบหัวอยู่ออกมาจากแบบ ส่วนการเคลือบโดยใช้ปูนปลาสเตอร์กำลังสูงจะใช้แผ่นแก้วทาด้วยน้ำมันบาง ๆ กดปูนปลาสเตอร์ลงให้เรียบบนผิวหน้าคอนกรีตที่ต้องการเคลือบหัว และเมื่อปูนปลาสเตอร์แข็งตัวจะสามารถเอาแผ่นแก้วออกได้

รูปที่ 2.5 คอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดโดยเลือกด้านที่เรียบ 2 ด้านตรงข้ามกันมาทดสอบ [7]

รูปที่ 2.6 อุปกรณ์เคลือบผิวหน้าคอนกรีต และคอนกรีตที่เคลือบผิวแล้ว [7]

ปัจจุบันในประเทศไทยมีการใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกในการทดสอบกำลังอัดมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กนิยมใช้มาตรฐานตามแบบ

อเมริกันเป็นหลักโดยคิดเป็นร้อยละ 70 และคอนกรีตลูกบาศก์ประมาณร้อยละ 30 แม้ว่าคอนกรีตรูปทรงกระบอกจะเป็นที่นิยมและใช้เป็นมาตรฐานในการคำนวณและออกแบบก็ตาม แต่ในทางปฏิบัติพบว่าคอนกรีตรูปลูกบาศก์มีข้อดีหลายอย่าง เช่น คอนกรีตรูปลูกบาศก์ใช้คอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตรูปทรงกระบอกจึงมีน้ำหนักเบากว่า (คอนกรีตรูปลูกบาศก์หนักประมาณลูกละ 8.5 กิโลกรัม ขณะที่คอนกรีตรูปทรงกระบอกหนักประมาณ 13 กิโลกรัม) สามารถเก็บและบ่มในน้ำโดยใช้พื้นที่การบ่มที่น้อยกว่ากรณีของคอนกรีตรูปทรงกระบอก นอกจากนี้ในการทดสอบกำลังอัดยังสามารถใช้ผิวด้านที่เรียบทำการทดสอบได้ทันที แต่ถ้าเป็นคอนกรีตรูปทรงกระบอกต้องหล่อหัวเคลือบหน้าคอนกรีตให้เรียบก่อนทำการทดสอบ

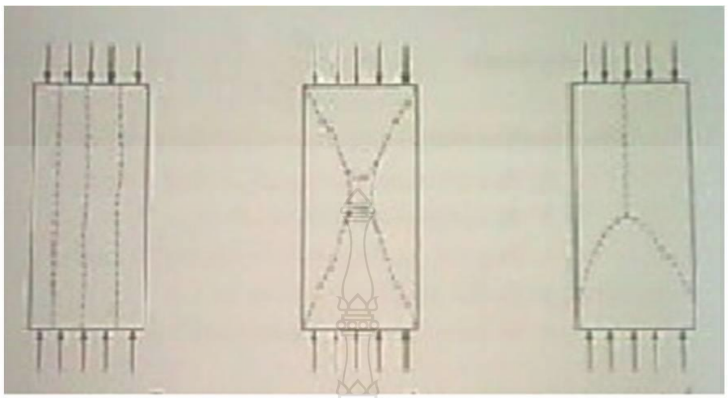
อย่างไรก็ตามคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีข้อดีกว่าคอนกรีตรูปลูกบาศก์หลายประการ เช่น การหล่อและการทดสอบในแนวตั้งเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นลักษณะของการเทและรับแรงของโครงสร้างคอนกรีตในงานจริงโดยทั่วไป ดังนั้นจึงถือว่ามีความเหมือนจริงมากกว่าคอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่ทิศทางการเทและการทดสอบคอนกรีตจะตั้งฉากกัน นอกจากนี้คอนกรีตรูปทรงกระบอกยังมีผลกระทบจากขนาดของหินน้อยกว่าและการกระจายของหน่วยแรงสม่ำเสมอกว่าคอนกรีตรูปบาศก์ เนื่องจากมีผลกระทบของการยึดที่ปลายด้านบนและด้านล่างของคอนกรีตในระหว่างการทดสอบน้อยกว่า

3) การวิบัติของคอนกรีตภายใต้แรงอัด

คอนกรีตภายใต้การรับแรงอัดจะขยายตัวด้านข้าง ขณะที่คอนกรีตด้านบนและล่างที่ติดกับแท่นของเครื่องทดสอบจะไม่สามารถขยายตัวด้านข้างได้ เนื่องจากคอนกรีตส่วนที่ไกลจากปลายและไม่ถูกยึดรั้งสามารถขยายตัวด้านข้างได้และทำให้เกิดรอยแตกร้าวการขยายตัวตัวเมื่อถึงความเครียดดึงประลัย (Ultimate Tensile Strain) จะทำให้รอยแตกขยายตัวตามแกนของแรงอัด ซึ่งในบางครั้งรอยแตกดังกล่าวจะทำให้คอนกรีตวิบัติโดยตรง

จากการสังเกตพบว่าการวิบัติของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีความสูงมากกว่าความกว้างสองเท่า บางครั้งจะเป็นแบบผ่าหรือแบบคอลัมน์ (Splitting or Columnar Failure) ที่มีรอยแตกตามแกนอัดดังแสดงในรูปที่ 2.7 ก. โดยทั่วไปภายใต้การยึดรั้งโดยแรงเสียดทานที่ปลาย นอกจากคอนกรีตจะรับความเค้นอัดแล้วยังต้องรับความเค้นอัดแล้วยังต้องรับความเค้นเฉือนด้วยอิทธิพลของการยึดรั้งที่ปลายทำให้คอนกรีตที่บริเวณปลายจะมีลักษณะเป็นรูปกรวยที่ยังไม่ถูกทำลายถึงแม้ว่ารอยแตกจะเริ่มที่บริเวณไกลจากปลายและเป็นในแนวแกนอัดแต่บริเวณปลายจะถูกยึดรั้ง ดังนั้นลักษณะการเสียหายของคอนกรีตที่บริเวณรูปทรงกระบอกจะออกมาเป็นรูปกรวยเป็นส่วนใหญ่ และในบางครั้งอาจพบลักษณะการวิบัติเป็นแบบผสมระหว่างรูปกรวยและแบบผ่า ดังแสดงใน

รูป 2.7 ข. และ ค. กรณีที่ความสูงของแท่งคอนกรีตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างดังในกรณีของคอนกรีตลูกบาศก์ที่มีความสูงเท่ากับความกว้าง การเกิดการวิบัติภายใต้แรงอัดมีลักษณะเป็นรูปกรวย



รูปที่ 2.7 รอยแตกร้าวของคอนกรีตภายใต้แรงอัดที่พบโดยทั่วไป [7]

2.1.8.2 การทดสอบแรงดึงของคอนกรีต

การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยตรงไม่นิยมกัน เนื่องจากปัญหาในการยึดจับตัวอย่างคอนกรีตเวลาทดสอบ และการดึงที่ไม่เยื้องศูนย์เลยทำได้ยาก [20] นอกจากนี้ยังให้ค่าที่ไม่แตกต่างจากการทดสอบแรงดึงโดยอ้อมมากนัก ดังนั้นจึงนิยมใช้การทดสอบเพื่อหาแรงดึงโดยอ้อมเพราะทำได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว และให้ผลการทดสอบที่น่าพอใจ การทดสอบที่นิยมใช้กันได้แก่ การทดสอบแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก และการทดสอบแรงดึงโดยวิธีดัดหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าโมดูลัสแตกร้าว

1) การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีผ่าซีก

การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีผ่าซีก (Splitting Tensile Test) พัฒนาขึ้นในประเทศบราซิล ASTM C496 [21] ได้กำหนดการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.8 และ 2.9 ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. วางนอนเพื่อรับแรงกดที่ส่งผ่านจากแผ่นไม้อัดหนา 3 มม. แรงอัดที่ส่งผ่านไม้อัดจะทำให้เกิดแรงดึงขึ้น ซึ่งเกือบคงที่ตลอดหน้าตัด โดยมีแรงอัดที่ผิวสัมผัสระหว่างไม้อัดกับคอนกรีต แต่เนื่องจากคอนกรีตรับแรงอัดได้สูง ดังนั้นแรงอัดที่เกิดขึ้นจึงยังไม่ก่อให้คอนกรีตเสียหาย แต่แรงดึงซึ่งเกิดขึ้นจะเกินกว่าแรงดึงที่คอนกรีตรับได้ คอนกรีตจึงแตกออกเป็น 2 ซีก ดังแสดงในรูปที่ 2.10

การคำนวณค่าแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีผ่าซีก สามารถหาได้จากสมการที่ 2.9 ส่วนแรงอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตจะเป็นไปตามสมการที่ 2.10 ซึ่งสมการทั้งสองใช้ทฤษฎีอีลาสติก (Theory of Elasticity) ในการวิเคราะห์

แรงดึงของคอนกรีต $$\sigma t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (2.9)$$

แรงอัดของคอนกรีต $$\sigma c = \frac{2P}{\pi LD}\left[\frac{D^2}{r(D-r)} - 1\right] \quad (2.10)$$

เมื่อ σt คือ แรงดึงของคอนกรีตตามแนวราบโดยวิธีผ่าซีก (กก./ซม.^{2})

σc คือ แรงอัดของคอนกรีตตามแนวตั้งโดยวิธีผ่าซีก (กก./ซม.^{2})

P คือ แรงกดประลัยที่กระทำต่อคอนกรีต (กก.)

L คือ ความยาวของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (ซม.)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีต (ซม.)

R คือ ระยะทางที่วัดจากผิวด้านบนของคอนกรีต (ซม.)

แรงดึงโดยวิธีผ่าซีกจะมีค่าสูงกว่าแรงดึงที่ทดสอบโดยตรงประมาณร้อยละ 15 ขณะที่แรงดึงโดยวิธีผ่าซีกมีค่าประมาณร้อยละ 50 ถึง 75 ของแรงดึงโดยวิธีดัด (โมดูลัสแตกร้าว) สำหรับแรงดึงโดยวิธีผ่าซีกเมื่อเป็นคอนกรีตกำลังสูงมีค่าร้อยละ 10 ถึง 12 ในช่วงอายุ 3 วัน หลังจากนั้นจะมีค่าต่ำลงเล็กน้อย โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 8 ถึง 9 ของกำลังอัดเมื่ออายุ 60 ถึง 180 วัน [22]

2) การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีดัด

รายละเอียดการทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีดัด (Bending Method) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการทดสอบโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture) ของคอนกรีตมีอยู่ใน ASTM C78 [23] การทดสอบใช้คานคอนกรีตขนาด 15×15×30 ซม. โดยเทคอนกรีต 2 ชั้น แต่ละชั้นกระทุ้งจำนวน 60 ครั้ง แต่ละครั้งครอบคลุมพื้นที่ 12.5 ซม^2 (หรือ 2 นิ้ว^2) คอนกรีตที่ค่อนข้างข้นหรือเหนียวมากให้ใช้เครื่องเขย่า ภายหลังจากหล่อคอนกรีตประมาณ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบและนำไปบ่ม การทดสอบการรับแรงดึงด้วยวิธีดัดนิยมใช้การกดแบบ 3 จุด (Third Point Loading) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12

การให้น้ำหนักกดแก่ตัวอย่างจะให้ในอัตรา 860 ถึง 1200 กิโลปาสกาลต่อนาที จนตัวอย่างหักออกจากกัน โดยทั่วไปคานมักจะหักเป็น 2 ท่อนตรงบริเวณช่วงระหว่าง L/3 ถึง 2L/3 ซึ่งบริเวณดังกล่าวมีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดและไม่มีแรงเฉือน และถือว่าคานแตกหักโดยโมเมนต์ล้วน ๆ การคำนวณกำลังดัด (แรงดึง) ประลัยที่ทำให้คานหักออกจากกันสามารถคำนวณจากสมการ 2.11 และกรณีที่รอยแตกหักของตัวอย่างคานไม่อยู่ในช่วงระหว่าง L/3 ถึง 2L/3 ของคานแต่ไม่เกินร้อยละ 5 ของช่วงความยาวช่วงคาน ให้ใช้สมการที่ 2.12 ในการคำนวณ

กำลังดัดของคอนกรีต $$\sigma = \frac{PL}{bd^2} \quad (2.11)$$

กำลังดัดของคอนกรีต $$\sigma = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (2.12)$$

เมื่อ σ คือ กำลังดัด (แรงดึง) ประลัยของคอนกรีต (กก./ซม.^{2})

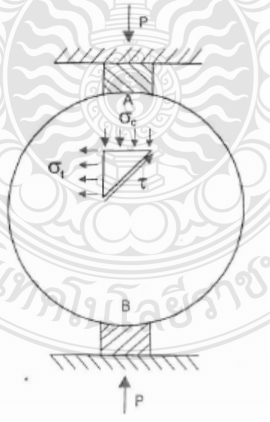
P คือ น้ำหนักประลัยที่กระทำให้คอนกรีตแตกหัก (กก.)

L คือ ช่วงความยาวของคานระหว่างจุดรองรับกับจุดให้น้ำหนัก (ซม.)

b คือ ความกว้างของคาน (ซม.)

d คือ ความลึกของคาน (ซม.)

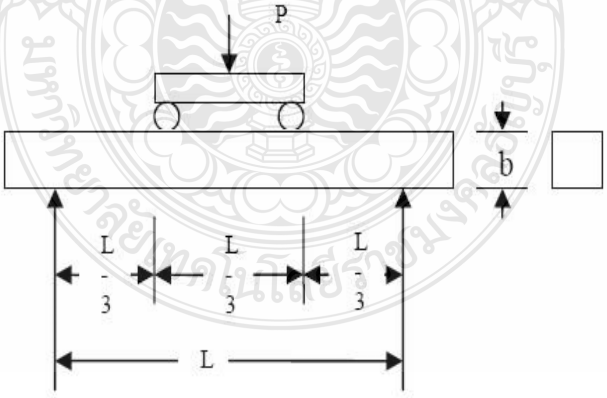
a คือ ระยะเฉลี่ยจากจุดรองรับถึงจุดแตกหักของคาน (ซม.)



รูปที่ 2.8 การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีผ่าซีก [7]

รูปที่ 2.9 การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีผ่าซีก [24] (ต่อ)

รูปที่ 2.10 การแตกของคอนกรีตเนื่องจากการทดสอบแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก [24]



รูปที่ 2.11 การทดสอบการรับแรงดึงของคานคอนกรีตโดยวิธีดัด [24]

รูปที่ 2.12 การทดสอบการรับแรงดึงของคานคอนกรีตโดยวิธีดัด [24] (ต่อ)

2.1.9 การหดตัวแบบออโตจีนัส

การหดตัวของคอนกรีตมักจะเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ การหดตัวของคอนกรีตมีหลายประเภทเกิดขึ้นในช่วงเวลาต่าง ๆ กัน และเกิดขึ้นจากสาเหตุที่แตกต่างกันไป ชนิดของการหดตัวอาจสรุปได้เป็น 4 ชนิด ดังต่อไปนี้

- การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Chemical Shrinkage หรือ Hydration Shrinkage)
- การหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage)
- การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)
- การหดตัวเนื่องจากคาร์บอเนชั่น (Carbonation Shrinkage)

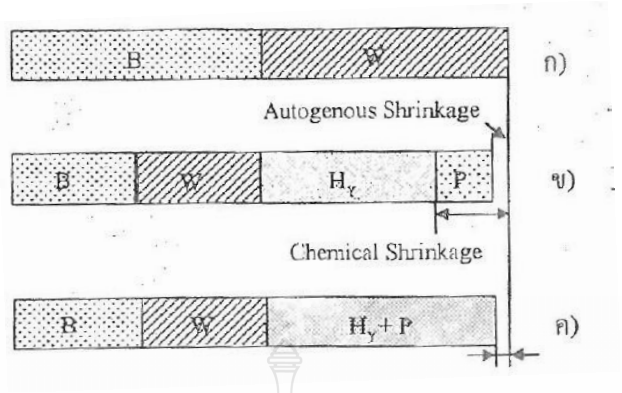
การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงก่อนการก่อตัว เป็นการหดตัวที่มักไม่ก่อให้เกิดผลเสียหายต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว และมักไม่ค่อยมีผลต่อปริมาตรโดยรวมของคอนกรีต เนื่องจากจะเกิดมากในช่วงเวลาเริ่มแรกก่อนเวลาก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตมักจะสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้โดยไม่เกิดหน่วยแรงและลักษณะของการหดตัวจะเป็นการสร้างช่องว่างในเจล (Gel Pores) ของผลิตผลของไฮเดรชั่น ซึ่งจะเป็นผลทางจุลภาค (Microscopic Volume Reduction) จึงไม่ค่อยมีผลต่อปริมาตรของคอนกรีตโดยรวม ดังนั้นการหดตัวประเภทนี้ในช่วงก่อนการก่อตัวของคอนกรีตจึงไม่ค่อยได้รับความสนใจมากนัก แต่ในส่วนที่หดตัวหลังจากคอนกรีตก่อตัวสุดท้ายแล้ว จะเป็นปัญหาและจะคิดรวมอยู่ในการหดตัวแบบออโตจีนัส [25]

การหดตัวอีก 3 แบบที่เหลือเป็นการหดตัวชนิดที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยรวมของคอนกรีต ซึ่งจะนำไปสู่การแตกร้าวได้ถ้ามีการยึดรั้ง และจำเป็นต้องออกแบบคอนกรีตให้คงทน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการหดตัวแบบแห้ง

2.1.9.1 กลไกของการหดตัวแบบออโตจีนัส

การหดตัวแบบออโตจีนัสเป็นการหดตัวที่ส่วนหนึ่งเป็นการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Chemical Shrinkage) ที่เกิดหลังจากการก่อตัวขั้นสุดท้ายของคอนกรีตรวมกับอีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นในช่องว่างคะปิลลารี (Capillary Pores) ในซีเมนต์เพสต์เนื่องจากความชื้นบางส่วนถูกใช้ไปในปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ ทำให้เกิด Capillary Suction ขึ้นในช่องว่างคะปิลลารี มีผลให้คอนกรีตหดตัวจากแรง Capillary Suction นี้ วัสดุประสานในที่นี้หมายความรวมถึงปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานทั้งหลาย เช่น เถ้าลอย เถ้าตะกรันเตาถลุงเหล็ก และซิลิกาฟูม เป็นต้น การหดตัวแบบออโตจีนัสแตกต่างจากการหดตัวแบบแห้งตรงที่ไม่ได้มีการสูญเสียความชื้นในคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อม แต่เป็นการสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีตเอง การหดตัวแบบออโตจีนัสเกิดขึ้นทันทีหลังจากที่ผสมคอนกรีตเสร็จ แต่ในทางปฏิบัติจะมีผลต่อปริมาตรหลังจากที่เทคอนกรีตเสร็จแล้ว เนื่องจากการหดตัวในช่วงก่อนการเทคอนกรีตจะไม่มีผลต่อปริมาตรของโครงสร้างที่จะเท และจะมีผลในทางโครงสร้างหลังจากที่คอนกรีตก่อตัวแล้ว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อนการก่อตัวจะไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงในคอนกรีต ดังนั้นจึงนิยมวัดค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสโดยเริ่มต้นจากระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น

ในอดีตการหดตัวแบบนี้ไม่ได้รับความสนใจมากนัก เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้กันในอดีตมักเป็นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง คอนกรีตเหล่านี้จะมีปริมาณช่องว่างคะปิลลารี (Capillary Pores) มาก มีขนาดใหญ่และต่อเนื่อง ดังนั้นความชื้นในคอนกรีตจึงสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง และน้ำจากการบ่มก็สามารถเข้าถึงภายในคอนกรีตได้ ทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสในคอนกรีตเหล่านี้มีค่าต่ำ จนไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาประกอบในการออกแบบ แต่ในทางตรงกันข้ามในปัจจุบันได้มีการพัฒนาคอนกรีตชนิดใหม่ ๆ ขึ้นมาหลายชนิด ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำและมีปริมาณเพสต์มาก เช่น คอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete) และคอนกรีตที่ไม่ต้องใช้เครื่องเขย่า (Self-Compacting Concrete) เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาแล้ว คอนกรีตเหล่านี้จะมีปริมาณช่องว่างคะปิลลารีที่น้อยกว่า มีขนาดเล็กกว่า และมีความต่อเนื่องของช่องว่างคะปิลลารีน้อยกว่าหรืออีกนัยหนึ่ง มีค่าความซึมน้ำต่ำมาก ดังนั้นเมื่อความชื้นในช่องว่างคะปิลลารีถูกใช้ไปในปฏิกิริยา จึงเป็นการยากที่ความชื้นจากส่วนอื่น หรือความชื้นจากการบ่มจะเข้ามาเสริมในบริเวณดังกล่าวได้ จึงทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสในคอนกรีตเหล่านี้สูงจนไม่สามารถละเลยได้ในการออกแบบ



การหดตัวทางมหภาค

(การหดตัวแบบออโตจีนัส)

รูปที่ 2.13 แบบจำลองการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและออโตจีนัส [1]

ซึ่ง B : วัสดุประสาน

W : น้ำ

P : ช่องว่างที่แทรกตัวอยู่ในผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

Hv : ผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

ในรูปที่ 2.13 อธิบายถึงแบบจำลองการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีและออโตจีนัส โดย ก) ปริมาตรของวัสดุประสานและน้ำ ก่อนทำการผสม ข) ปริมาตรของซีเมนต์เพสต์หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นไปแล้วบางส่วน ปริมาตรที่ลดลงทั้งหมดนี้คือ การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical Shrinkage) ซึ่งมักไม่มีผลต่อปริมาตรโดยรวมของคอนกรีต เพราะการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเกิดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรก ๆ และการหดตัวที่เกิดขึ้นมักจะเกิดเป็นช่องว่างภายในผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น การหดตัวแบบนี้เป็นผลทางจุลภาค (Microscopic Volume Reduction) ซึ่งไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงขึ้นในคอนกรีต หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ความชื้นบางส่วนจะถูกดึงจากช่องว่างคะปิลลารี เพื่อไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เรียกขบวนการนี้ว่า “การสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีต” ถ้าไม่มีน้ำเข้าไปทดแทนในส่วนที่นำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวขึ้น เรียกว่าการหดตัวแบบออโตจีนัส ซึ่งการหดตัวแบบนี้ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้น เป็นผลทางมหภาค (Macroscopic Volume Reduction) เมื่อหน่วยแรงดึงนี้มีค่ามากกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต จะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวขึ้น ค) แสดงส่วนที่หดตัวทางมหภาค โดยส่วนที่หดตัวทางจุลภาคจะเป็นช่องว่างที่เกิดขึ้นในผลิตผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

และไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงขึ้นในคอนกรีต ส่วนการหดตัวทางมหภาคเป็นการหดตัวที่มีผลต่อปริมาตรโดยรวมของคอนกรีต ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในคอนกรีต

การหดตัวแบบนี้จะมีค่ามากขึ้น ถ้าคอนกรีตยิ่งมีความซึมน้ำต่ำ เช่น คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมหรือวัสดุปอซโซลานที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของปูนซีเมนต์มาก เช่น เถ้าลอยที่ผ่านการคัดขนาด เป็นต้น คอนกรีตที่ใช้เถ้าตะกรันเตาถลุงเหล็กซึ่งมักจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก มักจะมีการหดตัวแบบออโตจีนัสสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นเถ้าตะกรันที่บดจนละเอียดมาก สำหรับปูนซีเมนต์ ได้มีการพบว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง จะมีการหดตัวแบบออโตจีนัสสูง การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบนี้ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีการยึดรั้งเกิดขึ้น ดังนั้นบางครั้งอาจพบการแตกร้าวขึ้นภายในคอนกรีต โดยที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าจากบริเวณผิวของคอนกรีตได้ เนื่องจากคอนกรีตข้างในหดตัว แต่คอนกรีตบริเวณผิวซึ่งได้รับน้ำจากการบ่มที่เพียงพอนั้นไม่หดตัว

2.1.9.2 บริเวณที่อาจจะเกิดรอยแตกร้าวจากการหดตัวแบบออโตจีนัส

บริเวณที่น้ำบ่มคอนกรีตไม่สามารถเข้าไปถึงได้อย่างเต็มที่ และเป็นบริเวณที่ถูกยึดรั้งด้วยสิ่งที่มีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่า เช่น ถูกยึดรั้งโดยเหล็กเสริม ถูกยึดรั้งโดยคอนกรีตเดิมที่เทไว้แล้ว หรือแม้แต่ถูกยึดรั้งโดยเนื้อคอนกรีตบริเวณผิวที่ได้รับการบ่มอย่างเพียงพอ เป็นต้น

2.1.9.3 ช่วงเวลาที่เกิดการหดตัวแบบออโตจีนัส

การหดตัวแบบออโตจีนัสจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ เนื่องจากการหดตัวแบบออโตจีนัสเกิดในขณะที่มีปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ จึงทำให้การหดตัวแบบนี้มีอัตราสูงในช่วงวันแรก ๆ และจะค่อย ๆ มีอัตราต่ำลงเมื่อระยะเวลายาวนานออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.14

รูปที่ 2.14 อัตราการหดตัวแบบออโตจีนัส [1]

2.1.9.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบออโตจีนัส

ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสมีดังต่อไปนี้

1) ความเร็วของการดำเนินปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

โดยมากถ้าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดเร็ว ก็จะทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสเกิดเร็วและสูงตามไปด้วย ดังนั้นการหดตัวแบบออโตจีนัสจะสูงขึ้น ถ้าอุณหภูมิการบ่มสูงขึ้นในปูนซีเมนต์ที่มีองค์ประกอบที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเร็วขึ้น เช่น มีปริมาณ C_3A สูง เป็นต้น

2) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ก็จะทำให้เกิดการหดตัวแบบออโตจีนัสสูงขึ้น เนื่องจากความซึมน้ำจะต่ำลงและขนาดของช่องว่างคะปิลลารี (Capillary Pores) ก็เล็กลงด้วย

3) ลักษณะของโครงสร้างช่องว่างในซีเมนต์เพสต์

ยิ่งช่องว่างมีขนาดเล็กและมีความไม่ต่อเนื่องก็จะทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสสูงขึ้น เนื่องจากน้ำอิสระจะเคลื่อนตัวไม่สะดวกและช่องว่างที่มีขนาดเล็กจะทำให้เกิดแรงดึงแบบคะปิลลารีสูง

2.1.9.5 ข้อเสนอแนะ วิธีการแก้ไข

1) ใช้เถ้าลอยผสม

จากการศึกษาพบว่าการใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นจะช่วยลดการหดตัวแบบออโตจีนัสได้ดียิ่งขึ้น และเถ้าลอยที่มีปริมาณ SO_3 สูงจะมีประสิทธิภาพสูง ในการช่วยลดการหดตัวแบบออโตจีนัส แต่อย่างไรก็ตามไม่ควรใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณ SO_3 สูงเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด [26]

2) ใช้สารช่วยการขยายตัว (Expansive Agent)

3) เลือกใช้ปูนซีเมนต์

พิจารณาเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A น้อย แต่มีปริมาณ C_2S มาก เช่น ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 2 หรือประเภทที่ 4

4) หลีกเลี่ยงการใช้ส่วนผสมคอนกรีต

พยายามหลีกเลี่ยงส่วนผสมคอนกรีตที่มีความซึมน้ำต่ำเกินความจำเป็นและมีปริมาณซีเมนต์เพสต์มากเกินความจำเป็น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

Sprung และ Siebel (1991) ได้ศึกษาพบว่าวัสดุเฉื่อย (Inert Material) สามารถใช้เพื่ออุดช่องว่างขนาดเล็กและสามารถเพิ่มกำลังอัดได้ โดยการปรับปรุงการอัดตัวของส่วนผสมขนาดเล็ก ซึ่งการใช้ผงหินปูนไม่ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นเมื่อบ่มนานขึ้น เมื่อผงหินปูนถูกเติมในปริมาณมากระหว่างร้อยละ 15 ถึง 25 กำลังอัดจะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Liversey (1991) ได้ศึกษาคอนกรีตที่มีความสามารถในการเทได้เท่ากัน พบว่าการใช้ผงหินปูน ร้อยละ 5 ส่งผลกระทบน้อยมากต่อคอนกรีต ผลของการใช้ผงหินปูน ร้อยละ 5 ได้แสดงให้เห็นว่ามีการเร่งกำลังอัดในช่วงต้น โดยเฉพาะถ้าปูนซีเมนต์มีความละเอียดมากขึ้น

Tazawa and Miyazawa (1993) ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการหดตัวออโตจีนัสของคอนกรีต จากผลการศึกษาพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และอัตราส่วนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น มีผลต่อการหดตัวออโตจีนัส โดยเฉพาะอย่างยิ่ง C_3A และ C_4AF เป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อการหดตัวออโตจีนัสอย่างมาก

J.D.Mathews (1994) ได้ศึกษาพบว่าการใช้ผงหินปูนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์จะไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตที่บ่มในอากาศจะมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่บ่มในน้ำ และคอนกรีตที่บ่มในน้ำปูนใสจะมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาเนื่องจากคอนกรีตที่บ่มในน้ำปูนใสมีการสูญเสียแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยกว่าในน้ำประปา

Rubio (1996) ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุเชื่อมประสานจากปูนขาวกับเถ้าแกลบ และปอซโซลานชนิดอื่นๆ เช่น เถ้าลอยและดินเหนียวคาโอลินไนท์ (Kaolonite) ผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มวัสดุเชื่อมประสานลงไปในปูนซีเมนต์ที่ทำจากปูนขาวกับเถ้าแกลบทำให้ก่อตัวช้าลง แต่ยังอยู่ในมาตรฐาน ASTM และกำลังรับแรงอัดน้อยลงเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ที่ทำจากปูนขาวและแกลบ นอกจากนี้ผลการทดสอบยังพบว่าสามารถต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดได้ดี สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างที่ต้องการความต้านทานต่อกรด เช่น งานพื้นที่โรงงานในอุตสาหกรรมอาหาร

Mak และคณะ (1998) ได้ศึกษาพบว่าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดและปริมาณ C_3S สูง จะทำให้การหดตัวของคอนกรีตในช่วงต้น (Early-Age Shrinkage) มีค่าสูง นอกจากนี้การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดจากผลของปฏิกิริยาของ C_3A มีค่ามากกว่าผลที่เกิดจาก C_3S ประมาณ 5 เท่า

Bissonnette และคณะ (1999) ได้ศึกษาพบว่าการหดตัวของเพสต์มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ จากขนาดของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ (50×50×400 มม. และ 4×8×32 มม.) พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่มีผลต่อค่าการหดตัวสูงสุดของตัวอย่าง จากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วงที่ใช้ทดสอบ (0.35-0.50) พบว่ามีความสัมพันธ์เพียงเล็กน้อยกับการหดตัว ในขณะที่ปริมาณเพสต์มีผลอย่างมากต่อการหดตัว

วิศิษฎ์ เดชพันธ์ (1999) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงหินปูนเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบคอนกรีตผสมผงหินปูน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์เป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายจะเร็วขึ้น เนื่องจากผลของความเร่งทางกายภาพ (physical acceleration) เกิดขึ้นในกรณีที่ผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ส่งผลให้อนุภาคปูนซีเมนต์กระจายตัวได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากความเร่งทางเคมี (chemical acceleration) เพราะผงหินปูนทำให้ค่าความเป็นด่างของน้ำสูงขึ้นทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น จากผลการทดลองยังพบอีกว่า ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากอนุภาคของผงหินปูนเป็นเหลี่ยมมาก อีกทั้งการแทนที่ด้วยผงหินปูนยังทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตผสมผงหินปูนจึงควรผสมสารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer)

โอภาส สาโรวาท และนพคุณ พุ่มอ่อน (2003) ได้ศึกษาคุณสมบัติคอนกรีตผสมผงหินปูน คุณสมบัติที่ศึกษาได้แก่ ค่าการยุบตัว กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่บ่มในน้ำ และบ่มในสารละลายทั้งการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ต่อคอนกรีตผสมผงหินปูน จากผลการทดสอบ พบว่าที่ปริมาณการผสมเพิ่มผงหินปูนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทำให้ค่าการยุบตัวลดลงตามลำดับ กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อผสมผงหินปูนที่ปริมาณร้อยละ 2, 4 และ 6 ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณผงหินปูนเป็นร้อยละ 8 และ 10 กำลังรับแรงอัดจะเริ่มลดลงโดยที่กำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา และกำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบคอนกรีตที่บ่มในน้ำ และที่บ่มในสารละลายคลอไรด์มีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกัน และการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ต่อคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเวลาและปริมาณผงหินปูนที่เพิ่มขึ้น

สุรชัย อำนวยพรเลิศ (2004) ได้ศึกษาผลของผงหินปูน และเถ้าลอยที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต โดยกำหนดปริมาณการแทนที่ผงหินปูน และ/หรือเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 18 ถึง 36 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.24, 0.27 และ 0.30 อัตราส่วนปริมาณเพสต์ต่อปริมาณช่องว่างต่ำสุดของมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.10, 1.20 และ 1.30 และค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตเท่ากับ 6.0 ± 2.0 ซ.ม. จากผลการทดลองพบว่า หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูน และ/หรือเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา เมื่อสัดส่วนการแทนที่

ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังรับแรงอัดที่อายุเริ่มต้นจนถึง 28 วัน มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันขึ้นไปจะให้กำลังเทียบเท่ากับคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมที่มีการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตผสมผงหินปูน และ/หรือเถ้าลอย มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาและมาตรฐาน ACI 318

ณัฐวรรธน์ และคณะ (2005) ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนมาแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 20, 25, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก โดยศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของตัวอย่างมอร์ต้าร์เปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ต้าร์มาตรฐาน ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 และอัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 โดยน้ำหนัก พบว่า ปริมาณน้ำเหมาะสมที่ใช้จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ของผงหินปูนมากขึ้นและจะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยมากขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ของผงหินปูนมากขึ้นแต่ยังน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยที่มากขึ้น การไหลจะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ของผงหินปูนมากขึ้นและเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยมากขึ้น และเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับผงหินปูนรวมกัน ปริมาณน้ำที่เหมาะสม ระยะเวลาการก่อตัว และการไหลของตัวมอร์ต้าร์จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยกับผงหินปูน กรณีกำลังอัดพบว่า เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ด้วยผงหินปูนที่มีความละเอียด 3 ไมโครเมตร นั้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยร้อยละ 5 ที่อายุช่วงแรกมีค่าสูงกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์มาตรฐาน แต่เมื่ออายุมากขึ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์มาตรฐานจะมีกำลังอัดที่สูงกว่า แต่เมื่อแทนที่ร้อยละ 10 จะให้ค่าต่ำกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์มาตรฐาน ส่วนการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนที่มีความละเอียด 13 ไมโครเมตร และการแทนที่ด้วยเถ้าลอย รวมถึงการแทนที่ทั้งฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ในทุกอัตราส่วน กำลังอัดจะมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์มาตรฐาน

N. Voglis, G. Kakali, E. Chaniotakis and S. Tsivilis (2005) ได้ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านซีเมนต์ระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ผงหินปูน, ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural pozzolan) และปอซโซลานดัดแปลง (modify pozzolan) ในที่นี้คือ เถ้าลอย ผลจากการทดลองพบว่า ซีเมนต์ผสมผงหินปูนให้ค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นสูงขึ้น ตรงกันข้ามกับซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นลดลง แต่เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดที่อายุช่วง 90 ถึง 540 วันพบว่าซีเมนต์ผสมปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือซีเมนต์ผสมเถ้าลอย จะให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าทั้งซีเมนต์ปกติและซีเมนต์ผสมผงหินปูน ซีเมนต์

ผสมผงหินปูน จะมีความต้องการนำน้อยกว่าเมื่อเทียบกับซีเมนต์ผสมปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

Al-Salen และ Al-Zaid (2006) ได้ศึกษาผลของสภาพแวดล้อม ขนาดของตัวอย่างและสารผสมเพิ่มต่อการหดตัวของคอนกรีต สภาพแวดล้อมที่ใช้แบ่งได้ 2 กรณีคือ สภาวะรุนแรง มีอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 5 เปอร์เซ็นต์ และสภาพไม่รุนแรง มีอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบพบว่าปริมาณน้ำและซีเมนต์มีผลอย่างมากต่อการหดตัว ขนาดของตัวอย่างจะมีผลอย่างชัดเจนเมื่ออยู่ในสภาวะรุนแรง แต่ในสภาวะไม่รุนแรงขนาดของตัวอย่างมีผลไม่มากนัก

Gemma Rodriguez de Sensale (2006) ได้ศึกษากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบโดยใช้เถ้าแกลบจากอุรุกวัย ซึ่งเป็นแกลบที่ได้จากโรงสีข้าว พบว่าเมื่อปริมาณเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบจะมีค่าลดลง และกำลังรับแรงดึงจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์มีค่าต่ำลงที่อัตราแทนที่ส่วนผสมเดียวกัน

สนธยา ต้นการุณศรี และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2009) ได้ศึกษาแนวโน้มการหดตัวของคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวและความเครียดของรอยแตกร้าวไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเครียดสะสม แต่ยังขึ้นอยู่กับอัตราการหดตัวและความสามารถในการยืดตัวด้วย การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่ำ w/b เท่ากับ 0.35 จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวเร็วกว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงสูง w/b เท่ากับ 0.55 การใช้เถ้าลอยและผงหินปูนมีส่วนช่วยยืดระยะเวลา ในการใช้ผลต่อการยืดเวลาการแตกร้าวของคอนกรีตและระยะเวลานี้จะเพิ่มตามอัตราส่วนเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น

อารง มะเซ็ง (2009) ได้ศึกษาผลกระทบของกำลังอัดคอนกรีตในระยะเวลาก่อตัวช่วงสุดท้าย โดยนำคอนกรีตที่กำลังอัด 230, 300 และ 370 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามที่ออกแบบไว้มาผสมให้มีความสามารถเทได้ 10 ± 2.0 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างจำนวน 108 ตัวอย่าง ทดสอบหากำลังอัด เพื่อเป็นค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ทิ้งไว้แล้วนำมาผสมใหม่ให้มีความสามารถเทได้เท่าเดิม คือ 10 ± 2.0 เซนติเมตร แล้วนำคอนกรีตนั้นมาผสมใหม่ทุกๆ 30, 45 และ 60 นาที จากเวลาที่ผสมคอนกรีตเริ่มต้นจนแล้วเสร็จ บันทึกปริมาณน้ำที่เพิ่มเพื่อให้มีความสามารถเทได้ตามที่กำหนดในแต่ละช่วงเวลา นำตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน นำผลมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน จากผลการศึกษาพบว่า การนำคอนกรีตมาผสมใหม่โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และควบคุมเพื่อให้มีความสามารถในการเทได้ตามที่กำหนด 10 ± 2.0 เซนติเมตร ตามที่ออกแบบไว้นั้นส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต ลดลงเหลือร้อยละ 82.46 หรือกำลังลดลงที่ร้อยละ 17.54

ทวิช กล้าแท้ และคมสัน มาลีสี (2010) ได้ศึกษาอิทธิพลของผงหินปูนปรับปรุงคุณสมบัติที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังอัด และการหดตัวแบบออโตจีนัสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนปรับปรุงคุณสมบัติ (LM) ที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุผง และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30, 0.35 และ 0.40 โดยในการทดสอบได้เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 3, 7, 28 และ 56 วัน รวมถึงการหดตัวแบบออโตจีนัสที่อายุ 1-56 วัน กับซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS) และซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (C100) ผลจากการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ (LM) ที่ร้อยละ 10 (C90LM10) นั้น มีแนวโน้มค่ากำลังอัดที่สูงกว่าซีเมนต์เพสต์ (C100) และจะลดลงเมื่อทำการเพิ่มซีเมนต์เพสต์ (LM) ที่ร้อยละ 20 และ 30 ตามลำดับ ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง ส่วนการหดตัวแบบออโตจีนัสจะพบว่าซีเมนต์เพสต์ (LM) และซีเมนต์เพสต์ (LS) นั้น มีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มขึ้นของร้อยละการแทนที่ 10 , 20 และ 30 ตามลำดับ ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง

วัจน์วงค์ กรีพละ และพิชัย นิมิตยงสกุล (2012) ได้ศึกษาปริมาณหินปูนที่เหมาะสมในการผลิตปูนซีเมนต์ประเภท Portland Limestone Cement โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของผงหินปูนและความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมหินปูน (PLC) ปูนซีเมนต์ควบคุมและ PCLs ทั้ง 9 ชุดการทดลองที่ใช้ในการศึกษา ได้จากการบดด้วยวิธีการผสมบดร่วมของปูนเม็ดดิบ ผงหินปูน และยิปซัมลงในหม้อบดรวมปริมาณ 5 กิโลกรัม ปูนซีเมนต์และ PLCs ที่มีปริมาณของผงหินปูนร้อยละ 10, 20 และ 30 ความละเอียด 3,500, 4,300 และ 5,000 cm2/g และทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ, คุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติด้านความทนทานของซีเมนต์ จากผลการทดลองพบว่า สามารถใช้หินปูนแทนที่วัสดุที่ใช้ผลิตปูนซีเมนต์ทั่วไปในการผลิตปูนซีเมนต์ประเภท PLC ในขั้นตอนการบดวัสดุ โดยที่ความละเอียดเท่ากันพบว่าการเพิ่มปริมาณการแทนที่ผงหินปูนสามารถลดระยะเวลาในการบด PLC ลงได้ นอกจากนี้ผลของการลดลงของระยะเวลาในการบดยังมีผลต่อการกระจายขนาดอนุภาคของ PLC การเพิ่มความละเอียดของ PLC ส่งผลต่อความกว้างของการกระจายขนาดอนุภาคของ PLC เมื่อเปรียบเทียบกับการแทนที่ผงหินปูน เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ พบว่าระยะเวลาก่อตัวของ PLC จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงหินปูนและความละเอียดของ PLC นอกจากการเพิ่มปริมานการแทนที่ผงหินปูนจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นแล้วค่าความละเอียดก็มีผลต่อ PLC เช่นกัน ผงหินปูนมีผลต่อกำลังรับแรงอัดค่อนข้างมาก การเพิ่มปริมาณหินปูนเป็นสาเหตุหลักการลดลงของกำลังรับแรงอัด อย่างไรก็ตามการเพิ่มความละเอียดของ PLC ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในด้านคุณสมบัติการหดตัวแห้งพบว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของมอร์ต้าร์ลดลงอย่างรวดเร็ว

แต่เมื่อเพิ่มความละเอียดของ PLC การเปลี่ยนแปลงความยาวจะเพิ่มขึ้นด้วย ด้านการซึมผ่านน้ำของมอร์ต้าร์ พบว่าการใช้ผงหินปูนแทนที่สามารถลดการซึมผ่านน้ำได้ดีเมื่อเพิ่มความละเอียดของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังพบว่าผงหินปูนไม่เพียงช่วยลดปริมาณของ C3A ยังช่วยต้านทานซัลเฟตได้อีกด้วย แต่ในทางตรงข้ามพบว่า ความต้านทานต่อคลอไรด์ของ PLC มอร์ต้าร์จะลดลงเพื่อเพิ่มปริมาณของหินปูนและความละเอียดของ PLC

สุรสิทธิ์ เพาะบุญ และปิติศานต์ กร้ำมาตร (2013) ได้ศึกษาผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยทำการศึกษาผงหินปูนที่มีความละเอียด (d50) เท่ากับ 2, 8 และ 15 ไมครอน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 20 ร่วมกับเถ้าลอยที่อัตราส่วนร้อยละ 30, 25, 20 และ 10 โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูนวัสดุ ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ ประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลน และคุณสมบัติทางกล ได้แก่ กำลังอัดประลัย กำลังดึงแบบผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่น จากผลการสอบพบว่า กำลังอัดประลัยที่อายุช่วงต้นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีแนวโน้มมากกว่าคอนกรีตปกติ ในขณะที่คอนกรีตผสมผงหินปูนและเถ้าลอยมีค่ากำลังอัดประลัยที่ระยะยาวมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตปกติ ส่วนค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกำลังอัดประลัย นอกจากนั้นความละเอียดของผงหินปูนมีผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกล โดยผงหินปูนที่มีความละเอียดสูงกว่ามีผลทำให้คุณสมบัติทางกลสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดต่ำกว่า

ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์ และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2014) ได้ศึกษาผลกระทบของสารเพิ่มกำลังอัดต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัว โดยทำการศึกษาผลของสารเพิ่มกำลังอัด (Strength Accelerating Compound) ต่อคุณสมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต โดยแบ่งเป็นการศึกษาผลของสารเพิ่มกำลังอัดต่อคุณสมบัติช่วงต้นของคอนกรีต และการศึกษาผลของสารเพิ่มกำลังอัดต่อคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต ซึ่งใช้สารเพิ่มกำลังอัดผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, เถ้าลอย และผงฝุ่นหินปูน โดยผสมสารเพิ่มกำลังอัด 2 วิธี กล่าวคือ วิธีที่ 1 คือ การแทนที่วัสดุประสาน (Replacement) และวิธีที่ 2 คือ การเติม (Addition) โดยปริมาณร้อยละการแทนที่และการเติมของสารเพิ่มกำลังอัดที่ใช้ศึกษามีค่าเท่ากับ 5.5, 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อใช้สารเพิ่มกำลังอัดผสมกับวัสดุประสานโดยวิธีการเติม (Addition) ลงไปในส่วนผสมคอนกรีต ทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวดีขึ้น อาทิเช่น เพิ่มระยะเวลาการสูญเสียค่าการยุบตัว เพิ่มระยะเวลาการก่อตัว เพิ่มกำลังอัด

ช่วงต้น ทางด้านคุณสมบัติความคงทน การใช้สารเพิ่มกำลังอัดยังช่วยทำให้คุณสมบัติทางด้านความคงทนของคอนกรีตดีขึ้น อาทิเช่น ค่าการขยายตัวเนื่องจากบ่มในสารละลายซัลเฟตมีค่าน้อยกว่าค่าการขยายตัวของตัวอย่าง OPC1 ที่ไม่มีสารเพิ่มกำลังอัด อย่างไรก็ตามการพัฒนาคุณสมบัติที่ดีขึ้นทั้งทางกลและความคงทนยังขาดข้อมูลสนับสนุนทางด้านการวิเคราะห์ทางเคมีเชิงลึกและการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค เพื่อใช้อธิบายเพิ่มเติมถึงสาเหตุและกลไกที่ทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตและมอร์ต้าร์เปลี่ยนไปในทางที่ดีขึ้น

บทที่ 3
วิธีการศึกษา

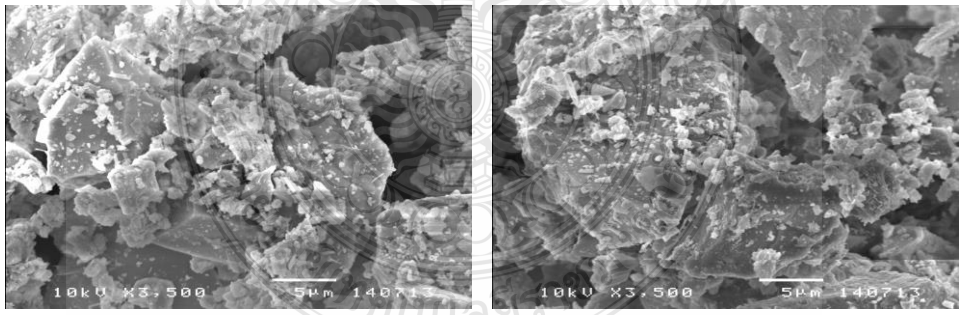
บทนี้จะเป็นการกล่าวถึงวัสดุที่ใช้ในการศึกษา เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา การหล่อและการบ่มตัวอย่าง และรายละเอียดวิธีการศึกษา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ สารเพิ่มกำลังอัด ผงหินปูน มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด และสารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer)

3.1.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ASTM Type I, Ordinary Portland Cement, OPC 1) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 (ASTM Type III, Ordinary Portland Cement, OPC 3) ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.12 และ 3.15 ตามมาตรฐาน ASTM C188 โดยรูปที่ 3.1 (ก-ข) แสดงภาพถ่ายขยายขนาด 3500 เท่า โดยใช้วิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ตามลำดับ

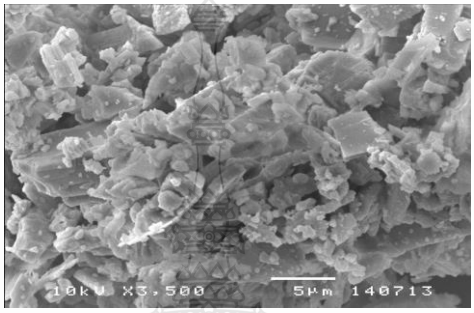


(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3

รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายขยายขนาด 3500 เท่า โดยใช้วิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3

3.1.2 สารเพิ่มกำลังอัด (Strength Enhancing Mineral Admixture)

สารเพิ่มกำลังอัดที่ใช้คือ สารเคมีชนิดหนึ่ง ผลิตตามมาตรฐาน ASTM C150, ASTM C465, TIS 15, และ TIS 15 Volume 20 ค่าความถ่วงจำเพาะของสารเพิ่มกำลังอัดเท่ากับ 2.95 ตามมาตรฐาน ASTM C188 โดยรูปที่ 3.2 แสดงภาพถ่ายขยายขนาด 3500 เท่า โดยใช้วิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ของสารเพิ่มกำลังอัด



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายขยายขนาด 3500 เท่า โดยใช้วิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ของสารเพิ่มกำลังอัด

3.1.3 ผงหินปูน

ผงหินปูนที่ใช้คือ ผงหินปูนขนาดความละเอียด 3 ไมโครเมตร ค่าความถ่วงจำเพาะของผงหินปูนเท่ากับ 2.60 ตามมาตรฐาน ASTM C188 โดยรูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายขยายขนาด 3500 เท่า โดยใช้วิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ของผงหินปูน

รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายขยายขนาด 3500 เท่า โดยใช้วิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ของผงหินปูน

รูปที่ 3.1 ถึงรูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายขยายขนาด 3500 เท่า โดยใช้วิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 สารเพิ่มกำลังอัด และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าลักษณะรูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอน แตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่ว ส่วนกรณีสารเพิ่มกำลังอัดมีลักษณะเป็นเหลี่ยมๆ คล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 และมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกัน ในขณะที่กรณีของผงหินปูน มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 แต่ขนาดอนุภาคจะมีขนาดค่อนข้างเล็กเมื่อเปรียบเทียบกัน

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และสารเพิ่มกำลังอัดของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สารประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ผงหินปูน	สารเพิ่มกำลังอัด
SiO_2	18.93	0.46	1.94
Al_2O_3	5.51	0.06	1.39
Fe_2O_3	3.31	0.03	0.61
CaO	65.53	55.25	42.97
MgO	1.24	0.37	0.1
Na_2O	<0.01	<0.01	-
K_2O	0.31	0.01	-
SO_3	2.88	<0.01	49.5
LOI	2.24	43.79	2.68

3.1.4 สารลดน้ำ (Superplasticizer)

สารลดน้ำที่ใช้คือ สารลดน้ำพิเศษ ชนิด F (Superplasticizer Type F) ตามมาตรฐาน ASTM C494

3.1.5 มวลรวมหยาบ

มวลรวมหยาบที่ใช้ทดสอบ คือ หินปูนบด (Limestone) ขนาดโตสุดเท่ากับ 3/4 นิ้ว หินที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้ทดสอบคุณสมบัติได้แก่ ความต้านทานการขัดสี ทดสอบขนาดคละ ทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ และทดสอบหน่วยน้ำหนักของหิน ตามมาตรฐาน ASTM C131, ASTM C33, ASTM C188 และ ASTM C29 ตามลำดับ

3.1.6 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดที่ใช้ทดสอบ คือ ทรายแม่น้ำร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 โดยเตรียมให้มีความชื้นอยู่ที่ผิวอยู่ 1-2 เปอร์เซ็นต์ ทรายที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้ทดสอบคุณสมบัติได้แก่ ทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ ทดสอบหาหน่วยน้ำหนักและการวิเคราะห์หาขนาดคละของทราย ตามมาตรฐาน ASTM C128, ASTM C29 และ ASTM C33 ตามลำดับ

3.2 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล

3.2.2 อุปกรณ์ทดสอบการยุบตัว

3.2.3 เครื่องหาเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

3.2.4 ตะแกรงร่อนมาตรฐานขนาดเบอร์ 4

3.2.5 เครื่องทดสอบแรงกดมาตรฐาน (Universal Testing Machine)

3.2.6 อุปกรณ์ประกอบเครื่องทดสอบการต้านทานแรงดัด

3.2.7 เครื่องเปรียบเทียบความยาว (Length Comparator)

3.2.8 หม้อต้ม Autoclave

3.2.9 เครื่องผสมคอนกรีต

3.2.10 เครื่องผสมมอร์ต้าร์

3.2.11 เครื่องสำหรับจี้คอนกรีต

3.2.12 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต

3.2.13 แบบหล่อตัวอย่างเพสต์และมอร์ต้าร์

3.2.14 ถังบ่มตัวอย่าง

รูปที่ 3.4 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล

รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ทดสอบการยุบตัว

รูปที่ 3.6 เครื่องหาเวลาการก่อตัวของคอนกรีต [16]

รูปที่ 3.7 ตะแกรงร่อนมาตรฐานขนาดเบอร์ 4 [27]

รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบแรงกดมาตรฐาน (Universal Testing Machine) [28]

รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ประกอบเครื่องทดสอบการต้านทานแรงดัด [29]

รูปที่ 3.10 เครื่องเปรียบเทียบความยาว (Length Comparator)

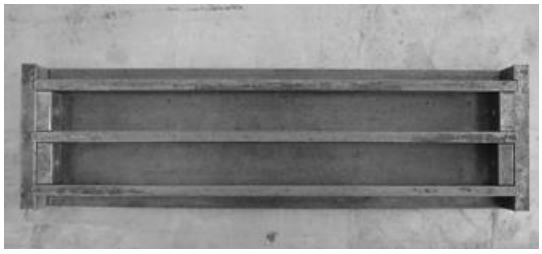
รูปที่ 3.11 หม้อต้ม Autoclave [30]

รูปที่ 3.12 เครื่องผสมคอนกรีต

รูปที่ 3.13 เครื่องผสมมอร์ต้าร์

รูปที่ 3.14 เครื่องสำหรับจี้คอนกรีต

รูปที่ 3.15 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ 3.16 แบบหล่อตัวอย่างเพสต์และมอร์ต้าร์

รูปที่ 3.17 ถังบ่มตัวอย่าง

3.3 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แยกตามคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ได้ทำการศึกษา โดยมีรายละเอียดของสัดส่วนผสมต่าง ๆ ดังนี้

3.3.1 สัดส่วนผสมของเพสต์ที่ใช้ในการทดสอบการขยายตัวออโตเคลฟ (Autoclave Expansion) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.2

3.3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการทดสอบการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซต์ (Expansion in Calcium Hydroxide Solution) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.3

3.3.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบค่าการยุบตัว (Slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.4

3.3.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการก่อตัว (Setting Time) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.4

3.3.5 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดประลัย (Compressive Strength) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.4

3.3.6 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบกำลังดึง (Tensile Strength) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.4

3.3.7 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของเพสต์โดยน้ำหนัก (กรัม) ที่ใช้ในการทดสอบการขยายตัวออโตเคลฟ (Autoclave Expansion)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กรัม)				
		ปูนซีเมนต์		ผงหินปูน	ผงเคมีผสมเพิ่ม	น้ำ
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 3			
1	P1	100	-	-	-	55
2	P1 5.5SA (Add)	100	-	-	5.5	55
3	P1 6.5SA (Add)	100	-	-	6.5	55
4	P1 7.5SA (Add)	100	-	-	7.5	55
5	P1 5.5SA (Re)	94.5	-	-	5.5	55
6	P1 6.5SA (Re)	93.5	-	-	6.5	55
7	P1 7.5SA (Re)	92.5	-	-	7.5	55
8	P3	-	100	-	-	55
9	P3 3.5SA (Add)	-	100	-	3.5	55
10	P3 4.5SA (Add)	-	100	-	4.5	55
11	P3 5.5SA (Add)	-	100	-	5.5	55
12	P3 3.5SA (Re)	-	96.5	-	3.5	55
13	P3 4.5SA (Re)	-	95.5	-	4.5	55
14	P3 5.5SA (Re)	-	94.5	-	5.5	55
15	P1 10LP	90	-	10	-	55
16	P1 10LP 5.5SA (Add B)	90	-	10	5.5	55
17	P1 10LP 6.5SA (Add B)	90	-	10	6.5	55
18	P1 10LP 7.5SA (Add B)	90	-	10	7.5	55
19	P1 10LP 5.5SA (Add C)	90	-	10	5.5	55
20	P1 10LP 6.5SA (Add C)	90	-	10	6.5	55
21	P1 10LP 7.5SA (Add C)	90	-	10	7.5	55
22	P1 10LP 5.5SA (Re B)	84.5	-	10	5.5	55
23	P1 10LP 6.5SA (Re B)	83.5	-	10	6.5	55
24	P1 10LP 7.5SA (Re B)	82.5	-	10	7.5	55
25	P1 10LP 5.5SA (Re C)	84.5	-	10	5.5	55
26	P1 10LP 6.5SA (Re C)	83.5	-	10	6.5	55
27	P1 10LP 7.5SA (Re C)	82.5	-	10	7.5	55

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์โดยน้ำหนัก (กรัม) ที่ใช้ในการทดสอบการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Expansion in Calcium Hydroxide Solution)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กรัม)					
		ปูนซีเมนต์		ทราย (SSD)	ผงหินปูน	ผงเคมีผสมเพิ่ม	น้ำ
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 3				
1	M1	100	-	275	-	-	48.6
2	M1 5.5SA (Add)	100	-	275	-	5.5	48.6
3	M1 6.5SA (Add)	100	-	275	-	6.5	48.6
4	M1 7.5SA (Add)	100	-	275	-	7.5	48.6
5	M1 5.5SA (Re)	94.5	-	275	-	5.5	48.6
6	M1 6.5SA (Re)	93.5	-	275	-	6.5	48.6
7	M1 7.5SA (Re)	92.5	-	275	-	7.5	48.6
8	M3	-	100	275	-	-	48.6
9	M3 3.5SA (Add)	-	100	275	-	3.5	48.6
10	M3 4.5SA (Add)	-	100	275	-	4.5	48.6
11	M3 5.5SA (Add)	-	100	275	-	5.5	48.6
12	M3 3.5SA (Re)	-	96.5	275	-	3.5	48.6
13	M3 4.5SA (Re)	-	95.5	275	-	4.5	48.6
14	M3 5.5SA (Re)	-	94.5	275	-	5.5	48.6
15	M1 10LP	90	-	275	10	-	48.6
16	M1 10LP 5.5SA (Add B)	90	-	275	10	5.5	48.6
17	M1 10LP 6.5SA (Add B)	90	-	275	10	6.5	48.6
18	M1 10LP 7.5SA (Add B)	90	-	275	10	7.5	48.6
19	M1 10LP 5.5SA (Add C)	90	-	275	10	5.0	48.6
20	M1 10LP 6.5SA (Add C)	90	-	275	10	5.9	48.6
21	M1 10LP 7.5SA (Add C)	90	-	275	10	6.8	48.6
22	M1 10LP 5.5SA (Re B)	84.5	-	275	50	5.5	48.6
23	M1 10LP 6.5SA (Re B)	83.5	-	275	50	6.5	48.6
24	M1 10LP 7.5SA (Re B)	82.5	-	275	50	7.5	48.6
25	M1 10LP 5.5SA (Re C)	85.0	-	275	50	5.0	48.6
26	M1 10LP 6.5SA (Re C)	84.1	-	275	50	5.9	48.6
27	M1 10LP 7.5SA (Re C)	83.2	-	275	50	6.8	48.6

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ใช้ในการทดสอบค่าการยุบตัว (Slump) การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) การก่อตัว (Setting Time) กำลังอัดประลัย (Compressive Strength) และกำลังดึง (Tensile Strength) โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.30 โดยน้ำหนัก

ลำดับที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)							น้ำยาลดน้ำพิเศษ
		ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3	หิน (SSD)	ทราย (SSD)	ผงเคมีผสมเพิ่ม	ผงหินปูน	น้ำ	
1	C1 g=1.38	513	-	1054	732	-	-	149	5.1
2	C1 5.5SA (Add) g=1.38	513	-	1054	732	28.6	-	149	5.1
3	C1 6.5SA (Add) g=1.38	513	-	1054	732	33.8	-	149	5.1
4	C1 7.5SA (Add) g=1.38	513	-	1054	732	39.0	-	149	5.1
5	C1 g=1.40	520	-	1047	727	-	-	151	5.2
6	C1 5.5SA (Re) g=1.40	491	-	1047	727	28.6	-	151	5.2
7	C1 6.5SA (Re) g=1.40	486	-	1047	727	33.8	-	151	5.2
8	C1 7.5SA (Re) g=1.40	481	-	1047	727	39.0	-	151	5.2
9	C3 g=1.395	-	519	1049	729	-	-	150	5.2
10	C3 3.5SA (Add) g=1.395	-	519	1049	729	18.2	-	150	5.2
11	C3 4.5SA (Add) g=1.395	-	519	1049	729	23.4	-	150	5.2
12	C3 5.5SA (Add) g=1.395	-	519	1049	729	28.6	-	150	5.2
13	C3 g=1.40	-	520	1047	727	-	-	151	5.2
14	C3 3.5SA (Re) g=1.40	-	502	1047	727	18.2	-	151	5.2
15	C3 4.5SA (Re) g=1.40	-	497	1047	727	23.4	-	151	5.2
16	C3 5.5SA (Re) g=1.40	-	491	1047	727	28.6	-	151	5.2
17	C1 10LP g=1.30	429	-	1084	753	-	47.7	138	4.8
18	C1 10LP 5.5SA (Add B) g=1.30	429	-	1084	753	26.2	47.7	138	4.8
19	C1 10LP 6.5SA (Add B) g=1.30	429	-	1084	753	31.0	47.7	138	4.8
20	C1 10LP 7.5SA (Add B) g=1.30	429	-	1084	753	35.8	47.7	138	4.8
21	C1 10LP 5.5SA (Add C) g=1.30	429	-	1084	753	23.6	47.7	138	4.8
22	C1 10LP 6.5SA (Add C) g=1.30	429	-	1084	753	27.9	47.7	138	4.8
23	C1 10LP 7.5SA (Add C) g=1.30	429	-	1084	753	32.2	47.7	138	4.8
24	C1 10LP g=1.40	463	-	1047	727	-	51.5	149	5.1
25	C1 10LP 5.5SA (Re B) g=1.40	435.1	-	1047	727	28.3	51.5	149	5.1
26	C1 10LP 6.5SA (Re B) g=1.40	429.9	-	1047	727	33.5	51.5	149	5.1
27	C1 10LP 7.5SA (Re B) g=1.40	424.8	-	1047	727	38.6	51.5	149	5.1
28	C1 10LP 5.5SA (Re C) g=1.40	437.9	-	1047	727	25.5	51.5	149	5.1
29	C1 10LP 6.5SA (Re C) g=1.40	433.3	-	1047	727	30.1	51.5	149	5.1
30	C1 10LP 7.5SA (Re C) g=1.40	428.6	-	1047	727	34.8	51.5	149	5.1

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(W/B) เท่ากับ 0.30 โดยน้ำหนัก

ลำดับที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)							น้ำยาลดน้ำพิเศษ
		ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3	หิน (SSD)	ทราย (SSD)	ผงเคมีผสมเพิ่ม	ผงหินปูน	น้ำ	
1	C1 g=1.38	513	-	1054	732	-	-	149	5.1
2	C1 5.5SA (Add) g=1.38	513	-	1054	732	28.6	-	149	5.1
3	C1 6.5SA (Add) g=1.38	513	-	1054	732	33.8	-	149	5.1
4	C1 7.5SA (Add) g=1.38	513	-	1054	732	39.0	-	149	5.1
5	C1 g=1.40	520	-	1047	727	-	-	151	5.2
6	C1 5.5SA (Re) g=1.40	491	-	1047	727	28.6	-	151	5.2
7	C1 6.5SA (Re) g=1.40	486	-	1047	727	33.8	-	151	5.2
8	C1 7.5SA (Re) g=1.40	481	-	1047	727	39.0	-	151	5.2

ความหมายของตัวอักษรและตัวเลขในรหัสของแต่ละส่วนผสมมีความหมายดังนี้ คือ

P1	หมายถึง เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
P1 5.5SA (Add)	หมายถึง เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) ร้อยละ 5.5
P1 10LP 5.5SA (Add C)	หมายถึง เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูน ร้อยละ 10 และใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) ร้อยละ 5.5 ของปูนซีเมนต์
P1 10LP 5.5SA (Add B)	หมายถึง เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูน ร้อยละ 10 และใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) ร้อยละ 5.5 ของวัสดุประสาน
M1	หมายถึง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
M1 7.5SA (Re)	หมายถึง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ร้อยละ 7.5
M1 10LP 7.5SA (Re C)	หมายถึง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูน ร้อยละ 10 และแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ร้อยละ 7.5 ของปูนซีเมนต์
M1 10LP 7.5SA (Re B)	หมายถึง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูน ร้อยละ 10 และแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ร้อยละ 7.5 ของวัสดุประสาน
g	หมายถึง อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต
C3 g=1.395	หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.395
C3 3.5SA (Re) g=1.40	หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 แทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ร้อยละ 3.5 ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.40
C1 10LP 6.5SA (Add B) g=1.30	หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูน ร้อยละ 10 และใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) ร้อยละ 6.5 ของวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.30

3.4 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดในครั้งนี้ ประกอบไปด้วย การทดสอบการขยายตัวออโตเคลฟ (Autoclave Expansion) การทดสอบการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Expansion in Calcium Hydroxide Solution) การทดสอบค่าการยุบตัว (Slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) การทดสอบการก่อตัว (Setting Time) การทดสอบกำลังอัดประลัย (Compressive Strength) การทดสอบกำลังดึง (Tensile Strength) และการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 การทดสอบการขยายตัวออโตเคลฟ (Autoclave Expansion)

ทำการทดสอบการขยายตัวของเพสต์ ตามมาตรฐาน ASTM C151-93a โดยใช้เครื่องวัดความยาว Length Comparator (แสดงดังรูปที่ 3.10) วัดความยาวที่เปลี่ยนแปลง โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก. การเตรียมตัวอย่าง

ใช้ชิ้นตัวอย่างเพสต์ที่เตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25x25x285 มม. ในแต่ละสัดส่วนผสมเพสต์ใช้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 4 ชิ้น

ข. การบ่มและการทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างเพสต์

หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างแล้ว ทำการถอดแบบที่อายุตัวอย่างเพสต์ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างเพสต์วัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน (แสดงดังรูปที่ 3.10) ซึ่งค่าที่วัดได้นี้จะใช้เป็นค่าความยาวเริ่มต้น แล้วนำชิ้นตัวอย่างเพสต์ไปเข้าหม้อต้ม Autoclave (แสดงดังรูปที่ 3.11) โดยน้ำที่อยู่ในหม้อต้ม Autoclave มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 20 – 28 °C ปรับหม้อต้มให้พร้อมใช้งาน แล้วปรับแรงดันของหม้อต้มให้อยู่ที่ 2 Mpa ภายในเวลา 45 – 75 นาที เมื่อแรงดันอยู่ที่ 2 Mpa แล้ว ให้รักษาแรงดัน 2±0.07 Mpa ไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อเวลาครบกำหนดแล้วให้ปิดตัว Heat Supply ปล่อยให้แรงดันลดลงไปที่ 0.07 Mpa ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง 30 นาที จากนั้นเปิดฝาหม้อต้ม Autoclave นำตัวอย่างเพสต์มาแช่น้ำที่อุณหภูมิ 90 °C ทิ้งไว้จนอุณหภูมิน้ำลดลงเหลือ 23 °C รักษาอุณหภูมิไว้ 15 นาที แล้วนำตัวอย่างเพสต์ที่ทำการทดสอบขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า ทำการวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน เพื่อหาค่าร้อยละของการขยายตัวที่เกิดขึ้น ตามมาตรฐาน ASTM C151-93a

รูปที่ 3.18 ชิ้นตัวอย่างเพสต์ที่บ่มในหม้อต้ม Autoclave

ค. การหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างเพสต์

เมื่อนำชิ้นตัวอย่างขึ้นจากน้ำที่อุณหภูมิ 23 °C นำชิ้นตัวอย่างวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน โดยสามารถหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างเพสต์ได้จากสมการที่ (3.1)

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \qquad (3.1)$$

โดย ΔL คือ ค่าการขยายตัว (%)

L_x คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน หลังจากบ่มในหม้อต้ม Autoclave (มม.)

L_i คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน เริ่มต้น (มม.)

L_g คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน เท่ากับ 285 มม.

3.4.2 การทดสอบการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Expansion in Calcium Hydroxide Solution)

ทำการทดสอบการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ตามมาตรฐาน ASTM C1038 โดยใช้เครื่องวัดความยาว Length Comparator (แสดงดังรูปที่ 3.10) วัดความยาวที่เปลี่ยนแปลง โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก. การเตรียมตัวอย่าง

ใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่เตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25x25x285 มม. ในแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ใช้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 4 ชิ้น

ข. การบ่มและการทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์

หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างแล้ว ทำการถอดแบบที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์วัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน (แสดงดังรูปที่ 3.10) ซึ่งค่าที่วัดได้นี้จะใช้เป็นค่าความยาวเริ่มต้น แล้วนำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ไปบ่มในน้ำที่ผสมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ปริมาตร 2 กรัมต่อลิตร) เป็นเวลา 14 วัน โดยควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ 30±2°C หลังจากครบอายุการบ่มในน้ำ นำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ทำการทดสอบขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า ทำการวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน เพื่อหาค่าร้อยละของการขยายตัวที่อายุบ่ม 14 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C1038

รูปที่ 3.19 ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่บ่มในน้ำที่ผสมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ค. การหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์

เมื่อครบที่อายุบ่ม คือ 14 วัน นำชิ้นตัวอย่างวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน โดยสามารถหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ได้จากสมการที่ (3.2)

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \qquad (3.2)$$

โดย ΔL คือ ค่าการขยายตัว (%)

L_x คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน หลังจากบ่มในน้ำที่อายุ 14 วัน (มม.)

L_i คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน เริ่มต้น (มม.)

L_g คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน เท่ากับ 285 มม.

3.4.3 การทดสอบค่าการยุบตัว (Slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss)

ทำการทดสอบค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C143 โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.4.3.1 นำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเสร็จเรียบร้อยมาวัดอุณหภูมิ จากนั้นให้เทคอนกรีตลงกรวยทดสอบการยุบตัว (แสดงดังรูปที่ 3.5) โดยให้แบ่งคอนกรีตเป็น 3 ชั้น ๆ ละเท่ากัน ๆ โดยปริมาตร

3.4.3.2 กระทุ้งคอนกรีตแต่ละชั้นด้วยเหล็กกระทุ้งจำนวน 25 ครั้งต่อชั้น โดยกระจายให้ทั่วถึงตลอดหน้าตัด

3.4.3.3 เมื่อกระทุ้งครบ 3 ชั้น ใช้เหล็กกระทุ้งปาดผิวหน้าคอนกรีตให้ได้ระดับเสมอขอบกรวยทดสอบการยุบตัว

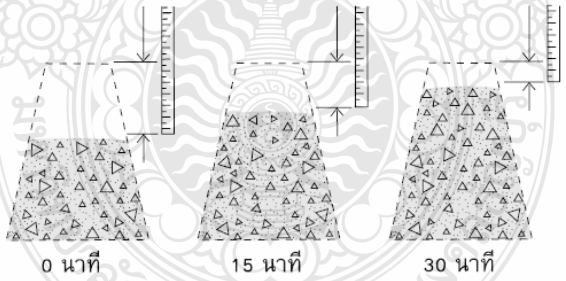
3.4.3.4 ทำการยกกรวยทดสอบขึ้นในแนวดิ่ง และเริ่มทำการวัดค่าการยุบตัวเริ่มต้น

3.4.3.5 เทคอนกรีตกลับใส่โม่ผสมคอนกรีต ทิ้งไว้โดยปิดฝาโม่ไม่ให้น้ำระเหยออกและควรเปิดเครื่องผสมเป็นระยะ

3.4.3.6 เทคอนกรีตกลับลงกรวยทดสอบการยุบตัว หาค่าการยุบตัวแล้วบันทึกค่า

3.4.3.7 ทำเช่นนี้ทุก ๆ 15 นาที จนคอนกรีตไม่มีค่าการยุบตัว

3.4.3.8 นำผลการทดสอบที่ได้มาหาเวลาที่เหมาะสมในการนำคอนกรีตไปใช้งาน



รูปที่ 3.20 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อเวลาผ่านไป [31]

3.4.4 การทดสอบการก่อตัว (Setting Time)

ทำการทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C403โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.4.4.1 นำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเสร็จเรียบร้อย ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาดเบอร์ 4

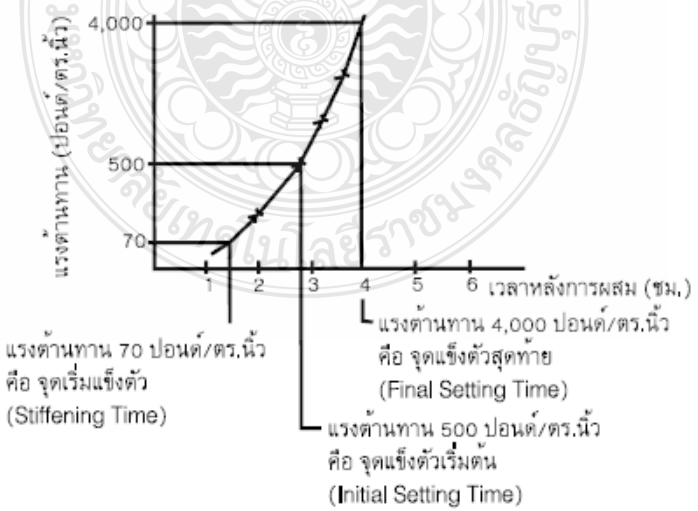
3.4.4.2 นำส่วนที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาดเบอร์ 4 เทลงแบบหล่อคอนกรีตขนาด 150x150x150 มม. (แสดงดังรูปที่ 3.15) ที่เตรียมไว้ โดยใส่ให้ความสูงต่ำกว่าขอบแบบหล่อคอนกรีตประมาณครึ่งซม.

3.4.4.3 ใช้เหล็กกระทุ้งให้ทั่วพื้นที่ ใช้ค้อนยางเคาะด้านข้างแบบเพื่อไล่ฟองอากาศออกจากส่วนผสม

3.4.4.4 วัดอุณหภูมิของตัวอย่าง และปาดผิวหน้าให้เรียบ

3.4.4.5 วางทิ้งไว้เมื่อมีน้ำลอยขึ้นมาให้ใช้ลูกยางดูดน้ำออก

3.4.4.6 ยกแบบวางบนเครื่องทดสอบ (แสดงดังรูปที่ 3.6) ที่ใส่หัวกดไว้เรียบร้อย แล้วกดให้หัวกดจมลงในเนื้อคอนกรีต 2.5 ซม. จดค่าน้ำหนักที่ขึ้นบนสเกล เวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลากดและขนาดของหัวกด โดยหัวกดที่ใช้มีให้เลือกตั้งแต่ขนาดพื้นที่ 1 1/2 1/4 1/10 1/20 1/40 ตร.นิ้ว ในการทดสอบจะเลือกหัวกดให้เหมาะสมกับสภาพคอนกรีต โดยในช่วงแรกจะใช้หัวกดขนาดใหญ่ และเมื่อเวลาผ่านไปคอนกรีตยิ่งแข็งตัว จะเลือกหัวกดขนาดเล็กลง ในการทดสอบต้องหาแรงต้านทานอย่างน้อย 6 จุด เพื่อนำมาเขียนกราฟ



รูปที่ 3.21 กราฟแสดงวิธีการหาเวลาการก่อตัวของคอนกรีต [31]

3.4.5 การทดสอบกำลังอัดประลัย (Compressive Strength)

ทำการทดสอบกำลังอัดประลัย ตามมาตรฐาน ASTM C150 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงกดมาตรฐาน (Universal Testing Machine) (แสดงดังรูปที่ 3.8) โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก. การหล่อและการบ่มตัวอย่างคอนกรีต

ใช้ก้อนตัวอย่างคอนกรีตซึ่งเตรียมโดยแบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x100x100 มม. จำนวน 6 ก้อนตัวอย่างในแต่ละสัดส่วนผสม เพื่อทดสอบกำลังอัดประลัย (Compressive Strength) ตามมาตรฐาน ASTM C150 หลังจากหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตเสร็จแล้ว ให้ทำการถอดแบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นให้นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมดไปบ่มในน้ำ (Water Curing) เป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน หลังจากครบอายุการบ่มในน้ำแล้ว นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่จะทำการทดสอบขึ้นจากน้ำ แล้วทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ผิวของก้อนตัวอย่างออกแล้วเช็ดผิวชิ้นตัวอย่างด้วยผ้าสะอาดและทิ้งไว้จนแห้ง เตรียมนำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปทดสอบ

ข. วิธีการทดสอบกำลังอัดประลัย (Compressive Strength)

1) วัดและบันทึกค่าความสูง ความกว้าง และความยาวของก้อนตัวอย่างคอนกรีต โดยวัดระยะระหว่างหน้าตัดแนวดิ่งให้ละเอียดถึงระดับ มม.

2) ชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่างคอนกรีต

3) นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตวางบนกึ่งกลางของแท่นทดสอบ โดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่นกด

4) เปิดเครื่องทดสอบแรงกดมาตรฐาน (Universal Testing Machine) โดยในการทดสอบจะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอประมาณ 1.43 – 3.47 กก./ตร.ซม./วินาที

5) กดก้อนตัวอย่างคอนกรีตจนพัง บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ นำค่าน้ำหนักและพื้นที่หน้าตัดที่ได้มาหาค่ากำลังอัดประลัย

รูปที่ 3.22 การกดก้อนตัวอย่างคอนกรีตด้วยเครื่องทดสอบแรงกดมาตรฐาน [32]

3.4.6 การทดสอบกำลังดึง (Tensile Strength)

ทำการทดสอบกำลังดึง ตามมาตรฐาน ASTM C78 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงกดมาตรฐาน (Universal Testing Machine) (แสดงดังรูปที่ 3.8) โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก. การหล่อและการบ่มตัวอย่างคอนกรีต

ใช้ตัวอย่างคานคอนกรีตซึ่งเตรียมโดยแบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x100x300 มม. จำนวน 6 ตัวอย่างในแต่ละสัดส่วนผสม เพื่อทดสอบกำลังดึง (Tensile Strength) ตามมาตรฐาน ASTM C78 หลังจากหล่อตัวอย่างคานคอนกรีตเสร็จแล้ว ให้ทำการถอดแบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นให้นำตัวอย่างคานคอนกรีตทั้งหมดไปบ่มในน้ำ (Water Curing) เป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน หลังจากครบอายุการบ่มในน้ำแล้ว นำตัวอย่างคานคอนกรีตที่จะทำการทดสอบขึ้นจากน้ำ แล้วทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ผิวของตัวอย่างคานออกแล้วเช็ดผิวชิ้นตัวอย่างด้วยผ้าสะอาด และทิ้งไว้จนแห้ง เตรียมนำตัวอย่างคานคอนกรีตไปทดสอบ

ข. วิธีการทดสอบกำลังดึง (Tensile Strength) โดยวิธี Flexural Strength

1) นำแท่นทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีต (แสดงดังรูปที่ 3.9) ติดเข้ากับเครื่องทดสอบแรงกดมาตรฐาน (Universal Testing Machine)

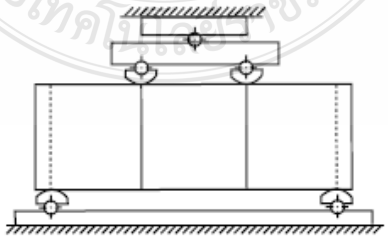
2) แบ่งตัวอย่างคานคอนกรีตตามยาว โดยเหลือบริเวณปลายไว้สองส่วน ส่วนละ 7.5 ซม. ส่วนภายในที่เหลือแบ่งเป็นสามส่วนเท่า ๆ กัน ส่วนละ 15 ซม.

3) วางตัวอย่างคานคอนกรีตลงบนแท่น โดยให้รอยขีดตรงกับฐานของแท่น

4) ปรับแท่นกดด้านบนมาวางบนตัวอย่างคานคอนกรีต โดยให้ตรงรอยขีดเช่นกัน

5) ตั้งน้ำหนักกดให้คงที่ อัตราที่ใช้คือ 0.14 – 0.20 กก./ตร.ซม./วินาที

6) เปิดเครื่องทดสอบแรงกดมาตรฐาน (Universal Testing Machine) ค่อย ๆปล่อยน้ำหนักกด จนตัวอย่างคานคอนกรีตหัก บันทึกค่าน้ำหนักสูงสุดเพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังดึง



รูปที่ 3.23 การทดสอบกำลังดึง (Tensile Strength) โดยวิธี Flexural Strength [31]

3.4.7 การทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage)

ทำการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C596-96 โดยใช้เครื่องวัดความยาว Length Comparator (แสดงดังรูปที่ 3.10) วัดความยาวที่เปลี่ยนแปลง โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก. การเตรียมตัวอย่าง

ใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่เตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 75x75x285 มม. ในแต่ละสัดส่วนผสมคอนกรีตใช้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 4 ชิ้น

ข. การเตรียมตัวอย่างการบ่มและการทดสอบการหดตัวของตัวอย่างคอนกรีต

หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างแล้ว ทำการถอดแบบที่อายุตัวอย่างคอนกรีต 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำ เป็นเวลา 7 วัน โดยควบคุมอุณหภูมิ 30±2°C หลังครบอายุการบ่มในน้ำ นำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการทดสอบขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน (แสดงดังรูปที่ 3.10) ซึ่งค่าที่วัดได้นี้จะใช้เป็นค่าความยาวเริ่มต้น เมื่อวัดค่าความยาวเสร็จแล้ว นำชิ้นตัวอย่างห่อด้วยพลาสติก และบ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 30±2 °C โดยวางชิ้นตัวอย่างบนโต๊ะ ให้มีระยะห่างของแต่ละชิ้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุบ่มในอากาศต่างๆ คือ 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 42 และ 56 วัน เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวที่อายุบ่มต่างๆกัน

ค. การหาค่าการหดตัวของตัวอย่างคอนกรีต

เมื่อครบที่อายุบ่มในอากาศต่างๆ คือ 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 42 และ 56 วัน นำชิ้นตัวอย่างวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน โดยสามารถหาค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของตัวอย่างคอนกรีตได้จากสมการที่ (3.3)

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \qquad (3.3)$$

โดย ΔL คือ ค่าการหดตัว (%)

L_x คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน หลังจากบ่มในอากาศที่อายุต่างๆ (มม.)

L_i คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน เริ่มต้น (มม.)

L_g คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน เท่ากับ 285 มม.

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์

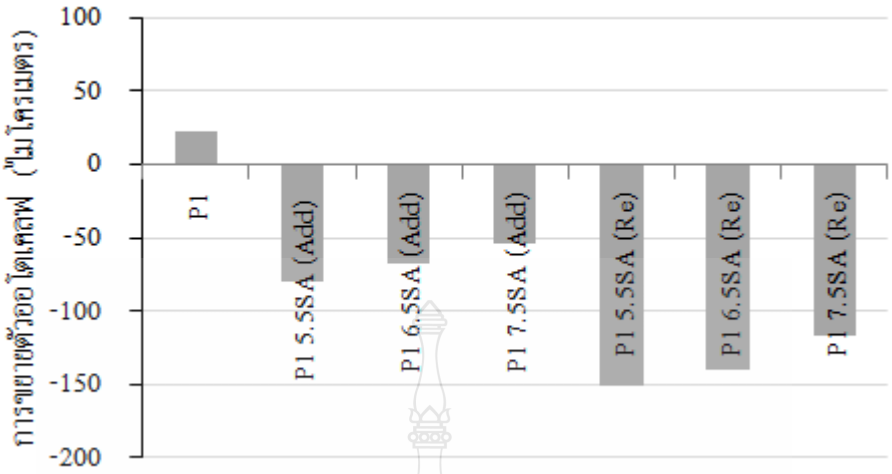
สำหรับผลการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดในครั้งนี้ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยดังกล่าว จึงได้ศึกษาการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ การขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซต์ของมอร์ต้าร์ ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว การก่อตัว กำลังอัดประลัย กำลังดึง และการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์

จากการศึกษาการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้งที่ใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) และโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน สามารถอธิบายผลการศึกษาได้ดังนี้

4.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

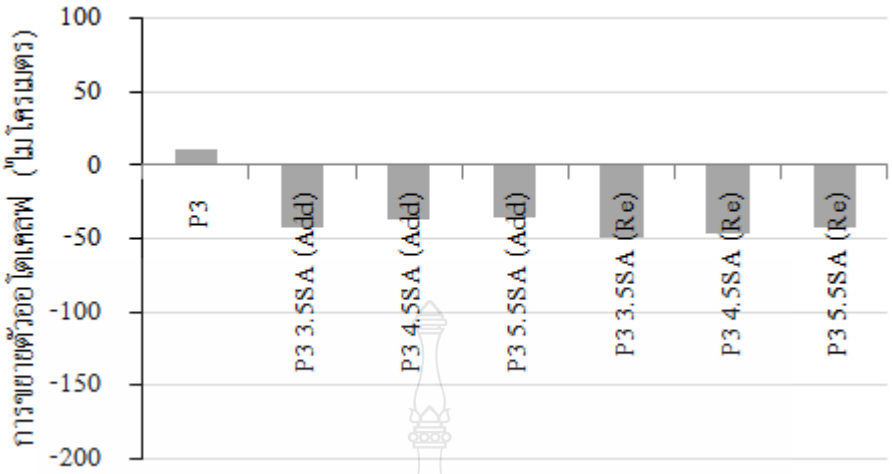
รูปที่ 4.1 แสดงการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้งที่ใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) และโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก พบว่าการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ทั้ง Addition และ Replacement มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด ทำให้เกิดการประสานของเพสต์ ทำให้โครงสร้างเพสต์ต้านทานการขยายตัวได้ดี ส่งผลให้การขยายตัวมีค่าน้อย นอกจากนี้พบว่าการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ Replacement มีค่าน้อยกว่าของ Addition อาจเป็นเพราะเพสต์ Replacement เป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลง จึงส่งผลให้การขยายตัวออโตเคลฟเกิดน้อยกว่า และพบว่าเพสต์ทั้ง Addition และ Replacement เมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น จะให้ค่าการขยายตัวออโตเคลฟที่มากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดมีปริมาณของ CaO ค่อนข้างมาก เมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้เกิดการขยายตัวออโตเคลฟมากขึ้น



รูปที่ 4.1 การขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด

4.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3

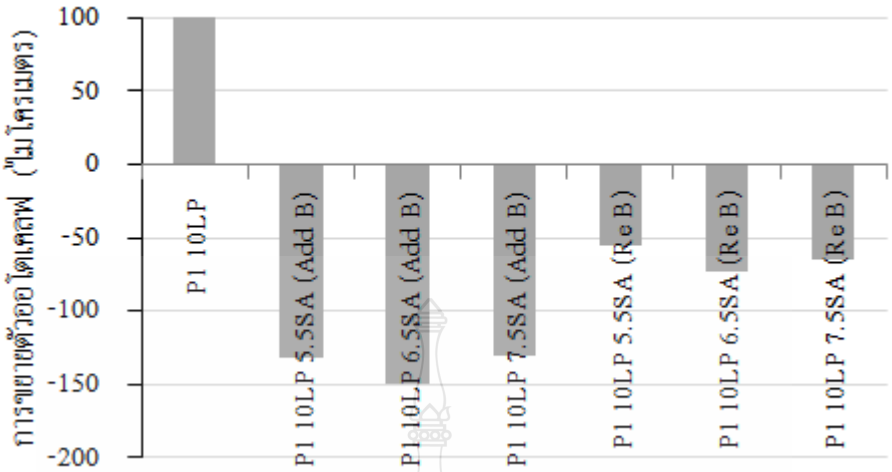
รูปที่ 4.2 แสดงการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และเพสต์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้งที่ใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) และโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ร้อยละ 3.5 4.5 และ 5.5 โดยน้ำหนัก พบว่าการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ทั้ง Addition และ Replacement มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด ทำให้เกิดการประสานของเพสต์ ทำให้โครงสร้างเพสต์ต้านทานการขยายตัวได้ดี ส่งผลให้การขยายตัวมีค่าน้อย นอกจากนี้พบว่าการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ Replacement มีค่าน้อยกว่าของ Addition อาจเป็นเพราะเพสต์ Replacement เป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลง จึงส่งผลให้การขยายตัวออโตเคลฟเกิดน้อยกว่า และพบว่าเพสต์ทั้ง Addition และ Replacement เมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น จะให้ค่าการขยายตัวออโตเคลฟที่มากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดมีปริมาณของ CaO ค่อนข้างมาก เมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้เกิดการขยายตัวออโตเคลฟมากขึ้น



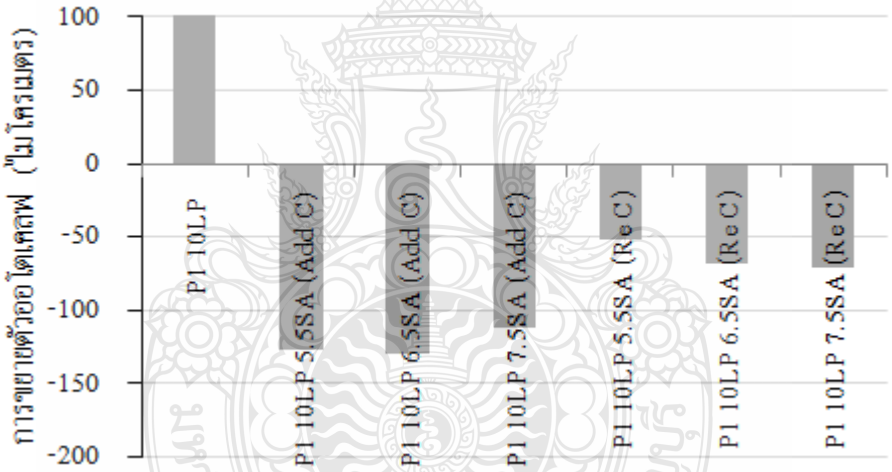
รูปที่ 4.2 การขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และเพสต์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด

4.1.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน

รูปที่ 4.3 แสดงการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และเพสต์ผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด ทั้งที่ใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) และโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก พบว่าการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ทั้ง Addition และ Replacement มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด ทำให้เกิดการประสานของเพสต์ ทำให้โครงสร้างเพสต์ต้านทานการขยายตัวได้ดี ส่งผลให้การขยายตัวมีค่าน้อย นอกจากนี้พบว่าการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ Replacement มีค่ามากกว่าของ Addition และพบว่าเพสต์ทั้ง Addition และ Replacement เมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น จะให้ค่าการขยายตัวออโตเคลฟที่ไม่แตกต่างกัน



ก) แทนที่ในวัสดุประสาน



ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์

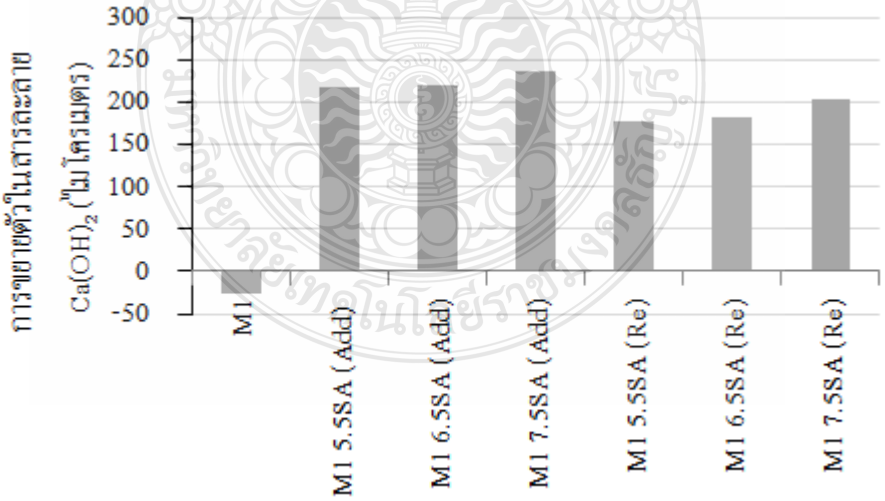
รูปที่ 4.3 การขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และเพสต์ผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด

4.2 การขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์

จากการศึกษาการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้งที่ใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) และโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน สามารถอธิบายผลการศึกษาได้ดังนี้

4.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

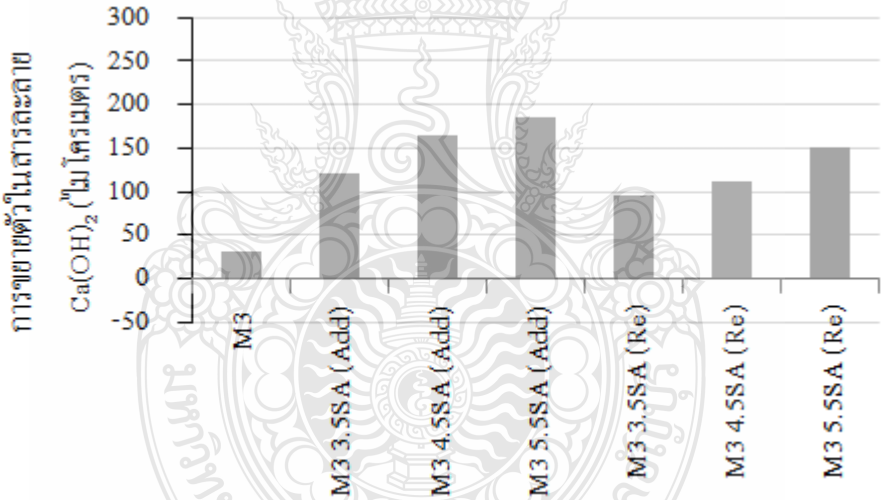
รูปที่ 4.4 แสดงการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้งที่ใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) และโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก พบว่าการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ที่อายุ 14 วัน ทั้ง Addition และ Replacement มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดมีปริมาณของ SO_3 ที่ค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดแอทริงไจท์มาก [7] ส่งผลให้เกิดการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์มาก นอกจากนี้พบว่าการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ Addition มีค่ามากกว่าของ Replacement และพบว่ามอร์ต้าร์ทั้ง Addition และ Replacement เมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น จะให้ค่าการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มากกว่าเมื่อใส่ในปริมาณน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณของ SO_3 มากขึ้น



รูปที่ 4.4 การขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด

4.2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3

รูปที่ 4.5 แสดงการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้งที่ใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) และโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ร้อยละ 3.5 4.5 และ 5.5 โดยน้ำหนัก พบว่าการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ที่อายุ 14 วัน ทั้ง Addition และ Replacement มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดมีปริมาณของ SO_3 ที่ค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดแอทริงไจท์มาก [7] ส่งผลให้เกิดการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์มาก นอกจากนี้พบว่าการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ Addition มีค่ามากกว่าของ Replacement และพบว่ามอร์ต้าร์ทั้ง Addition และ Replacement เมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น จะให้ค่าการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มากกว่าเมื่อใส่ในปริมาณน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณของ SO_3 มากขึ้น

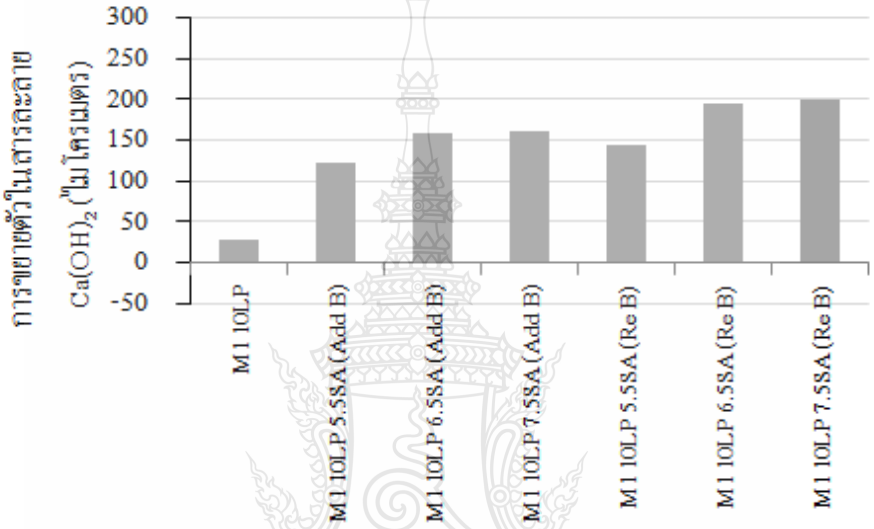


รูปที่ 4.5 การขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด

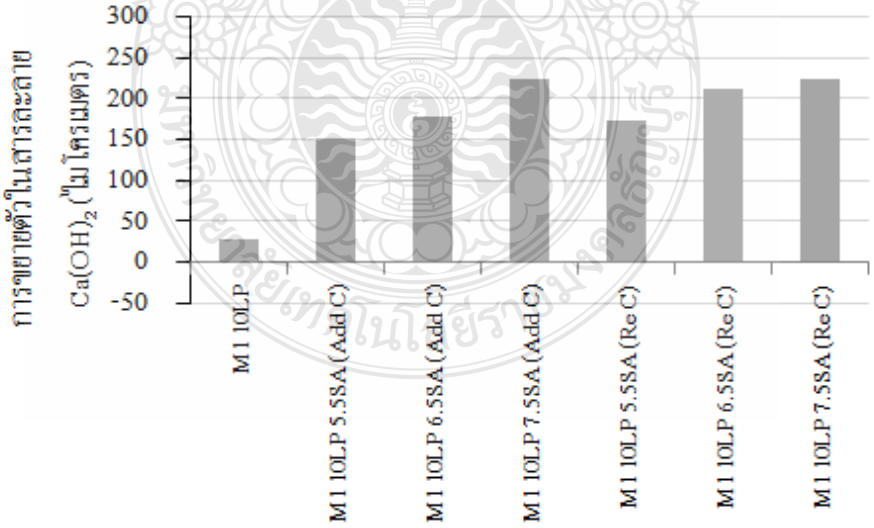
4.2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน

รูปที่ 4.6 แสดงการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด ทั้งที่ใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) และโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก พบว่าการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของ

มอร์ต้าร์ที่อายุ 14 วัน ทั้ง Addition และ Replacement มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดมีปริมาณของ SO_3 ที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดแอทริงไจท์มาก [7] ส่งผลให้เกิดการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์มาก นอกจากนี้พบว่ามอร์ต้าร์ทั้ง Addition และ Replacement เมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น จะให้ค่าการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มากกว่าเมื่อใส่ในปริมาณน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณของ SO_3 มากขึ้น



ก) แทนที่ในวัสดุประสาน



ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์

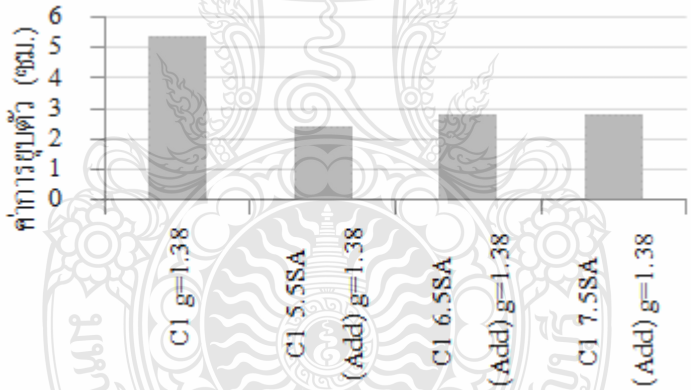
รูปที่ 4.6 การขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด

4.3 ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต

จากการศึกษาค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดทั้งที่ใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) และโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน สามารถอธิบายผลการศึกษาได้ดังนี้

4.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

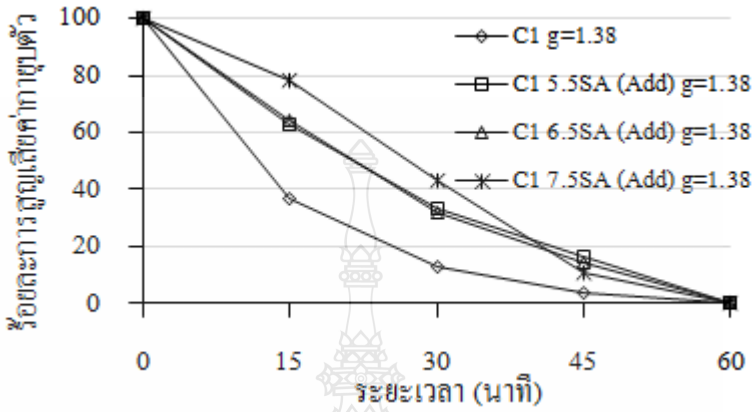
รูปที่ 4.7 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด โดยใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.38 พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใส่สารเพิ่มกำลังอัด มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัด ช่วยให้เกิดการประสานของเพสต์ ทำให้โครงสร้างเพสต์มีความแน่นมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการยุบตัวมีค่าน้อยลง ส่วนเมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่ต่างกัน จะให้ค่าการยุบตัวที่ไม่แตกต่างกัน



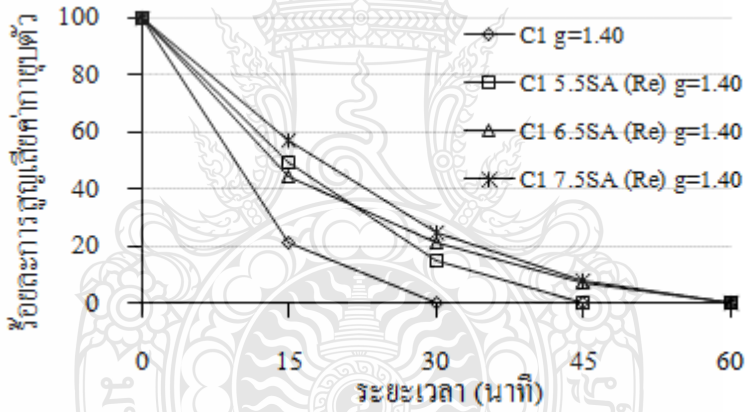
รูปที่ 4.7 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

รูปที่ 4.8 แสดงการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.38 และ Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีตเท่ากับ 1.40 พบว่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต ทั้ง Addition และ Replacement มีค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดมีปริมาณของ SO_3 ที่ค่อนข้างสูง

เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดแอทริงไจท์มาก [7] ส่งผลให้การสูญเสียค่าการยุบตัวเกิดขึ้นช้าลง และพบว่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตระหว่าง Addition และ Replacement รวมทั้งการสูญเสียค่าการยุบตัวระหว่างคอนกรีตที่ผสมปริมาณของสารเพิ่มกำลังอัดที่ต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกัน



ก) Addition



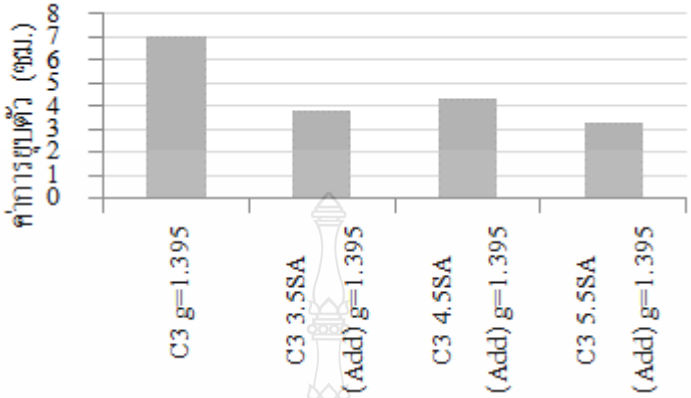
ข) Replacement

รูปที่ 4.8 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

4.3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3

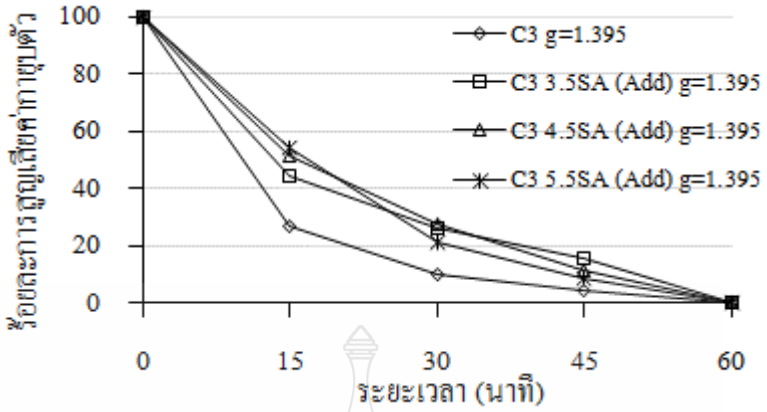
รูปที่ 4.9 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด โดยใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) ร้อยละ 3.5 4.5 และ 5.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.395 พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใส่สารเพิ่มกำลังอัด มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัด ช่วยให้เกิดการประสานของเพสต์ ทำให้โครงสร้างเพสต์มีความแน่น

มากขึ้น ส่งผลให้ค่าการยุบตัวมีค่าน้อยลง ส่วนเมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่ต่างกัน จะให้ค่าการยุบตัวที่ไม่แตกต่างกัน

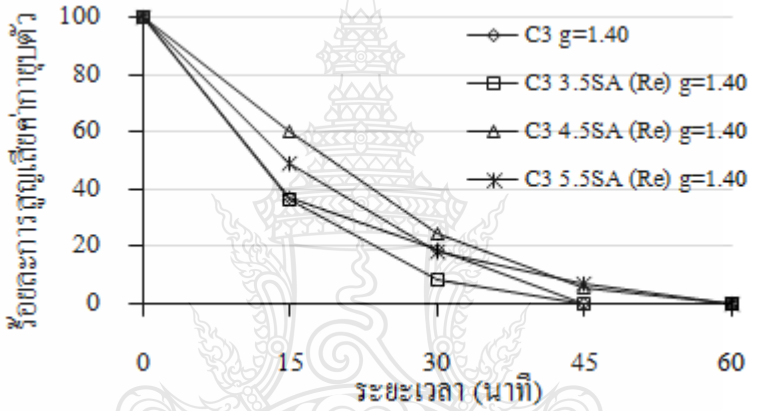


รูปที่ 4.9 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

รูปที่ 4.10 แสดงการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 3.5 4.5 และ 5.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.395 และ Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีตเท่ากับ 1.40 พบว่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต Addition มีค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน ส่วนคอนกรีต Replacement เมื่อแทนที่ปริมาณร้อยละ 3.5 มีค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวเร็วกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน ในขณะที่ปริมาณร้อยละ 4.5 และ 5.5 มีค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดมีปริมาณของ SO_3 ที่ค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดแอทริงไจท์มาก [7] ส่งผลให้การสูญเสียค่าการยุบตัวเกิดขึ้นช้าลง และพบว่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตระหว่าง Addition และ Replacement รวมทั้งการสูญเสียค่าการยุบตัวระหว่างคอนกรีตที่ผสมปริมาณของสารเพิ่มกำลังอัดที่ต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกัน



ก) Addition

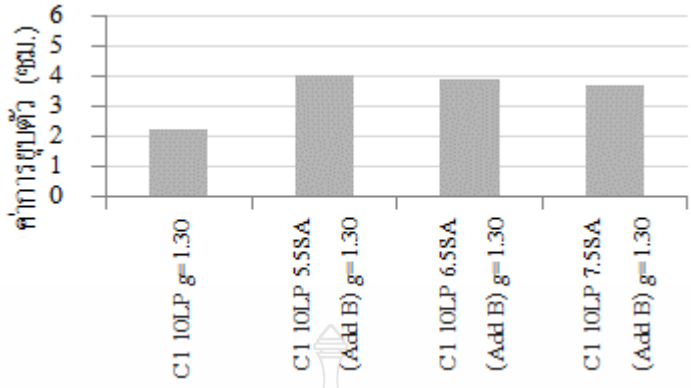


ข) Replacement

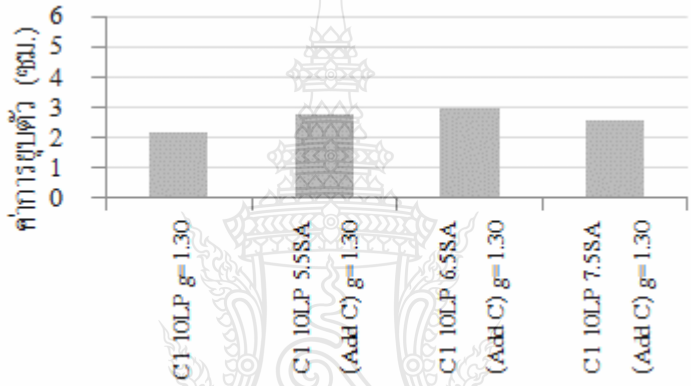
รูปที่ 4.10 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

4.3.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน

รูปที่ 4.11 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด โดยใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีตเท่ากับ 1.30 พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใส่สารเพิ่มกำลังอัด มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน ส่วนเมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่ต่างกัน จะให้ค่าการยุบตัวที่ไม่แตกต่างกัน



ก) แทนที่ในวัสดุประสาน

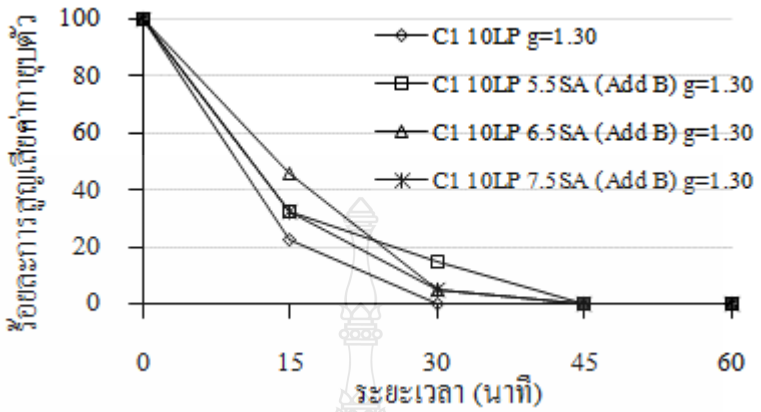


ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์

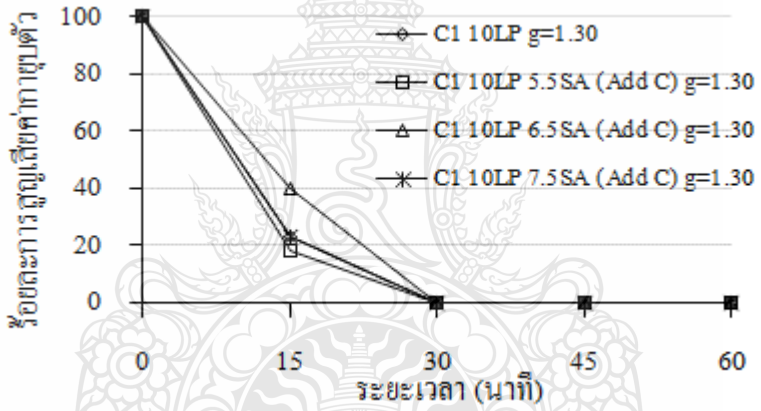
รูปที่ 4.11 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด

รูปที่ 4.12 แสดงการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.30 และ Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.40 พบว่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต ทั้ง Addition และ Replacement มีค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดมีปริมาณของ SO_3 ที่ค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดแอทริงไจท์มาก [7] ส่งผลให้การสูญเสียค่าการยุบตัวเกิดขึ้นช้าลง และพบว่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต

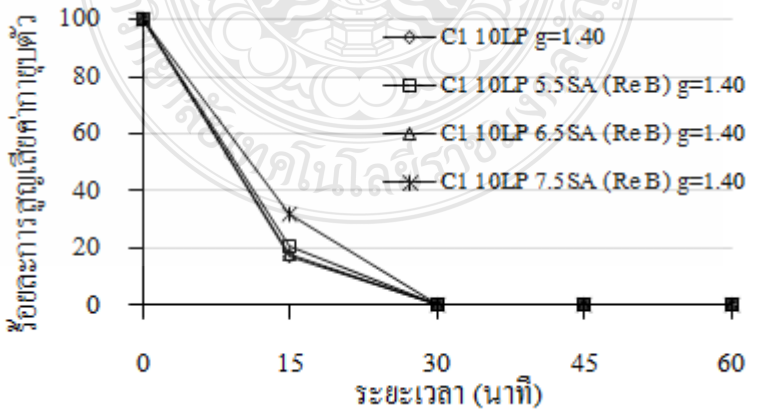
ระหว่าง Addition และ Replacement รวมทั้งการสูญเสียค่าการยุบตัวระหว่างคอนกรีตที่ผสมปริมาณของสารเพิ่มกำลังอัดที่ต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกัน



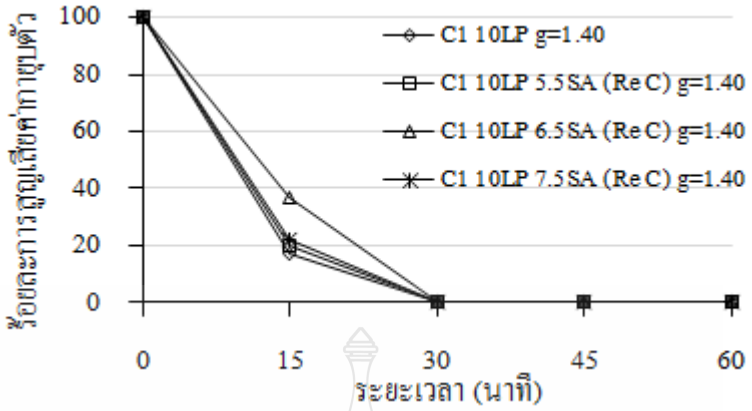
ก) Addition as % of Binder



ข) Addition as % of Cement



ค) Replacement as % of Binder



ง) Replacement as % of Cement

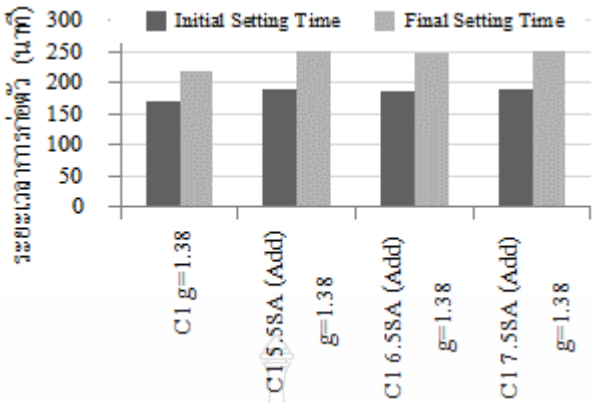
รูปที่ 4.12 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด

4.4 การก่อตัวของคอนกรีต

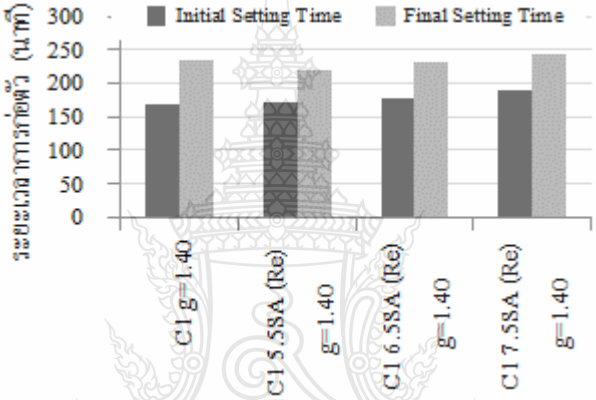
จากการศึกษาการก่อตัวของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้งที่ใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) และโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน สามารถอธิบายผลการศึกษาได้ดังนี้

4.4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

รูปที่ 4.13 แสดงการก่อตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.38 และ Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.40 พบว่าการก่อตัวของคอนกรีต ทั้ง Addition และ Replacement มีระยะเวลาการก่อตัวนานกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดมีปริมาณของ SO_3 ที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดแอทริงไจท์มาก [7] ส่งผลให้การก่อตัวเกิดขึ้นช้าลง โดยการก่อตัวของคอนกรีต Addition และ Replacement มีค่าไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับปริมาณที่ต่างกันของสารเพิ่มกำลังอัดที่ผสมในคอนกรีตให้ผลการก่อตัวของคอนกรีตที่ไม่แตกต่างกัน



ก) Addition



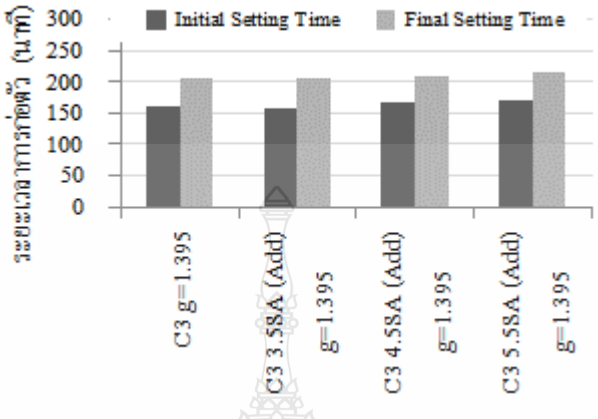
ข) Replacement

รูปที่ 4.13 การก่อตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

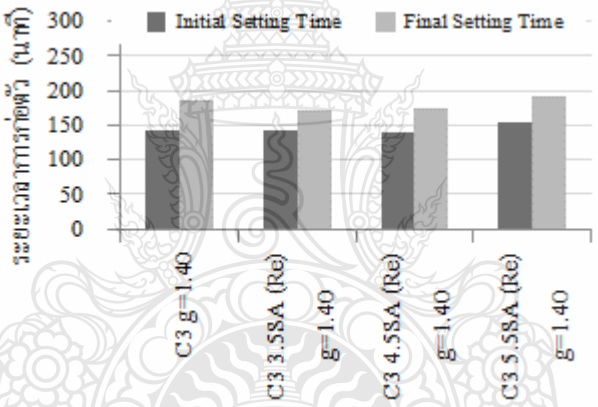
4.4.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3

รูปที่ 4.14 แสดงการก่อตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 3.5 4.5 และ 5.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.395 และ Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.40 พบว่าการก่อตัวของคอนกรีต ทั้ง Addition และ Replacement มีระยะเวลาการก่อตัวนานกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดมีปริมาณของ SO_3 ที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดแอทริงไจท์มาก [7] ส่งผลให้การก่อตัวเกิดขึ้นช้าลง โดยการ

ก่อตัวของคอนกรีต Addition และ Replacement มีค่าไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับปริมาณที่ต่างกันของสารเพิ่มกำลังอัดที่ผสมในคอนกรีตให้ผลการก่อตัวของคอนกรีตที่ไม่แตกต่างกัน



ก) Addition



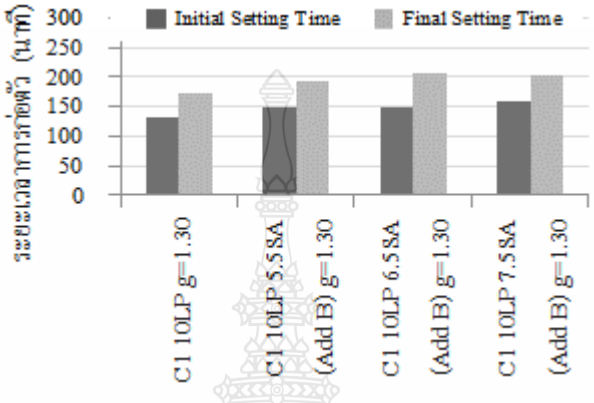
ข) Replacement

รูปที่ 4.14 การก่อตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

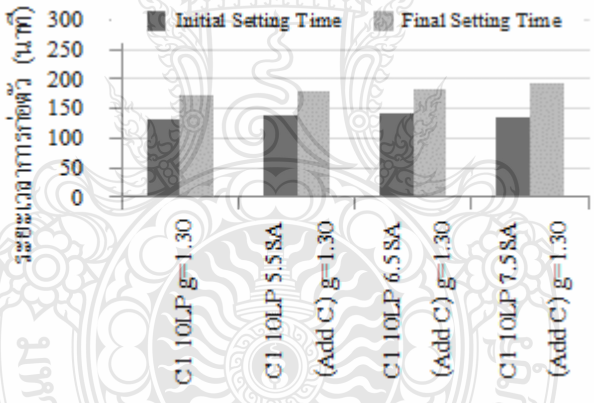
4.4.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน

รูปที่ 4.15 แสดงการก่อตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.30 และ Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีตเท่ากับ 1.40 พบว่าการก่อตัวของคอนกรีต Addition มีระยะเวลาการก่อตัวนานกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน ส่วนคอนกรีต Replacement มีระยะเวลาการก่อตัวสั้นกว่าของปูนซีเมนต์

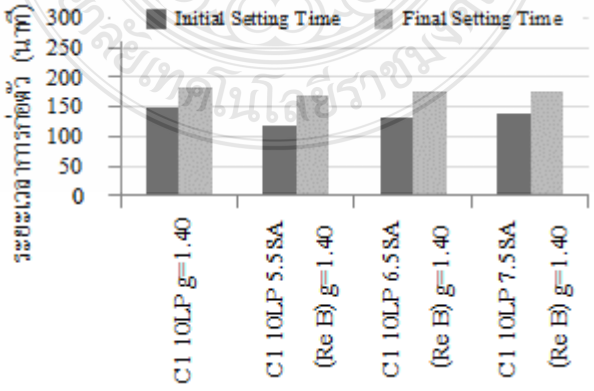
ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดมีปริมาณของ SO_3 ที่ค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดแอทริงไจท์มาก [7] ส่งผลให้การก่อตัวเกิดขึ้นช้าลง โดยการก่อตัวของคอนกรีต Addition มีระยะเวลาการก่อตัวนานกว่าของ Replacement ส่วนปริมาณที่ต่างกันของสารเพิ่มกำลังอัดที่ผสมในคอนกรีตให้ผลการก่อตัวของคอนกรีตที่ไม่แตกต่างกัน



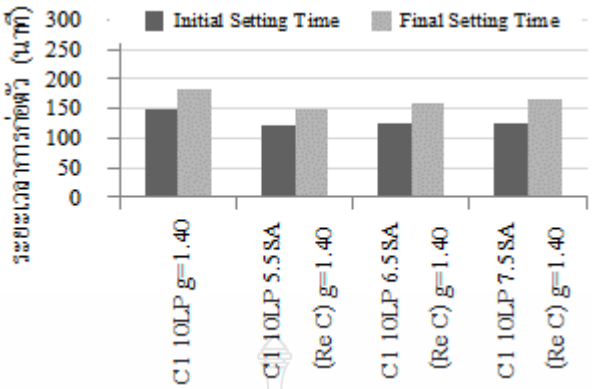
ก) Addition as % of Binder



ข) Addition as % of Cement



ค) Replacement as % of Binder



ง) Replacement as % of Cement

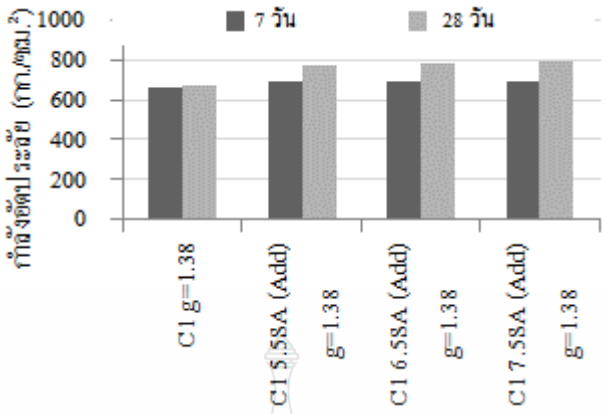
รูปที่ 4.15 การก่อตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด

4.5 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

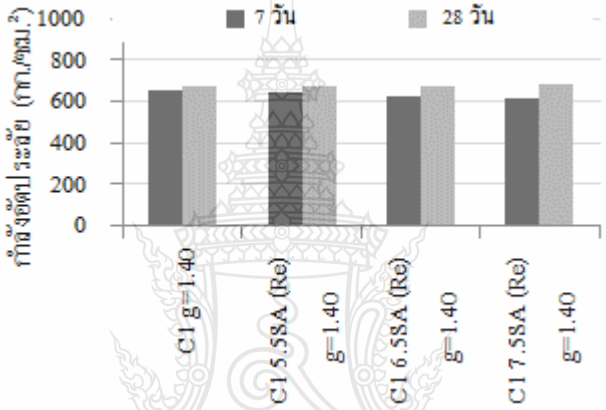
จากการศึกษากำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้งที่ใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) และโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน สามารถอธิบายผลการศึกษาได้ดังนี้

4.5.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

รูปที่ 4.16 แสดงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.38 และ Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.40 พบว่ากำลังอัดประลัยทั้งที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ของคอนกรีต Addition มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนคอนกรีต Replacement มีกำลังอัดประลัยที่อายุ 7 วัน น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่อายุ 28 วัน มีกำลังอัดประลัยที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะคอนกรีต Addition เป็นการใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) น้อยลง จึงส่งผลให้กำลังอัดประลัยสูงขึ้น ส่วนคอนกรีต Replacement เป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลง จึงส่งผลให้กำลังอัดประลัยต่ำลง นอกจากนี้พบว่าคอนกรีตทั้ง Addition และ Replacement เมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่ต่างกัน ให้กำลังอัดประลัยที่ไม่แตกต่างกัน



ก) Addition



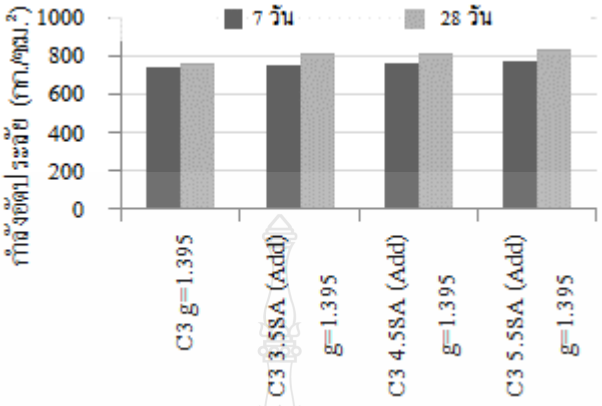
ข) Replacement

รูปที่ 4.16 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ที่อายุ 7 วัน และ28 วัน

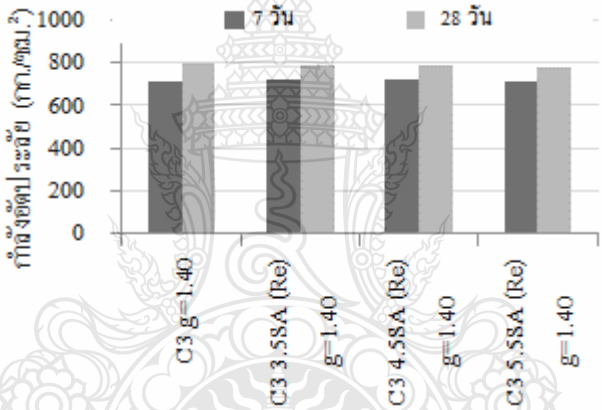
4.5.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3

รูปที่ 4.17 แสดงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 3.5 4.5 และ 5.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.395 และ Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.40 พบว่ากำลังอัดประลัยทั้งที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ของคอนกรีต Addition มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน ส่วนคอนกรีต Replacement กำลังอัดประลัยทั้งที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน มีค่าใกล้เคียงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะคอนกรีต Addition เป็นการใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) น้อยลง จึงส่งผลให้กำลังอัดประลัยสูงขึ้น ส่วนคอนกรีต Replacement เป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลง จึงส่งผลให้กำลังอัดประลัยต่ำลง

นอกจากนี้พบว่าคอนกรีตทั้ง Addition และ Replacement เมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่ต่างกัน ให้กำลังอัดประลัยที่ไม่แตกต่างกัน



ก) Addition



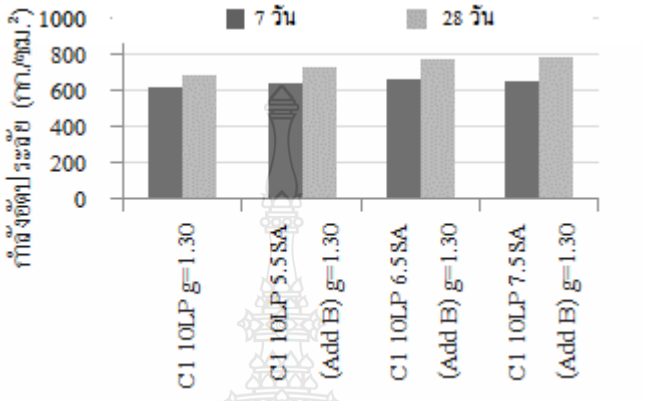
ข) Replacement

รูปที่ 4.17 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ที่อายุ 7 วัน และ28 วัน

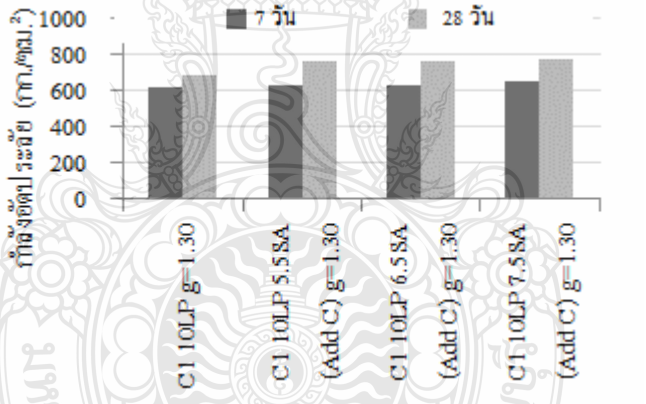
4.5.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน

รูปที่ 4.18 แสดงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.30 และ Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีตเท่ากับ 1.40 พบว่ากำลังอัดประลัยทั้งที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ของคอนกรีต Addition มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน ส่วนคอนกรีต Replacement กำลังอัดประลัยทั้งที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน มีค่าใกล้เคียงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ

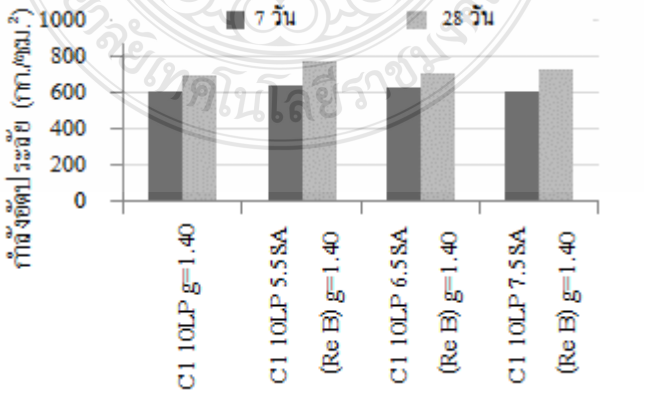
คอนกรีต Addition เป็นการใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) น้อยลง จึงส่งผลให้กำลังอัดประลัยสูงขึ้น ส่วนคอนกรีต Replacement เป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลง จึงส่งผลให้กำลังอัดประลัยต่ำลง นอกจากนี้พบว่าคอนกรีตทั้ง Addition และ Replacement เมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่ต่างกัน ให้กำลังอัดประลัยที่ไม่แตกต่างกัน



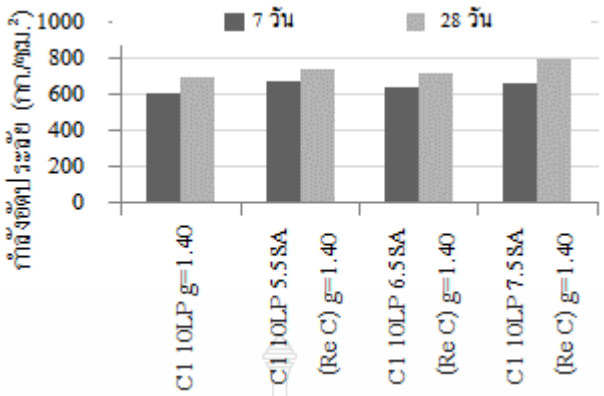
ก) Addition as % of Binder



ข) Addition as % of Cement



ค) Replacement as % of Binder



ง) Replacement as % of Cement

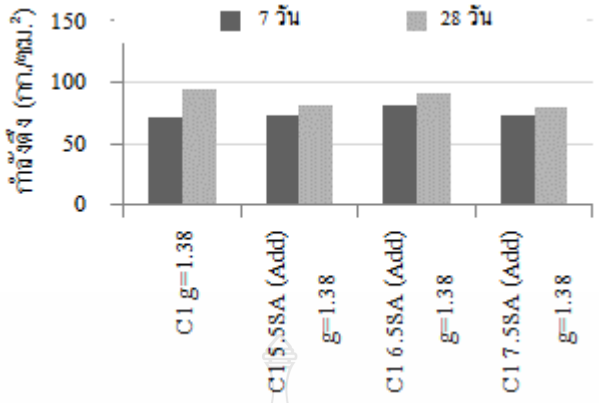
รูปที่ 4.18 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด

4.6 กำลังดึงของคอนกรีต

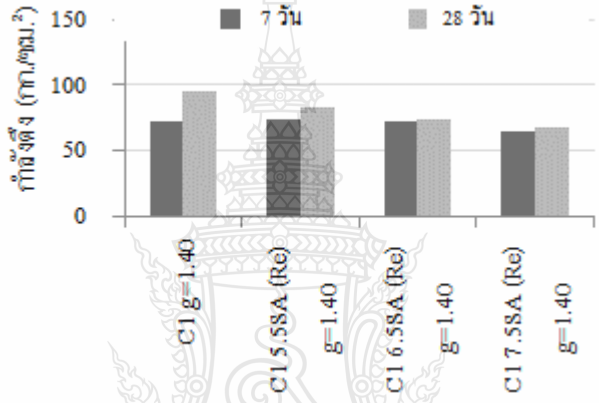
จากการศึกษากำลังดึงของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้งที่ใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) และโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน สามารถอธิบายผลการศึกษาได้ดังนี้

4.6.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

รูปที่ 4.19 แสดงกำลังดึงของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.38 และ Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.40 พบว่ากำลังดึงของคอนกรีต Addition มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีต Replacement มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว (กรณีกำลังอัดประลัย) สังเกตว่าค่ากำลังดึงของคอนกรีตเป็นสัดส่วนตรงกับกำลังอัดประลัย ซึ่งเป็นลักษณะโดยทั่วไปของคอนกรีต



ก) Addition

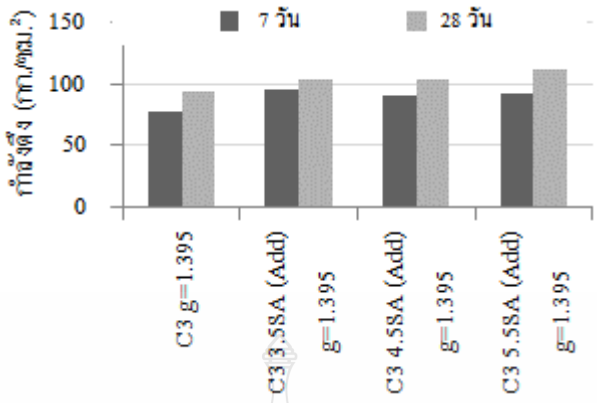


ข) Replacement

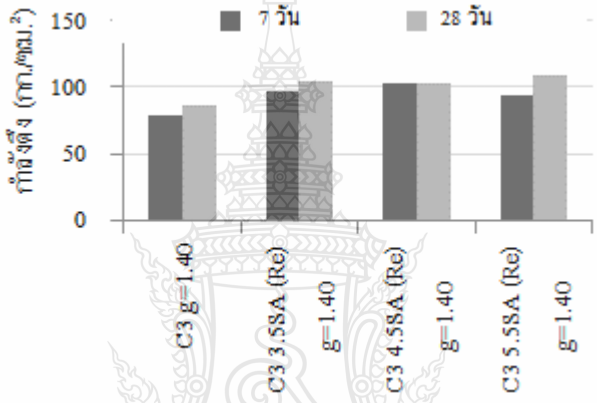
รูปที่ 4.19 กำลังดึงของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

4.6.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3

รูปที่ 4.20 แสดงกำลังดึงของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 3.5 4.5 และ 5.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.395 และ Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.40 พบว่ากำลังดึงของคอนกรีต ทั้ง Addition และ Replacement มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว (กรณีกำลังอัดประลัย) สังเกตว่าค่ากำลังดึงของคอนกรีตเป็นสัดส่วนตรงกับกำลังอัดประลัย ซึ่งเป็นลักษณะโดยทั่วไปของคอนกรีต



ก) Addition

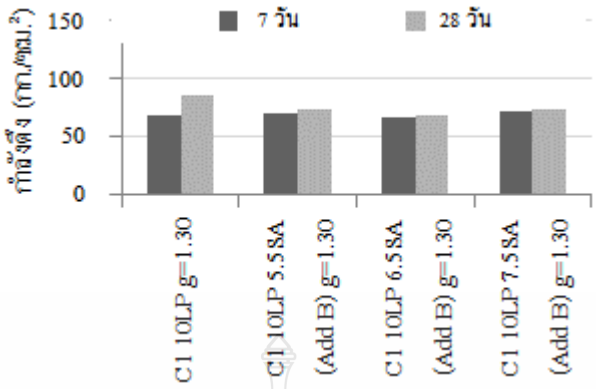


ข) Replacement

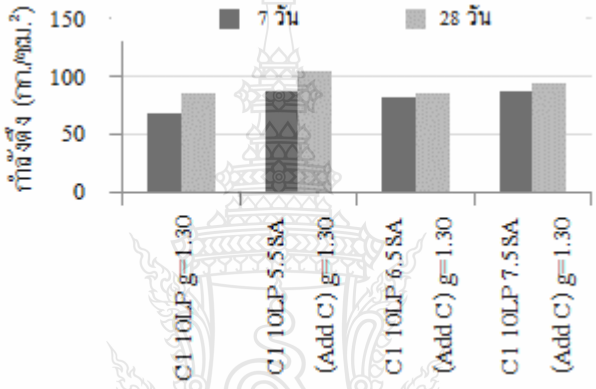
รูปที่ 4.20 กำลังดึงของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

4.6.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน

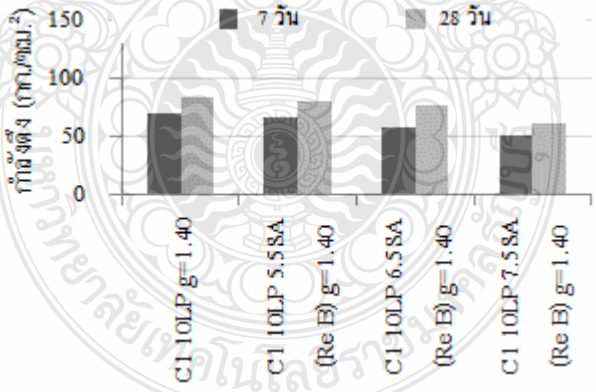
รูปที่ 4.21 แสดงกำลังดึงของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีตเท่ากับ 1.30 และ Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีตเท่ากับ 1.40 พบว่ากำลังดึงของคอนกรีต Addition มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีต Replacement มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว (กรณีกำลังอัดประลัย) สังเกตว่าค่ากำลังดึงของคอนกรีตเป็นสัดส่วนตรงกับกำลังอัดประลัย ซึ่งเป็นลักษณะโดยทั่วไปของคอนกรีต



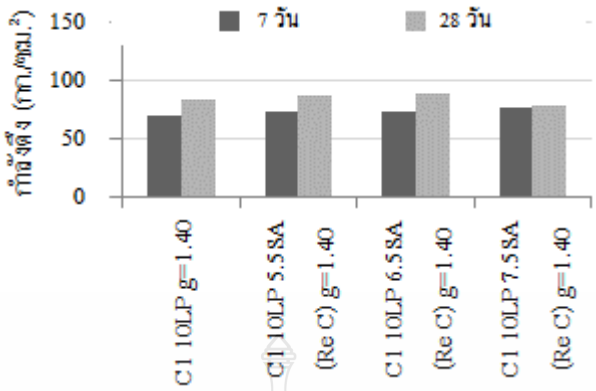
ก) Addition as % of Binder



ข) Addition as % of Cement



ค) Replacement as % of Binder



ง) Replacement as % of Cement

รูปที่ 4.21 กำลังดึงของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมผงหินปูนและสารเพิ่มกำลังอัด

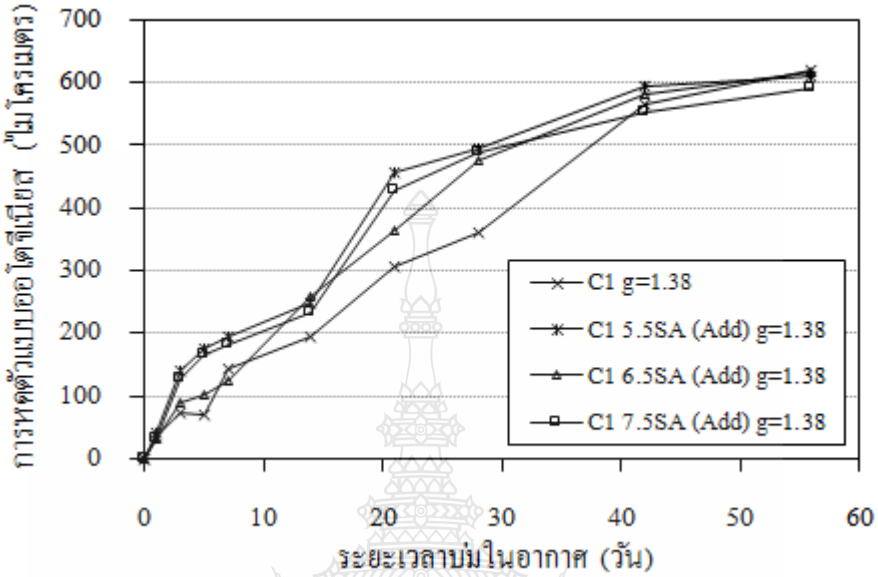
4.7 การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต

จากการศึกษาการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้งที่ใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) และโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สามารถอธิบายผลการศึกษาได้ดังนี้

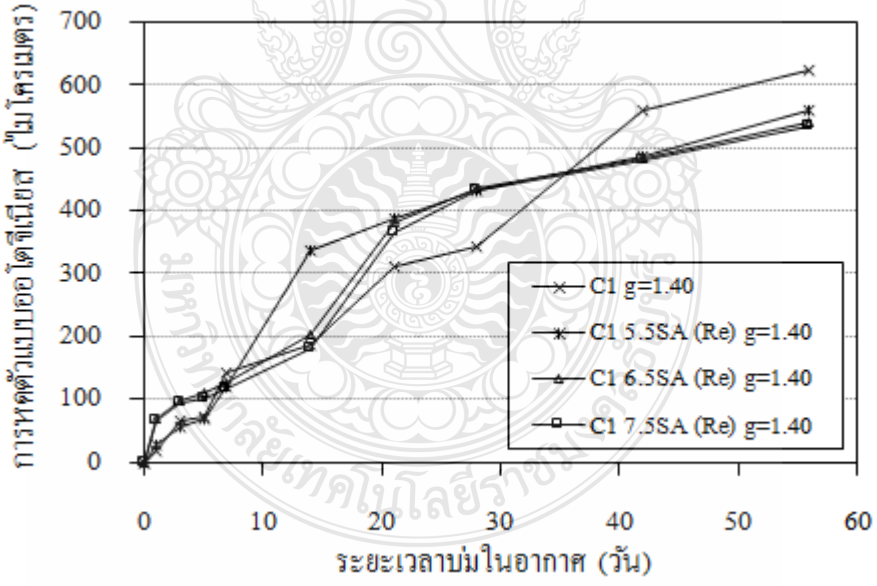
4.7.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

รูปที่ 4.22 แสดงการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.38 และ Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.40 พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต ทั้ง Addition และ Replacement มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดทำให้เกิดความต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมากขึ้น จึงส่งผลให้การหดตัวแบบออโตจีนัสมีค่ามาก นอกจากนี้พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต Addition มีค่ามากกว่าของ Replacement และพบว่าคอนกรีตทั้ง Addition และ Replacement เมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น จะให้ค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสที่ไม่แตกต่างกัน สุดท้ายพบว่าช่วงอายุปลาย (Long Term) มีแนวโน้มว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต ทั้ง Addition และ Replacement จะมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะช่วงอายุปลายปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนใกล้สิ้นสุด ส่งผลให้คอนกรีตเริ่มแข็งตัว ในขณะที่ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคอนกรีตผสมสารเพิ่ม

กำลังอัดดำเนินต่อไป จึงส่งผลให้ความพรุนของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดจะสูงกว่า จึงส่งผลให้การหดตัวแบบออโตจีนัสมีค่าน้อย



ก) Addition



ข) Replacement

รูปที่ 4.22 การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

บทที่ 5
สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาทดลองการวิจัยในครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 3 และประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน โดยการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ Replacement มีค่าน้อยกว่าของ Addition และการใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากให้ค่าการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์มากขึ้น

5.1.2 การขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 3 และประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน โดยการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ Replacement มีค่าน้อยกว่าของ Addition และการใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากให้ค่าการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น

5.1.3 ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดมีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 ส่วนการผสมปริมาณของสารเพิ่มกำลังอัดที่ต่างกัน ให้ทั้งค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวที่ไม่แตกต่างกัน

5.1.4 การก่อตัวของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 3 และประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน ส่วนการผสมปริมาณของสารเพิ่มกำลังอัดที่ต่างกัน ให้การก่อตัวของคอนกรีตที่ไม่แตกต่างกัน

5.1.5 กำลังอัดประลัยและกำลังดึงของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 3 และประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน โดยคอนกรีตที่ผสมสารเพิ่มกำลังอัดทั้ง Addition และ Replacement รวมทั้งการผสมปริมาณของสารเพิ่มกำลังอัดที่ต่างกัน ให้ค่ากำลังอัดประลัยและกำลังดึงของคอนกรีตที่ไม่แตกต่างกัน

5.1.6 การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยการขยายตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต Replacement มีค่าน้อยกว่าของ Addition และการใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากให้ค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสที่ไม่แตกต่างกัน

บรรณานุกรม

[1] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, ความคงทนของคอนกรีต, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, พ.ศ. 2543.

[2] Parnthep Julnipitawong and Somnuk Tangtermsirikul, Investigation on Performance of Concrete and Mortar Using Active Chemical Compound Rockfil-HSM, Final Report Submission to BKG Group Corporation, 2013.

[3] US Bureau of Reclamation, Concrete Manual 5th Edn., Denver, Colorado, 1949.

[4] US Bureau of Reclamation, Concrete Manual 8th Edn., Denver, Colorado, 1975.

[5] Verbeck, G.J., and Foster, C.W., Long-Time Study of Cement Performance in Concrete with Special Reference to Heats of Hydration, Portland Cement Association, Bulletin 32, 1949.

[6] ทีฆทัศ, และคณะ. 2550. "การขยายตัวของมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูน และเถ้าลอยในสารละลายซัลเฟต." ปริญญานิพนธ์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[7] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต, สมาคมคอนกรีตไทย, พิมพ์ครั้งที่ 5, พ.ศ. 2551.

[8] กฤษฎา มัครเมธี, และคณะ. 2551. "ความสัมพันธ์ของความพรุนและกำลังอัดของมอร์ต้าร์เถ้าลอย-ผงหินปูน." ปริญญานิพนธ์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[9] BKG Group Corporation [BKG Chemical]. (2011). Rockfil-HSM Concrete Chemical Products. Retrieved July 11, 2011, from http://bkgmax.com/index.php?page=th/concrete.html

[10] American Society for Testing and Materials, ASTM C494/C494M-99a: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 261-269.

[11] Bijen, J. and Van Der Wegen G., "Swelling of Concrete in Deep Seawater", Durability of Concrete, ACI SP-145, 1994.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[12] American Society for Testing and Materials, ASTM C143-90a: Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 89-91.

[13] Teychenne', D.C, Nicholls J.C., Franklin R.E. and Hobbs D.W., Design of Concrete Mixes, Building Research Establishment, Department of the Environment, London, 1988.

[14] ปูนมิกซ์คอนกรีต. (2556). ลักษณะการยุบตัวของคอนกรีต. ค้นเมื่อ 16 กุมภาพันธ์ 2556, จาก http://poonmix.com/images/blog_img/Types_of_concrete_slump

[15] American Society for Testing and Materials, ASTM C403/C403M-99: Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 222-227.

[16] TEST MARK INDUSTRIES [TMI]. (2013). Acme Penetrometer CA-2800. Retrieved February 7, 2013, from http://testmark.net/showitem-383.html

[17] British Standard Institute, BS 1881: Part 108, Method of Marking Test Cube from Fresh Concrete, London, 1983.

[18] American Society for Testing and Materials, ASTM C192/C192 M-00: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 120-127.

[19] American Society for Testing and Materials, ASTM C617-98: Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 305-309.

[20] Chindaprasirt, P., Influence of Loading History on the Properties of Concrete, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of New South Wales, 1980.

[21] American Society for Testing and Materials, ASTM C496-96: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 273-276.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[22] Angsuwatana, E., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., and T. Ketratanaborvorn, Use of Classified Mae Moh Fly Ash in High Strength Concrete, Supplementary Papers of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slug and Natural Pozzolans in Concrete, 1998, Bangkok, Thailand, 49-60.

[23] American Society for Testing and Materials, ASTM C78-00: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.01, Philadelphia, 32-34.

[24] เรืองรุชดิ์ ธีระโรจน์. (2556). การทดสอบคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว. ค้นเมื่อ 5 ตุลาคม 2556, จาก http://raungrut.sungkomonline.com/?p=board_ans&webID=1 1 &pageID=3 &questionID= 12%20

[25] Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete, Japan Concrete Institute, "Autogenous Shrinkage of Concrete", Proceedings of the International Workshop organized by JCI, Hiroshima, June 13-14, 1998, E&FN Spon, pp. 3-60.

[26] Tangtermsirikul, S., "Effect of Chemical Composition and Particle Size of Fly Ash on Autogenous Shrinkage of Paste", Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, 13-14 June 1998, Hiroshima, Japan, E&FN Spon, pp. 175-186.

[27] บริษัท รุ่งอรุณ แมชชีนเนอรี่ จำกัด. (2556). ตะแกรงร่อนคัดขนาด. ค้นเมื่อ 20 กุมภาพันธ์ 2556, จาก http://rama1989.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=539136208&Ntype=2

[28] Intermesh [Indiamart]. (2012). Universal Testing Machine (UTM). Retrieved August 19, 2012, from http://dir.indiamart.com/kolkata/universal-testing-machine.html

[29] Instron Corporation [Instron]. (2012). Flexural Strength Testing. Retrieved August 20, 2012, from http://www.instron.co.th/th-th/testing-solutions/by-test-type/flexure/astm-c880

[30] แพลนมีเดียช็อป. (2556). หม้อนึ่งความดัน (Autoclave). ค้นเมื่อ 21 กุมภาพันธ์ 2556, จาก http://www.plantmediashop.com/store/product/view/Autoclave_Sterilizer

บรรณานุกรม (ต่อ)

[31] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร บุญรอด คุปติทัฬหิ และคณะทำงาน, คู่มือการทดสอบหิน ทราย และคอนกรีต, บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด (CPAC), พิมพ์ครั้งที่ 1, พ.ศ. 2543.

[32] National Institute of Technology Tiruchirappalli [NITT]. (2013). Methodology of Compressive Strength. Retrieved March 27, 2013, from http://www.nitt.edu/www/uploads/1527_utm

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลการทดลองการขยายตัวออโตเคลฟ

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์

Mix No.	Mix Designation	Autoclave Expansion (Micrometer)	Autoclave Expansion (%)
1	P1	23	0.002%
2	P1 5.5SA (Add)	-79	-0.008%
3	P1 6.5SA (Add)	-67	-0.007%
4	P1 7.5SA (Add)	-54	-0.005%
5	P1 5.5SA (Re)	-151	-0.015%
6	P1 6.5SA (Re)	-139	-0.014%
7	P1 7.5SA (Re)	-117	-0.012%
8	P1 10LP	106	0.011%
9	P1 10LP 5.5SA (Add B)	-132	-0.013%
10	P1 10LP 6.5SA (Add B)	-149	-0.015%
11	P1 10LP 7.5SA (Add B)	-131	-0.013%
12	P1 10LP 5.5SA (Add C)	-126	-0.013%
13	P1 10LP 6.5SA (Add C)	-130	-0.013%
14	P1 10LP 7.5SA (Add C)	-112	-0.011%
15	P1 10LP 5.5SA (Re B)	-55	-0.005%
16	P1 10LP 6.5SA (Re B)	-73	-0.007%
17	P1 10LP 7.5SA (Re B)	-64	-0.006%
18	P1 10LP 5.5SA (Re C)	-52	-0.005%
19	P1 10LP 6.5SA (Re C)	-68	-0.007%
20	P1 10LP 7.5SA (Re C)	-71	-0.007%
21	P3	11	0.001%
22	P3 3.5SA (Add)	-42	-0.004%
23	P3 4.5SA (Add)	-38	-0.004%
24	P3 5.5SA (Add)	-36	-0.004%
25	P3 3.5SA (Re)	-50	-0.005%
26	P3 4.5SA (Re)	-46	-0.005%
27	P3 5.5SA (Re)	-43	-0.004%

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซต์

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองการขยายตัวในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซต์ของมอร์ต้าร์

Mix No.	Mix Designation	Expansion in ($CaOH_2$) (Micrometer)	Expansion in $Ca(OH)_2$ (%)
1	M1	-25	-0.003%
2	M1 5.5SA (Add)	217	0.022%
3	M1 6.5SA (Add)	221	0.022%
4	M1 7.5SA (Add)	237	0.024%
5	M1 5.5SA (Re)	178	0.018%
6	M1 6.5SA (Re)	182	0.018%
7	M1 7.5SA (Re)	203	0.020%
8	M1 10LP	28	0.003%
9	M1 10LP 5.5SA (Add B)	121	0.012%
10	M1 10LP 6.5SA (Add B)	159	0.016%
11	M1 10LP 7.5SA (Add B)	162	0.016%
12	M1 10LP 5.5SA (Add C)	151	0.015%
13	M1 10LP 6.5SA (Add C)	178	0.018%
14	M1 10LP 7.5SA (Add C)	224	0.022%
15	M1 10LP 5.5SA (Re B)	144	0.014%
16	M1 10LP 6.5SA (Re B)	194	0.019%
17	M1 10LP 7.5SA (Re B)	199	0.020%
18	M1 10LP 5.5SA (Re C)	173	0.017%
19	M1 10LP 6.5SA (Re C)	211	0.021%
20	M1 10LP 7.5SA (Re C)	223	0.022%
21	M3	31	0.003%
22	M3 3.5SA (Add)	122	0.012%
23	M3 4.5SA (Add)	165	0.017%
24	M3 5.5SA (Add)	186	0.019%
25	M3 3.5SA (Re)	95	0.009%
26	M3 4.5SA (Re)	113	0.011%
27	M3 5.5SA (Re)	151	0.015%

ภาคผนวก ค
ผลการทดลองค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต

Mix No.	Mix	Initial Slump and Sump Loss									
		initial	initial (%)	15 min	15 min (%)	30 min	30 min (%)	45 min	45 min (%)	60 min	60 min (%)
1	C1 g=1.38	5.4	100	2	37	0.7	13	0.2	4	0	0
2	C1 g=1.40	3.8	100	0.8	21	0	0	0	0	0	0
3	C1 5.5SA (Add) g=1.38	2.4	100	1.5	63	0.8	33	0.4	17	0	0
4	C1 6.5SA (Add) g=1.38	2.8	100	1.8	64	0.9	32	0.4	14	0	0
5	C1 7.5SA (Add) g=1.38	2.8	100	2.2	79	1.2	43	0.3	11	0	0
6	C1 5.5SA (Re) g=1.40	5.3	100	2.6	49	0.8	15	0	0	0	0
7	C1 6.5SA (Re) g=1.40	5.6	100	2.5	45	1.2	21	0.4	7	0	0
8	C1 7.5SA (Re) g=1.40	4.9	100	2.8	57	1.2	24	0.4	8	0	0
9	C3 g=1.395	7	100	1.9	27	0.7	10	0.3	4	0	0
10	C3 g=1.40	4.9	100	1.8	37	0.9	18	0	0	0	0
11	C3 3.5SA (Add) g=1.395	3.8	100	1.7	45	1	26	0.6	16	0	0
12	C3 4.5SA (Add) g=1.395	4.3	100	2.2	51	1.2	28	0.5	12	0	0
13	C3 5.5SA (Add) g=1.395	3.3	100	1.8	55	0.7	21	0.3	9	0	0
14	C3 3.5SA (Re) g=1.40	2.5	100	0.9	36	0.2	8	0	0	0	0
15	C3 4.5SA (Re) g=1.40	5.3	100	3.2	60	1.3	25	0.3	6	0	0

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต (ต่อ)

Mix No.	Mix	Initial Slump and Sump Loss									
		initial	initial (%)	15 min	15 min (%)	30 min	30 min (%)	45 min	45 min (%)	60 min	60 min (%)
16	C3 5.5SA (Re) g=1.40	4.5	100	2.2	49	0.8	18	0.3	7	0	0
17	C1 10LP g=1.30	2.2	100	0.5	23	0	0	0	0	0	0
18	C1 10LP g=1.40	4.6	100	0.8	17	0	0	0	0	0	0
19	C1 10LP 5.5SA (Add B) g=1.30	4	100	1.3	33	0.6	15	0	0	0	0
20	C1 10LP 6.5SA (Add B) g=1.30	3.9	100	1.8	46	0.2	5	0	0	0	0
21	C1 10LP 7.5SA (Add B) g=1.30	3.7	100	1.2	32	0.2	5	0	0	0	0
22	C1 10LP 5.5SA (Add C) g=1.30	2.8	100	0.5	18	0	0	0	0	0	0
23	C1 10LP 6.5SA (Add C) g=1.30	3.0	100	1.2	40	0	0	0	0	0	0
24	C1 10LP 7.5SA (Add C) g=1.30	2.6	100	0.6	23	0	0	0	0	0	0
25	C1 10LP 5.5SA (Re B) g=1.40	4.9	100	1	20	0	0	0	0	0	0
26	C1 10LP 6.5SA (Re B) g=1.40	5	100	0.9	18	0	0	0	0	0	0
27	C1 10LP 7.5SA (Re B) g=1.40	5.6	100	1.8	32	0	0	0	0	0	0
28	C1 10LP 5.5SA (Re C) g=1.40	3	100	0.6	20	0	0	0	0	0	0
29	C1 10LP 6.5SA (Re C) g=1.40	2.7	100	1	37	0	0	0	0	0	0
30	C1 10LP 7.5SA (Re C) g=1.40	3.6	100	0.8	22	0	0	0	0	0	0

ภาคผนวก ง
ผลการทดลองการก่อตัว

ตารางที่ ง.1 ผลการทดลองการก่อตัวของคอนกรีต

Mix No.	Mix Designation	Stiffening Time (hr)	min	Initial Setting Time (hr)	min	Final Setting Time (hr)	min
1	C1 g=1.38	2.25	135	2.85	171	3.65	219
2	C1 g=1.40	2.05	123	2.80	168	3.90	234
3	C1 5.5SA (Add) g=1.38	2.37	142	3.12	187	4.16	250
4	C1 6.5SA (Add) g=1.38	2.36	141	3.08	185	4.09	246
5	C1 7.5SA (Add) g=1.38	2.38	143	3.13	188	4.18	251
6	C1 5.5SA (Re) g=1.40	2.27	136	2.86	171	3.64	218
7	C1 6.5SA (Re) g=1.40	2.28	137	2.94	176	3.85	231
8	C1 7.5SA (Re) g=1.40	2.50	150	3.15	189	4.03	242
9	C3 g=1.395	2.19	131	2.67	160	3.41	205
10	C3 g=1.40	1.87	112	2.37	142	3.11	187
11	C3 3.5SA (Add) g=1.395	2.06	124	2.65	159	3.42	205
12	C3 4.5SA (Add) g=1.395	2.25	135	2.78	167	3.49	209
13	C3 5.5SA (Add) g=1.395	2.29	138	2.84	171	3.57	214
14	C3 3.5SA (Re) g=1.40	2.03	122	2.39	143	2.84	170
15	C3 4.5SA (Re) g=1.40	1.77	106	2.31	139	2.90	174

ตารางที่ ง.1 ผลการทดลองการก่อตัวของคอนกรีต (ต่อ)

Mix No.	Mix Designation	Stiffening Time (hr)	min	Initial Setting Time (hr)	min	Final Setting Time (hr)	min
16	C3 5.5SA (Re) g=1.40	2.11	127	2.58	155	3.18	191
17	C1 10LP g=1.30	1.69	101	2.19	131	2.88	173
18	C1 10LP g=1.40	2.02	121	2.46	147	3.03	182
19	C1 10LP 5.5SA (Add B) g=1.30	1.96	117	2.49	149	3.21	192
20	C1 10LP 6.5SA (Add B) g=1.30	1.83	110	2.49	149	3.45	207
21	C1 10LP 7.5SA (Add B) g=1.30	2.10	126	2.65	159	3.38	203
22	C1 10LP 5.5SA (Add C) g=1.30	1.84	110	2.33	140	2.99	179
23	C1 10LP 6.5SA (Add C) g=1.30	1.84	110	2.34	141	3.03	182
24	C1 10LP 7.5SA (Add C) g=1.30	1.58	95	2.24	134	3.24	194
25	C1 10LP 5.5SA (Re B) g=1.40	1.42	85	1.98	119	2.81	169
26	C1 10LP 6.5SA (Re B) g=1.40	1.66	100	2.19	132	2.95	177
27	C1 10LP 7.5SA (Re B) g=1.40	1.83	110	2.30	138	2.94	176
28	C1 10LP 5.5SA (Re C) g=1.40	1.70	102	2.04	123	2.48	149
29	C1 10LP 6.5SA (Re C) g=1.40	1.68	101	2.09	126	2.65	159
30	C1 10LP 7.5SA (Re C) g=1.40	1.63	98	2.10	126	2.76	165

ภาคผนวก จ
ผลการทดลองกำลังอัดประลัย

ตารางที่ จ.1 ผลการทดลองกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

Mix No.	Mix Designation	fc'(ksc) at 7 days	diff %	fc'(ksc) at 28 days	diff %
1	C1 g=1.38	666.13	100	675.85	100
2	C1 g=1.40	657.23	100	669.80	100
3	C1 5.5SA (Add) g=1.38	690.04	104	778.20	115
4	C1 6.5SA (Add) g=1.38	692.32	104	783.25	116
5	C1 7.5SA (Add) g=1.38	697.99	105	794.80	118
6	C1 5.5SA (Re) g=1.40	645.55	98	672.59	100
7	C1 6.5SA (Re) g=1.40	627.31	95	672.37	100
8	C1 7.5SA (Re) g=1.40	617.50	94	678.98	101
9	C1 10LP g=1.30	622.83	100	692.09	100
10	C1 10LP g=1.40	599.19	100	687.42	100
11	C1 10LP 5.5SA (Add B) g=1.30	647.94	104	733.53	106
12	C1 10LP 6.5SA (Add B) g=1.30	663.43	107	777.95	112
13	C1 10LP 7.5SA (Add B) g=1.30	648.51	104	788.35	114
14	C1 10LP 5.5SA (Add C) g=1.30	629.05	101	768.33	111
15	C1 10LP 6.5SA (Add C) g=1.30	631.28	101	768.35	111
16	C1 10LP 7.5SA (Add C) g=1.30	648.05	104	780.48	113
17	C1 10LP 5.5SA (Re B) g=1.40	640.43	107	765.08	111
18	C1 10LP 6.5SA (Re B) g=1.40	621.76	104	699.32	102
19	C1 10LP 7.5SA (Re B) g=1.40	604.26	101	727.19	106
20	C1 10LP 5.5SA (Re C) g=1.40	666.43	111	734.59	107
21	C1 10LP 6.5SA (Re C) g=1.40	633.14	106	719.51	105
22	C1 10LP 7.5SA (Re C) g=1.40	656.52	110	790.55	115
23	C3 g=1.395	743.84	100	767.00	100
24	C3 g=1.40	713.21	100	794.16	100
25	C3 3.5SA (Add) g=1.395	752.44	101	816.72	106
26	C3 4.5SA (Add) g=1.395	763.85	103	817.73	107
27	C3 5.5SA (Add) g=1.395	770.64	104	840.30	110

ตารางที่ จ.1 ผลการทดลองกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (ต่อ)

Mix No.	Mix Designation	fc'(ksc) at 7 days	diff %	fc'(ksc) at 28 days	diff %
28	C3 3.5SA (Re) g=1.40	719.66	101	784.68	99
29	C3 4.5SA (Re) g=1.40	722.80	101	790.29	100
30	C3 5.5SA (Re) g=1.40	709.10	99	776.58	98

ภาคผนวก ฉ
ผลการทดลองกำลังดึง

ตารางที่ ฉ.1 ผลการทดลองกำลังดึงของคอนกรีต

Mix No.	Mix Designation	ft(ksc) at 7 day	diff %	ft(ksc) at 28 day	diff %
1	C1 g=1.38	71.57	100	94.35	100
2	C1 g=1.40	72.57	100	94.63	100
3	C1 5.5SA (Add) g=1.38	72.59	101	81.12	86
4	C1 6.5SA (Add) g=1.38	80.33	112	90.86	96
5	C1 7.5SA (Add) g=1.38	72.44	101	79.61	84
6	C1 5.5SA (Re) g=1.40	73.57	101	82.32	87
7	C1 6.5SA (Re) g=1.40	72.29	100	73.04	77
8	C1 7.5SA (Re) g=1.40	64.46	89	67.34	71
9	C1 10LP g=1.30	69.05	100	85.19	100
10	C1 10LP g=1.40	69.85	100	83.22	100
11	C1 10LP 5.5SA (Add B) g=1.30	70.34	102	73.93	87
12	C1 10LP 6.5SA (Add B) g=1.30	66.44	96	68.09	80
13	C1 10LP 7.5SA (Add B) g=1.30	72.51	105	74.13	87
14	C1 10LP 5.5SA (Add C) g=1.30	88.10	128	104.40	123
15	C1 10LP 6.5SA (Add C) g=1.30	82.12	119	85.12	100
16	C1 10LP 7.5SA (Add C) g=1.30	86.83	126	94.71	111
17	C1 10LP 5.5SA (Re B) g=1.40	66.43	95	80.56	97
18	C1 10LP 6.5SA (Re B) g=1.40	57.18	82	76.38	92
19	C1 10LP 7.5SA (Re B) g=1.40	50.77	73	59.96	72
20	C1 10LP 5.5SA (Re C) g=1.40	72.29	103	86.10	103
21	C1 10LP 6.5SA (Re C) g=1.40	72.96	104	88.02	106
22	C1 10LP 7.5SA (Re C) g=1.40	75.55	108	78.19	94
23	C3 g=1.395	76.59	100	92.81	100
24	C3 g=1.40	78.75	100	86.33	100
25	C3 3.5SA (Add) g=1.395	94.78	124	102.57	111
26	C3 4.5SA (Add) g=1.395	90.58	118	102.54	110
27	C3 5.5SA (Add) g=1.395	91.52	120	111.11	120

ตารางที่ ฉ.1 ผลการทดลองกำลังดึงของคอนกรีต (ต่อ)

Mix No.	Mix Designation	ft(ksc) at 7 day	diff %	ft(ksc) at 28 day	diff %
28	C3 3.5SA (Re) g=1.40	97.06	123	103.76	120
29	C3 4.5SA (Re) g=1.40	102.26	130	102.89	119
30	C3 5.5SA (Re) g=1.40	94.08	119	109.30	127

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ภาคผนวก ช
ผลการทดลองการหดตัวแบบออโตจีเนียส

ตารางที่ ช.1 ผลการทดลองการหดตัวแบบออโตจีเนียสของคอนกรีต

Mix No.	Mix Designation	Autogenous Shrinkage (Micrometer)									
		0 day	1 day	3 days	5 days	7 days	14 days	21 days	28 days	42 days	56 days
1	C1 g=1.38	0	36	73	70	145	193	305	361	565	619
2	C1 g=1.40	0	17	66	72	142	187	312	342	559	622
3	C1 5.5SA (Add) g=1.38	0	40	139	176	194	247	456	496	593	611
4	C1 6.5SA (Add) g=1.38	0	32	89	102	125	259	364	476	580	616
5	C1 7.5SA (Add) g=1.38	0	33	129	164	181	232	429	487	552	592
6	C1 5.5SA (Re) g=1.40	0	29	57	70	119	335	387	433	486	559
7	C1 6.5SA (Re) g=1.40	0	67	96	109	126	202	380	436	484	542
8	C1 7.5SA (Re) g=1.40	0	66	96	101	117	180	364	431	481	535

ภาคผนวก ซ

ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่

อินทรี
ปูนซีเมนต์ต้นครหลวง
การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 21
วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ
The 21st National Convention on Civil Engineering
"วิศวกรรมโยธาสู่พรมแดนใหม่และความท้าทายในอนาคต"
"Civil Engineering for Future Challenges and New Frontiers"
www.ncce21.org
28-30 มิถุนายน 2559
โรงแรม บีพี สมิหลา บีช สงขลา
28 - 30 June 2016
BP Samila Beach Hotel, Songkhla

สารนายกวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ได้มีการจัดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นประจำทุกๆปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2537 เป็นต้นมา และได้ดำเนินการโดยคณะกรรมการสาขาวิศวกรรมโยธา วสท. ร่วมกับ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาของมหาวิทยาลัยทั่วประเทศ ในครั้งนี้ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดสงขลาได้เป็นเจ้าภาพร่วมกับ วสท. ในการจัดการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21 ซึ่งจัดขึ้นระหว่างวันที่ 28-30 มิถุนายน พ.ศ. 2559 ณ โรงแรม บีพี สมิหลา บีช สงขลา จังหวัดสงขลา การจัดประชุมทางวิชาการ ถือได้ว่าเป็นสาระสำคัญที่สุดในวงการวิชาชีพ เนื่องจากเป็นโอกาสที่คนในวงการวิศวกรรมโยธาได้มานำเสนอแลกเปลี่ยนความรู้ ประสบการณ์ รวมทั้งสร้างสรรค์ความสัมพันธ์อันดี และพัฒนาวิชาชีพให้เจริญก้าวหน้าต่อไป

การจัดการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21 นี้ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดสงขลา ได้ให้เกียรติเป็นเจ้าภาพ ซึ่งถือว่าเป็นภารกิจที่ยิ่งใหญ่ เนื่องจากจำนวนผู้เข้าร่วมประชุมในปัจจุบันเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้การบริหารจัดการมีความยุ่งยากสลับซับซ้อนมากขึ้น ในนามของนายกวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยและบุคลากรที่เกี่ยวข้องในการจัดงาน รวมทั้งสถาบันการศึกษา ตลอดจนองค์กร ห้างร้าน บริษัทต่างๆ ที่ให้การสนับสนุนการจัดการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21 จนได้รับผลสำเร็จที่ดียิ่ง และหวังว่าทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องจะให้ความร่วมมือ ในการจัดการประชุมครั้งต่อไปเช่นเดียวกัน อันจะนำมาซึ่งความสำเร็จและประโยชน์ร่วมกันของวงการวิศวกรรมโยธา

(ศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)
นายกวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
ประจำปี พ.ศ. 2557-2559

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21

1.	ศ.ดร.เฉลิมชนม์ สถิระพจน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2.	ศ.ดร.ทักษิณ เทพชาตรี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3.	ศ.ดร.ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฒิไชย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4.	ศ.ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5.	รศ.ดร.เกษม ชูจารุกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6.	รศ.ดร.จรูญ รุ่งอมรรัตน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7.	รศ.ดร.จิตติชัย รุจนกนกนาฏ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
8.	รศ.ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
9.	รศ.ดร.บรรเจิด พละการ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
10.	รศ.ดร.ศักดิ์สิทธิ์ เฉลิมพงศ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
11.	รศ.ดร.สรวิศ นฤปิติ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
12.	รศ.ดร.อัครวัชร เล่นวารี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
13.	ผศ.ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
14.	ผศ.ดร.ธเนศ ศรีศิริโรจนากร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
15.	ผศ.ดร.นพดล จอกแก้ว	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
16.	อ.ดร.พิชชา จองวิวัฒสกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
17.	อ.ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
18.	รศ.ดร.ก่อโชค จันทวรางกูร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
19.	ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
20.	ผศ.ดร.ปิยนุช เวทย์วิวรณ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
21.	ผศ.ดร.สุนีรัตน์ กุศลาศัย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
22.	อ.ดร.สุริยน เปรมปราโมทย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
23.	อ.ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
24.	ผศ.ดร.นันทวัฒน์ ขมหวาน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
25.	อ.ดร.ปนัดดา กสิกิจวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
26.	ผศ.ต่อศักดิ์ ประเสริฐสังข์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ
27.	อ.ทศพล จตุระบุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ
28.	รศ.ดร.ชวเลข วณิชเวทิน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
29.	รศ.ดร.วัชรินทร์ วิทยกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
30.	รศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
31.	รศ.ดร.สุธาริน สถาปิตานนท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
32.	ผศ.ดร.กิจพัฒน์ ภู่วรวรรณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
33.	ผศ.ดร.วีระเกษตร สวนผกา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
34.	ผศ.ดร.อดิชัย พรพรหมินทร์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
35.	ผศ.ดร.เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
36.	อ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

37.	อ.ดร.สุภาพร แก้วกอ เลี่ยวไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
38.	ผศ.ดร.วัจน์วงค์ กรีพละ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สกลนคร
39.	รศ.ดร.พงศกร พรรณรัตนศิลป์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
40.	รศ.ดร.วันชัย สะตะ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
41.	ผศ.ดร.กิตติเวช ขันติยวิชัย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
42.	ผศ.ดร.ดลฤดี หอมดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
43.	ผศ.ดร.ธเนศ เสถียรนาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
44.	ผศ.ดร.ลัดดา ตันวาณิชกุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
45.	ผศ.ดร.วิชุดา เสถียรนาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
46.	รศ.ดร.ธนพร สุปริยศิลป์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
47.	ผศ.ดร.ธวัชชัย ตันชัยสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
48.	อ.ดร.เกรียงไกร อรุโณทยานันท์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
49.	อ.ดร.ปรีดา พิชยาพันธ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
50.	อ.ดร.อรรถวิทย์ อุปโยคิน	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
51.	ผศ.ดร.อุมา สีบุญเรือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
52.	รศ.ดร.ทวิช พูลเงิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
53.	รศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
54.	รศ.ดร.วรัช ก้องกิจกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
55.	รศ.ดร.วิโรจน์ ศรีสุรภานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
56.	ผศ.ดร.ชูชัย สุจิวรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
57.	ผศ.ดร.ธิดารัตน์ บุญศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
58.	ผศ.ดร.พิชญ์ สุธีรวรรธนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
59.	ผศ.ดร.วีรชาติ ตั้งจิรภัทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
60.	ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
61.	อ.ดร.ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
62.	อ.ดร.ทรงเกียรติ ภัทรปัทมาวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
63.	อ.ดร.นงลักษณ์ บุญรัตนกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
64.	ศ.ดร.ปิติ สุคนธสุขกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
65.	รศ.ดร.กมลวัลย์ ลือประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
66.	รศ.ดร.กิตติชัย ธนทรัพย์สิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
67.	รศ.ดร.เทอดศักดิ์ รองวิริยะพานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
68.	รศ.ดร.พานิช วุฒิพฤกษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
69.	รศ.ดร.สุพรชัย อุทัยนฤมล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
70.	ผศ.ดร.กวิน ตันติเสวี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
71.	ผศ.ดร.ชัยรัตน์ ธีระวัฒนสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
72.	ผศ.ดร.ชัยศาสตร์ สกุลศักดิ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
73.	ผศ.ดร.มาโนช สรรพกิจทิพากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
74.	ผศ.ดร.ศักดา กตเวทวารักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
75.	ผศ.ดร.สุชัญญา โปษยะนันทน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
76.	อ.สุรัตน์ ศรีจันทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

77.	รศ.ดร.สายสุนีย์ พุทธาคุณเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
78.	ผศ.ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
79.	อ.ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
80.	อ.ดร.สนธยา ทองอรุณศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
81.	รศ.จรูญ เจริญเนตรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
82.	รศ.มนัส อนุศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
83.	ผศ.จำรูญ สมบูรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
84.	ผศ.จุฑามาศ ลักษณะกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
85.	ผศ.ดร.นันทชัย ชูศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
86.	ผศ.ดร.ภาณุ พร้อมพุทธางกูร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
87.	ผศ.พรนรายณ์ บุญราศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
88.	อ.ดร.ชลัท ทิพากรเกียรติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
89.	ผศ.ดร.เกียรติสุดา สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
90.	อ.ดร.รัฐพล สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
91.	รศ.ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
92.	ผศ.ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
93.	ผศ.ดร.ปรียาพร โกษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
94.	ผศ.ดร.พรพจน์ ค้นเส็ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
95.	ผศ.ดร.รัฐพล ภู่บุบผาพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
96.	รศ.ดร.ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
97.	รศ.ดร.บุรฉัตร ฉัตรวีระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
98.	รศ.ดร.สายันต์ ศิริมนตรี	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
99.	ผศ.ดร.สสิกรณณ์ เหลืองวิชชเจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
100.	อ.ดร.กำพล ทรัพย์สมบูรณ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
101.	อ.ดร.รัฐภูมิ ปริชาตปรีชา	มหาวิทยาลัยนเรศวร
102.	อ.ดร.ศิริชัย ตันรัตนวงศ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
103.	อ.ภัคพงศ์ หอมเนียม	มหาวิทยาลัยนเรศวร
104.	ผศ.ดร.ทวีชัย สำราญวานิช	มหาวิทยาลัยบูรพา
105.	ผศ.ดร.ธรรมนูญ รัศมีมาสเมือง	มหาวิทยาลัยบูรพา
106.	ผศ.ดร.สมบูรณ์ เชี่ยงฉิน	มหาวิทยาลัยพะเยา
107.	ผศ.ดร.สยาม ยิ้มศิริ	มหาวิทยาลัยบูรพา
108.	อ.ดร.ฐิติมา วงศ์อินตา	มหาวิทยาลัยบูรพา
109.	อ.ดร.ปิติ โรจน์วรรณสินธุ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
110.	อ.ดร.พัทรพงษ์ อาสนจินดา	มหาวิทยาลัยบูรพา
111.	อ.ดร.เพชร์รัตน์ ลิ้มสุปรียารัตน์	มหาวิทยาลัยบูรพา
112.	อ.ดร.วรรณวรางค์ รัตนานิคม	มหาวิทยาลัยบูรพา
113.	ผศ.ดร.สมชาย ปฐมศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล
114.	อ.ดร.ชลลดา เลาะฟอ	มหาวิทยาลัยมหิดล
115.	อ.ดร.วศพร เตชะพีรพานิช	มหาวิทยาลัยมหิดล
116.	ผศ.ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

117.	อ.ดร.ปรเมศวร์ เหลือเทพ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
118.	ผศ.ดร.รัฐวุฒิ รู้แทนคุณ	มหาวิทยาลัยสยาม
119.	อ.ดร.ฐกลพัศ เจนจิวัฒนกุล	มหาวิทยาลัยสยาม
120.	รศ.ดร. สถาพร โกคา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
121.	ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
122.	ผศ.ดร.สิทธา เจนศิริศักดิ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
123.	ผศ.ดร.วรางคณา แสงสร้อย	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
124.	รศ.ดร.จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
125.	รศ.แหลมทอง เหล่าคงถาวร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
126.	ผศ.ดร.ธนาดล คงสมบูรณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
127.	รศ.ดร.โชติชัย เจริญงาม	สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT)

หมายเหตุ รายชื่อเรียงตามสถาบันการศึกษา (ก-ฮ)

ห้องสงขลา 2 วันพุธที่ 29 มิถุนายน 2559

ประธานการนำเสนอบทความ

เวลา 15.15 – 17.15 น.

รหัสบทความ	บทความ
273	**ปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยแม่เมาะ** เจริญชัย ฤทธิรุทธ, ชัยสิทธิ์ ทรัพย์สิน, พัชรพล โพธิ์ศรี, ปริญญา จินดาประเสริฐ
275	**ศึกษาการผลิตอิฐจากจีโอโพลิเมอร์ผสมดินลูกรังในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น** เจริญชัย ฤทธิรุทธ, กาญจนา ประทุมหวล, พัชรพล โพธิ์ศรี, ปริญญา จินดาประเสริฐ
365	**การพัฒนาคอนกรีตพิเศษสำหรับป้องกันกัมมันตรังสีด้วยแบไรต์และการประเมินคุณสมบัติในการป้องกันรังสี** ปราณปริยา พุทธเนตร, พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง, ภาณุวัฒน์ จ้อยกสัด
440	**กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านการเผา** ธีรพล เสาวพันธ์, เกียรติสุดา สมนา
446	**อิทธิพลของฝุ่นแก้วที่มีผลต่อความทนทานต่อซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ** ธนเดช ศรีประสงค์, บุรฉัตร ฉัตรวีระ
506	**กำลังอัด และปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาของมอร์ต้าร์ที่มีเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน** วชิรกรณ์ เสนาวัง, สุวัฒน์ รามจันทร์, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล
514	**คุณสมบัติด้านวัสดุประสานของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม** อธิกานต์ ธิวงค์คำ, ปิติศานต์ กรำมาตร, ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์, สมนึก ตั้งเติมสิริกุล
516	**การหดตัวแบบแห้ง การเกิดคาร์บอเนชั่น และการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม** ธนกฤต มณีรัตน์, ปิติศานต์ กรำมาตร, ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์, สมนึก ตั้งเติมสิริกุล

ABSTRACT

วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง

(Construction Material Engineering, MAT)

คุณสมบัติด้านวัสดุประสานของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม

Cementitious Properties of Concrete with Chemical Compound

อธิกานต์ ธิวงศ์คำ[1] ปิติศานต์ กร้ำมาตร[2*] ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์[3] และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล[4]

[1] นักศึกษาปริญญาโท [2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[3] นักวิจัย ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
[4] ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาคุณสมบัติด้านวัสดุประสานของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม โดยใส่เพิ่มผงเคมีผสมเพิ่ม (Addition) และโดยการแทนที่ผงเคมีผสมเพิ่ม (Replacement) ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่า ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่มมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่การก่อตัวของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่มมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการผสมปริมาณของผงเคมีผสมเพิ่มที่ต่างกัน ให้ทั้งค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว และการก่อตัวของคอนกรีตที่ไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้พบว่า กำลังอัดประลัยและกำลังดึงของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่มมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยคอนกรีตที่ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม ทั้ง Addition และ Replacement รวมทั้งการผสมปริมาณของผงเคมีผสมเพิ่มที่ต่างกัน ให้ค่ากำลังอัดประลัยและกำลังดึงที่ไม่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: ผงเคมีผสมเพิ่ม, การสูญเสียค่าการยุบตัว, การก่อตัว, กำลังอัดประลัย, กำลังดึง

Abstract

This research was aimed to study the basic properties of concrete containing chemical compound. The chemical compound was used to add and partial replacement of 5.5, 6.5 and 7.5% by weight in Portland cement type 1. The study found that the slump and slump loss of concrete containing chemical compound was lower than those of Portland cement type 1 concrete whereas setting time of concrete containing chemical compound was higher. However, whether the more or less using chemical compound quantity, the result of slump, slump loss and setting time of concrete would be the same. Furthermore, compressive and tensile strength of concrete containing chemical compound was higher than those of Portland cement type 1 concrete. The different of quantity in using additional or replacement, the result occurred the same.

Keywords: chemical compound, slump loss, setting time, compressive strength, tensile strength

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุสำคัญชนิดหนึ่งที่นำมาใช้ในงานก่อสร้าง การนำคอนกรีตไปใช้งานต้องเข้าใจคุณสมบัติของคอนกรีตที่เลือกมาใช้งาน จากข้อมูลและผลการทดสอบทางวิศวกรรม พบว่าคุณสมบัติของคอนกรีตจะถูกพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ เช่น การยุบตัว การก่อตัว กำลัง และปัจจัยอื่นๆ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณและจำนวนสัดส่วนผสมที่ใช้ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมที่ใช้กับคุณสมบัติคอนกรีต จึงเป็นสิ่งจำเป็นและควรนำมาศึกษาค้นคว้าวิจัย เพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีนำไปใช้โดยมีประสิทธิภาพแข็งแรง ตลอดอายุการใช้งาน ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงซ่อมแซมในอนาคตได้ [1]

ปัจจุบันการค้นคว้าวิจัยทางด้านวัสดุคอนกรีต นักวิจัยและวิศวกรมีความรู้ความเข้าใจมากขึ้น และได้มีงานวิจัยที่ระบุแนวทางการเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการพัฒนาคอนกรีต ทำให้มีผู้คิดค้นสังเคราะห์ผงเคมีเพื่อช่วยปรับปรุงปฏิกิริยาในส่วนผสมปูนซีเมนต์ โดยส่วนผสมที่สังเคราะห์จะช่วยในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ในปูนซีเมนต์ มีนักวิจัยได้ทดลองแทนที่ผงเคมีผสมเพิ่มพิเศษในคอนกรีต และพบว่าทำให้ปฏิกิริยาในช่วงอายุเริ่มแรกสามารถพัฒนากำลังไปได้ดี [2] ทำให้มีการประเมินกันว่า การแทนที่ผงเคมีผสมเพิ่มชนิดพิเศษจะช่วยทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไปทั้งในด้านของคุณสมบัติเบื้องต้นและด้านความคงทน

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติด้านวัสดุประสานของผงเคมีผสมเพิ่ม รวมทั้งเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงเคมีผสมเพิ่มอย่างมีประสิทธิภาพ โดยได้ศึกษาถึงค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว

* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)
E-mail address: pitisan.k@en.rmutt.ac.th

การก่อตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม เพื่อนำผลงานวิจัยอันเป็นประโยชน์นี้ไปใช้พัฒนาเทคโนโลยีด้านวัสดุคอนกรีตต่อไป

2. รายละเอียดวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุประสานที่ใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานมอก.15-2547 และผงเคมีผสมเพิ่ม ตามมาตรฐาน ASTM C465, TIS 15, และ TIS 15 Volume 20 โดยตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงเคมีผสมเพิ่ม ส่วนรูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,500 เท่า) ของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงเคมีผสมเพิ่ม ซึ่งรูปร่างของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงเคมีผสมเพิ่ม มีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอนแตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่ว

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ศึกษา

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ผงเคมีผสมเพิ่ม
SiO_2	18.93	1.94
Al_2O_3	5.51	1.39
Fe_2O_3	3.31	0.61
CaO	65.53	42.97
MgO	1.24	0.10
Na_2O	<0.01	-
K_2O	0.31	-
SO_3	2.88	49.50
LOI	2.24	2.68
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.95
ความละเอียดโดยวิธีเบลน;ซม.^{2}/ก.	3,300	2,800

ก) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ข) ผงเคมีผสมเพิ่ม

รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,500 เท่า) ของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงเคมีผสมเพิ่มที่ใช้

2.2 ค่าการยุบตัว และการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต

วิธีการทดสอบการยุบตัว และการสูญเสียค่าการยุบตัวของตัวอย่างคอนกรีตกระทำตามมาตรฐาน ASTM C143 โดยวัดค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อเวลาผ่านไป ที่เวลา 0 15 30 45 และ 60 นาที

2.3 การก่อตัวของคอนกรีต

วิธีการทดสอบการก่อตัวของตัวอย่างคอนกรีต โดยใช้คอนกรีตส่วนที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 เทลงแบบหล่อ (ขนาด 150x150x150 มม.) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C403

2.4 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

วิธีการทดสอบกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีต (ขนาด 100x100x100 มม.) หลังจากถอดแบบที่อายุตัวอย่างคอนกรีต 1 วัน แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มในน้ำ ทดสอบกำลังอัดประลัยที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน กระทำตามมาตรฐาน BS 1881 : PART 4

2.5 กำลังดึงของคอนกรีต

วิธีการทดสอบกำลังดึงโดยวิธีดัด (Flexural Test) ของตัวอย่างคอนกรีต (ขนาด 100x100x300 มม.) หลังจากถอดแบบที่อายุตัวอย่างคอนกรีต 1 วัน แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มในน้ำ ทดสอบกำลังดึงที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน กระทำตามมาตรฐาน ASTM C78

2.6 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งใช้ในการศึกษา ค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว การก่อตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึง แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ใช้ในการทดสอบค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว การก่อตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึง โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.30 โดยน้ำหนัก

สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)					
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ผงเคมีผสมเพิ่ม	ทราย	หิน	น้ำ	สารลดน้ำ
C ร=1.38	520	-	727	1047	151	5.2
C ร=1.40	520	-	727	1047	151	5.2
C5.5Ad ร=1.38	520	28.6	727	1047	151	5.2
C6.5Ad ร=1.38	520	33.8	727	1047	151	5.2
C7.5Ad ร=1.38	520	39.0	727	1047	151	5.2
C5.5Re ร=1.40	491	28.6	727	1047	151	5.2
C6.5Re ร=1.40	486	33.8	727	1047	151	5.2
C7.5Re ร=1.40	481	39.0	727	1047	151	5.2

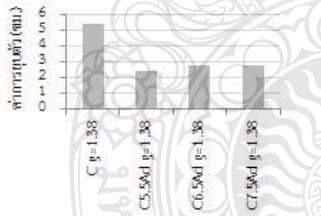
หมายเหตุ ร หมายถึงอัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต, C ร=1.40 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.40 และ C6.5Re ร=1.40 หมายถึงคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยการแทนที่ผงเคมีผสมเพิ่ม (Replacement) ร้อยละ 6.5 และใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีตเท่ากับ 1.40

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

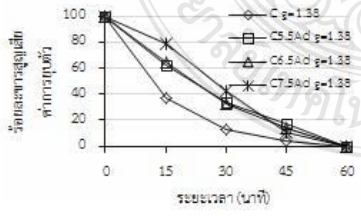
3.1 ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต

รูปที่ 2 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้าน และคอนกรีตผสมผงเหมีผสมเพิ่ม Addition ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีตเท่ากับ 1.38 พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใส่ผงเหมีผสมเพิ่ม มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้าน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงเหมีผสมเพิ่ม ช่วยให้เกิดการประสานของเพสต์ ทำให้โครงสร้างเพสต์มีความแน่นมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการยุบตัวมีค่าน้อยลง ส่วนเมื่อใส่ผงเหมีผสมเพิ่มในปริมาณที่ต่างกัน จะให้ค่าการยุบตัวที่ไม่แตกต่างกัน

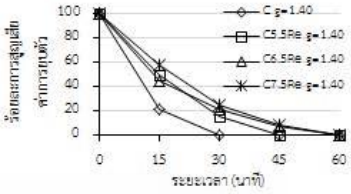
รูปที่ 3 แสดงการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้าน และคอนกรีตผสมผงเหมีผสมเพิ่ม ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.38 ส่วนแบบ Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.40 พบว่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตทั้ง Addition และ Replacement มีค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้าน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงเหมีผสมเพิ่มมีปริมาณของ SO_3 ค่อนข้างสูง ทำให้ SO_3 ทำปฏิกิริยากับสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ เช่น C_3S C_3A ทำให้เกิดเป็นแผ่นเจลหุ้มสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ ทำให้สัมผัสกับน้ำยากขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นช้าลง ส่งผลให้การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตระหว่าง Addition และ Replacement รวมทั้งการสูญเสียค่าการยุบตัวระหว่างคอนกรีตที่ผสมปริมาณของผงเหมีผสมเพิ่มที่ต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 2 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้าน และคอนกรีตผสมผงเหมีผสมเพิ่ม



ก) Addition

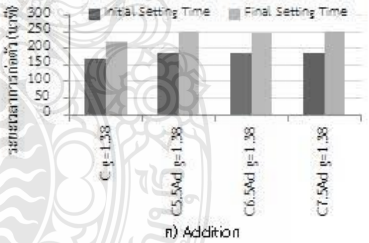


ข) แบบ Replacement

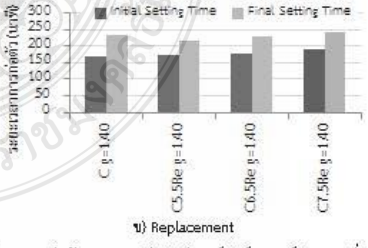
รูปที่ 3 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้าน และคอนกรีตผสมผงเหมีผสมเพิ่ม

3.2 การก่อตัวของคอนกรีต

รูปที่ 4 แสดงการก่อตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้าน และคอนกรีตผสมผงเหมีผสมเพิ่ม ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.38 และ Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.40 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ทั้ง Addition และ Replacement มีระยะเวลาการก่อตัวนานกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้าน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงเหมีผสมเพิ่มมีปริมาณของ SO_3 ค่อนข้างสูง ทำให้ผงเหมีผสมเพิ่มเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ เช่น C_3S C_3A ทำให้เกิดเป็นแผ่นเจลหุ้มสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นช้าลง ส่งผลให้การก่อตัวเกิดขึ้นช้าลง โดยการก่อตัวของคอนกรีต Addition และ Replacement มีค่าไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับปริมาณที่ต่างกันของผงเหมีผสมเพิ่มที่ผสมในคอนกรีตให้ผลการก่อตัวของคอนกรีตที่ไม่แตกต่างกัน



ก) Addition

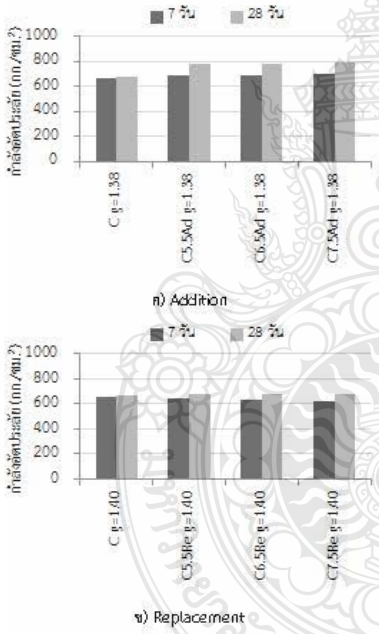


ข) Replacement

รูปที่ 4 การก่อตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้าน และคอนกรีตผสมผงเหมีผสมเพิ่ม

3.3 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

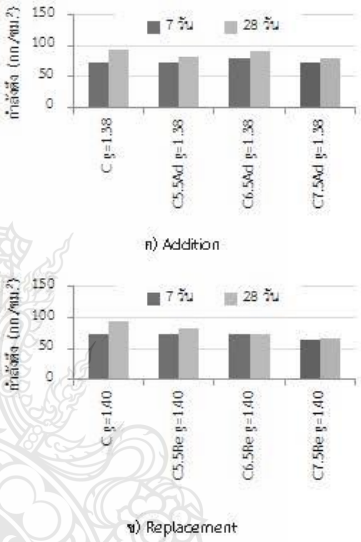
รูปที่ 5 แสดงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.38 และคอนกรีต Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.40 พบว่ากำลังอัดประลัยทั้งที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ของคอนกรีต Addition มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนคอนกรีต Replacement กำลังอัดประลัยที่อายุ 7 วัน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่อายุ 28 วัน มีกำลังอัดประลัยที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงเคมีผสมเพิ่มช่วยให้เกิดการประสานของเพสต์ ทำให้โครงสร้างเพสต์มีความแน่นมากขึ้น จึงส่งผลให้กำลังอัดประลัยสูงขึ้น ส่วนคอนกรีตแบบ Replacement เป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลง จึงส่งผลให้กำลังอัดประลัยต่ำลง นอกจากนี้พบว่าคอนกรีตทั้ง Addition และ Replacement เมื่อใส่ผงเคมีผสมเพิ่มในปริมาณที่ต่างกัน ให้กำลังอัดประลัยที่ไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 5 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

3.4 กำลังดึงของคอนกรีต

รูปที่ 6 แสดงกำลังดึงของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม ทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีต Addition ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.38 และ Replacement ใช้อัตราส่วนของเพสต์ต่อช่องว่างในคอนกรีต เท่ากับ 1.40 พบว่ากำลังดึงของคอนกรีต Addition มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และ Replacement มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว (กรณีกำลังอัดประลัย) สังเกตว่าค่ากำลังดึงของคอนกรีตเป็นสัดส่วนตรงกับกำลังอัดประลัย ซึ่งเป็นลักษณะโดยทั่วไปของคอนกรีต



รูปที่ 6 กำลังดึงของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

4. สรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติด้านวัสดุประสานของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่มมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่การก่อตัวของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่มมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการผสมปริมาณของผงเคมีผสมเพิ่มที่ต่างกัน ให้ทั้งค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว และการก่อตัวของคอนกรีตที่ไม่แตกต่างกัน

2) กำลังอัดประลัยและกำลังดึงของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่มมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยคอนกรีตที่ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม ทั้งแบบ Addition และ Replacement รวมทั้งการผสม

ปริมาณของผงเคมีผสมเพิ่มที่ต่างกัน ให้ค่ากำลังอัดประลัยและกำลังดึงที่ไม่แตกต่างกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

[1] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, ความคงทนของคอนกรีต, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, พ.ศ. 2543.

[2] Pamthep Julnipitawong and Somnuk Tangtermsirikul, Investigation on Performance of Concrete and Mortar Using Active Chemical Compound Rockfil-HSM, Final Report Submission to BKG Group Corporation, 2013.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ–สกุล	นายอธิกานต์ ธิวงศ์คำ
วัน เดือน ปีเกิด	13 มกราคม 2532
ที่อยู่	98/1 ถนนมหาดไทยบำรุง ตำบลระแหง อำเภอเมืองตาก จังหวัดตาก 63000
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	พนักงานบริษัทเอกชน ตำแหน่ง วิศวกรโครงสร้าง บริษัท เอทีที คอนซัลแตนท์ จำกัด ตั้งแต่ พ.ศ. 2554 ถึง พ.ศ. 2558 พนักงานบริษัทเอกชน ตำแหน่ง ผู้จัดการโครงการ บริษัท เบญจมณี จำกัด พ.ศ. 2558 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	08-1675-8147
อีเมล์	athikarn_t@hotmail.com