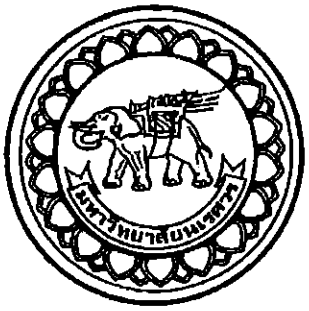


การศึกษาผลของการบ่มต่อกำลังอัดและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

Effect of curing conditions on compressive strength and drying shrinkage of concrete

นายกิตติพงษ์ เอมหยวก รหัส 51380026

นายอภิชาติ สุดสาคร รหัส 51380330

นายสุรินทร์ ต๋ำคำ รหัส 51382969

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 10 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน 15973236
เลขเรียกหนังสือ ฝร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ส 674 ร 2554

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2554

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การศึกษาผลของการบ่มต่อกำลังอัดและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต		
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายกิตติพงษ์	เอมหยวก	รหัส 51380026
	นายอภิชาติ	สุดสาคร	รหัส 51380330
	นายสุรินทร์	ต๋ำคำ	รหัส 51382969
ที่ปรึกษาโครงงาน	ผศ.ดร.สรัณกร	เหมะวิบูลย์	
	ดร.สนธยา	ทองอรุณศรี	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา		
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา		
ปีการศึกษา	2554		

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....ที่ปรึกษาโครงงาน

(ผศ.ดร.สรัณกร เหมะวิบูลย์)

.....ที่ปรึกษาร่วมโครงงาน

(ดร.สนธยา ทองอรุณศรี)

.....กรรมการ

(ผศ.ดร.สสิกรณ์ เหลืองวิชชเจริญ)

.....กรรมการ

(อาจารย์ภัคพงศ์ หอมเนียม)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การศึกษาผลของการบ่มต่อกำลังอัดและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต		
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายกิตติพงษ์	เอมหยวก	รหัส 51380026
	นายอภิชาติ	สุดสาคร	รหัส 51380330
	นายสุรินทร์	ต๋ำคำ	รหัส 51382969
ที่ปรึกษาโครงงาน	ผศ.ดร.สรัณกร	เหมะวิบูลย์	
	ดร.สนธยา	ทองอรุณศรี	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา		
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา		
ปีการศึกษา	2554		

บทคัดย่อ

การบ่มมีความสำคัญกับงานคอนกรีตเป็นอย่างมาก กำลังและความทนทานของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเต็มที่เมื่อได้รับการบ่มอย่างเพียงพอ ซึ่งปัญหาที่พบโดยทั่วไปคือ คอนกรีตที่ไม่ได้รับการบ่มอย่างเหมาะสมจะมีกำลังอัดที่ต่ำกว่า และมีการหดตัวที่สูงกว่าเมื่อเปรียบกับคอนกรีตที่ได้รับการบ่มอย่างเพียงพอ ดังนั้นโครงงานนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการบ่มที่มีต่อกำลังอัดและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต โดยใช้มาตรฐาน ASTM C39 และ C157 สำหรับทดสอบกำลังอัด และการหดตัวของคอนกรีต ตามลำดับ ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น (1.2 และ 1.4) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (0.35 , 0.55 และ 0.80) การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะ (30 % และ 50%) การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (10% และ 20%) และการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา (30%) การบ่มคอนกรีตที่ใช้มี 4 วิธี ประกอบด้วย การบ่มด้วยน้ำ การบ่มด้วยกระสอบ การบ่มด้วยพลาสติก และการบ่มด้วยน้ำยาเคมี สำหรับการทดสอบการหดตัวแบบแห้งแท่งตัวอย่างคอนกรีตจะถูกบ่มเป็นระยะเวลา 7 วัน และ 14 วัน และจะวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งทดสอบซึ่งมีขนาด 75x75x285 มิลลิเมตร เมื่อแท่งทดสอบมีอายุ 1, 3, 5, 7, 8, 10, 12, 14, 21, 28, 35 และ 49 วันตามลำดับ ส่วนแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดถูกบ่มเป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ หลังจากนั้นแท่งตัวอย่างถูกทดสอบเมื่อครบระยะเวลา 28 วัน สำหรับการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำยาเคมีจะทดสอบกำลังอัดที่อายุคอนกรีต 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

ผลการทดสอบ พบว่าการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำมีแนวโน้มดีกว่าการบ่มด้วยกระสอบ และมีประสิทธิภาพกว่าการบ่มคอนกรีตด้วยพลาสติก และการใช้น้ำยาเคมีในการบ่มคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย กำลังอัดที่อายุ 28 วัน กำลังอัดจะลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และสามารถช่วยลดค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตได้ โดยมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง และการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา 30% กำลังอัดของคอนกรีตจะต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมทรายธรรมชาติ นอกจากนี้ยังพบว่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาสูงกว่าคอนกรีตที่มีมวลรวมละเอียดตามปกติ

คำสำคัญ : การหดตัวแบบแห้ง, การบ่มคอนกรีต, เถ้าลอย, ผงหินปูน, เถ้าก้นเตา

มหาวิทยาลัยนเรศวร

Project title	Effect of curing conditions on compressive strength and drying shrinkage of concrete	
Name	Mr. Kittiphong Emyuak	ID. 51380026
	Mr. Aphichart Sudsakorn	ID. 51380330
	Mr. Surin Takum	ID. 51382969
Project advisor	Asst.Prof.Dr.Saranagon Hemavibool	
	Dr. Sontaya Tongaroonsri	
Major	Civil Engineering	
Department	Civil Engineering	
Academic year	2012	

Abstract

Curing is very important for concrete work. Strength and durability of concrete will be increase when it has cured sufficiently. Common problems are concrete that is not cured properly resulting in lower compressive strength and higher shrinkage when compared to the properly curing concrete. Therefore the objective of this project is to study the effect of curing condition on compressive strength and drying shrinkage of concrete. The ASTM C39 and C157 are used to evaluate the compressive strength and shrinkage of concrete. Parameters include paste volume fractions of concrete (1.2 and 1.4), water to binder ratio (0.35 , 0.55 and 0.80), weight percentages of replacement of cement by Mae Moh fly ash (30 and 50%) , weight percentages of replacement of cement by limestone powder (10 and 20%)and replacement of fine aggregate by bottom ash (30%). There are four methods for curing concrete: water curing, wrapping with sacks, covering with plastic sheet and chemical curing compound. The specimens for the drying shrinkage test were cured for 7 and 14 days and the length change of 75x75x285 mm (length) samples were measured at 1, 3, 5, 7, 8, 10, 12, 14, 21, 28, 35 and 49 days. The cylindrical concrete specimens were cast for testing the compressive strength at 7, 14 and 28 days of curing

respectively and they were tested at 28 days. For concrete samples cured with chemical curing agent, the compressive strength tests were conducted at 7, 14 and 28 days respectively.

Test result showed that curing concrete with water is likely better than curing concrete with sack and more efficient than curing concrete with plastic and chemical solution. High replacement of cement by fly ash in concrete caused a reduction in 28-days compressive strength. The use of fly ash in Portland cement concrete can reduce shrinkage and the amount of reduction was increased as the fly ash content increased. The use of limestone powder in concrete seems to increases the compressive strength and decreases the drying shrinkage. The 28-days compressive strength for the 30 percent replacement of fine aggregates with bottom ash was found lower than that of the natural sand mixture. Moreover, it also showed that the drying shrinkage of the concrete with bottom ash is higher than the concrete with normal fine aggregate.

Keyword : Drying shrinkage, Curing concrete, Fly ash, Limestone powder ,Bottom ash

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น ทางคณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานวิศวกรรม ผศ.ดร.สรัณกร เหมะวิบูลย์ ที่ปรึกษาโครงงานที่ท่านได้กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการดำเนินการโครงงาน ตลอดจนจัดหาเครื่องมือปฏิบัติงานต่างๆ และสารเคมีที่ใช้ในการทำโครงงานให้คณะผู้จัดทำโครงงาน พร้อมทั้งเสียสละเวลาของท่านมาควบคุมดูแลให้คำแนะนำ สั่งสอน การปฏิบัติงานโครงงานของคณะผู้จัดทำอย่างดีเยี่ยม

ขอขอบพระคุณ ดร.สนธยา ทองอรุณศรี อาจารย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก ที่ท่านได้กรุณาชี้แนะแนวทางการปฏิบัติงานโครงงาน

ขอขอบพระคุณครูช่างทุกท่าน ที่ให้ยืมอุปกรณ์ เครื่องมือทดสอบต่างๆตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือดำเนินงานโครงงาน อำนวยความสะดวก และเอื้อเฟื้อการใช้สถานที่ในการปฏิบัติงานโครงงาน

ขอขอบคุณห้องสมุดมหาวิทยาลัยนเรศวร และห้องสมุดสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ยืมหนังสือที่ใช้ในการค้นคว้า ซึ่งทำให้โครงงานเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ๆปริญญาโทวิศวกรรมโยธาทุกคนที่ให้คำปรึกษาในการปฏิบัติงานบางอย่างและช่วยปฏิบัติงานโครงงาน จนกระทั่งโครงงานนี้สำเร็จ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ช่วยทางด้านการเงิน ในการทำโครงงานนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณะผู้ดำเนินโครงงานวิศวกรรม
นายกิตติพงษ์ เอมหยวก
นายอภิชาติ สุดสาคร
นายสุรินทร์ ต๋ำคำ
พฤษภาคม 2555

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	ข
Abstract	ง
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตการทำโครงงาน	2
1.5 แผนการดำเนินโครงงาน	3
1.6 รายละเอียดงบประมาณตลอดการดำเนินโครงงาน	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น	4
2.1การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต (Drying Shrinkage)	5
2.2 การบ่มคอนกรีต (Curing of Concrete)	6
2.3 เถ้าลอย (Fly ash)	11
2.4 ผงหินปูน (Limestone Powder)	14
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงงาน	16
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	16
3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบคอนกรีต	25
3.3 การบ่มคอนกรีต	34
3.4 ขั้นตอนการทดสอบคอนกรีต	36

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ 41
4.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต 41
4.1.1 ผลของการบ่ม ที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีต 41
4.1.2 ผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีต 62
4.2 การทดสอบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต 68
4.1.1 ผลของการบ่ม ที่มีต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต 68
4.1.2 ผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ที่มีต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต 77

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ 83
5.1 สรุปผล 83
5.1.1 ผลการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต 83
5.1.2 ผลการบ่มต่อหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต 85
5.2 ข้อเสนอแนะ 86

เอกสารอ้างอิง 87
ภาคผนวก ก 90
ภาคผนวก ข 98

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 12
ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติมตามมาตรฐาน ASTM C618 12
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่ใช้กันโดยทั่วไป [9] 16
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย จากแม่เมาะ จ.ลำปาง [18] 22
ตารางที่ 3.3 แสดงส่วนผสมของคอนกรีตสำหรับ ทดสอบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต 25
ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงปริมาณวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีตต่อลิตร 26
ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงส่วนผสมคอนกรีตสำหรับการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต 32
ตารางที่ 3.6 ตารางแสดงปริมาณวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีตต่อลิตร 33
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลกำลังอัดของคอนกรีต 42

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การบ่มด้วยวิธีการขังหรือการหล่อน้ำ 7
รูปที่ 2.2 การบ่มด้วยวิธีการคลุมด้วยวัสดุเปียกชื้น 8
รูปที่ 2.3 การบ่มด้วยวิธีการใช้แผ่นผ้าพลาสติกคลุม 9
รูปที่ 2.4 การบ่มด้วยวิธีการใช้สารเคมีเคลือบผิวคอนกรีต 10
รูปที่ 2.5 ผลของการบ่มที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีต 11
รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง) 16
รูปที่ 3.2 มวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดสอบ 18
รูปที่ 3.3 การจัดเก็บมวลรวมหยาบเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น 18
รูปที่ 3.4 มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ 19
รูปที่ 3.5 การจัดเก็บมวลรวมละเอียดที่ในทำการทดสอบ 19
รูปที่ 3.6 แสดงกราฟส่วนขนาดคละของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด 21
รูปที่ 3.7 สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำอย่างแรง RHEOBUILD – 1000 22
รูปที่ 3.8 เถ้าลอย 23
รูปที่ 3.9 ผงหินปูนละเอียด 23
รูปที่ 3.10 เถ้าก้นเตา 24
รูปที่ 3.11การปรับความชื้นและการเก็บตัวอย่างเถ้าก้นเตา 24
รูปที่ 3.12 การผสมคอนกรีต 27
รูปที่ 3.13 การผสมเถ้าลอย หรือผงหินปูนให้เข้ากับปูนซีเมนต์ 28
รูปที่ 3.14 การทดสอบหาค่าการยุบตัว 29
รูปที่ 3.15 แบบหล่อคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยม ขนาด (7.5 x7.5 x 28.5 เซนติเมตร) 29
รูปที่ 3.16 การสั่นคอนกรีต 29
รูปที่ 3.17 การปิดหน้าผิวคอนกรีต 29
รูปที่ 3.18 แบบทรงกระบอกมาตรฐาน ขนาด 10 x 20 เซนติเมตร 30
รูปที่ 3.19 การสั่นคอนกรีต 30
รูปที่ 3.20 การปิดผิวหน้าด้วยพลาสติก 30
รูปที่ 3.21 การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำ 34
รูปที่ 3.22 การบ่มคอนกรีตด้วยกระสอบ 35
รูปที่ 3.23 การบ่มคอนกรีตด้วยพลาสติก 35
รูปที่ 3.24 การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต 36

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.25 การจดบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ 37
รูปที่ 3.26 ตั้งค่าแท่งเหล็ก Set zero 37
รูปที่ 3.27 วัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาว คอนกรีต 37
รูปที่ 3.28ชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่าง 38
รูปที่ 3.29 ตำแหน่งที่เก็บก้อนตัวอย่างคอนกรีต 38
รูปที่ 3.30 การวัดความสูง และเส้นผ่าศูนย์กลาง 39
รูปที่ 3.31 ชั่งน้ำหนัก 39
รูปที่ 3.32 เครื่องทดสอบ (Compaction Strength) 39
รูปที่ 3.33 การทดสอบกำลังอัด และการเตรียมก้อนตัวอย่างที่ถูกต้องก่อนเข้าเครื่องทดสอบ กำลังอัด 40
รูปที่ 4.1 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร ช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.2 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 43
รูปที่ 4.2 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วน ปริมาตเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.2 และอัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสาน 0.55 44
รูปที่ 4.3 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อ ปริมาตร ช่องว่างมวรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 45
รูปที่ 4.4 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตร เพสต์ ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.5 45
รูปที่ 4.5 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 46
รูปที่ 4.6 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตร เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.35 47
รูปที่ 4.7 ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.35 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวม ที่อัดแน่น 1.4 47

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.8 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.80 และ อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 48

รูปที่ 4.9 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.80 49

รูปที่ 4.10 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 30% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 50

รูปที่ 4.11 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย เถ้าลอย 50% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 50

รูปที่ 4.12 ผลของการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดของคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าลอย 30% อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 51

รูปที่ 4.13 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดของคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 50 % อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 51

รูปที่ 4.14 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 30% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 52

รูปที่ 4.15 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 50% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 53

รูปที่ 4.16 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดของคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 30% อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 54

รูปที่ 4.17 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดของคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 50% อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 54

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.18 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 10% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อ ปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 55

รูปที่ 4.19 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 20% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 56

รูปที่ 4.20 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 10% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 57

รูปที่ 4.21 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 20% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 57

รูปที่ 4.22 ผลของวิธีการบ่ม ต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 10% ร่วมกับเถ้าลอย 20% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 58

รูปที่ 4.23 กราฟแสดงผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต ต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 10% ร่วมกับเถ้าลอย 20% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และ อัตราส่วน ปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 59

รูปที่ 4.24 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา 30% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 60

รูปที่ 4.25 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา 30% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 61

รูปที่ 4.26 ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา 0.30 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 61

รูปที่ 4.27 ผลของอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.2 และ1.4 ต่อกำลังอัดของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 62

รูปที่ 4.28 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 , 0.55 และ 0.80 ต่อกำลังอัดของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 63

รูปที่ 4.29 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ต่อกำลังอัดของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 64

รูปที่ 4.30 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนต่อกำลังอัดของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 65

รูปที่ 4.31 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ผงหินปูนร่วมกับด้วยเถ้าลอย ต่อกำลังอัดของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 66

รูปที่ 4.32 ผลของการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา ต่อกำลังอัดคอนกรีต ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 67

รูปที่ 4.33 ผลของวิธีการบ่มต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร ช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 68

รูปที่ 4.34 ผลของวิธีการบ่มต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยด้วยเถ้าลอย 50% 69

รูปที่ 4.35 ผลของวิธีการบ่ม ต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 10% 70

รูปที่ 4.36 ผลของวิธีการบ่มต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา 30% 71

รูปที่ 4.37 ผลของวิธีการบ่มต่อค่าการสูญเสียความชื้นของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 72

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.38 ผลของวิธีการบ่มต่อค่าการสูญเสียความชื้นของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยด้วยเถ้าลอย 50% 72

รูปที่ 4.39 ผลของวิธีการบ่มต่อค่าการสูญเสียความชื้นของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยด้วยผงหินปูน 10% 73

รูปที่ 4.40 ผลของวิธีการบ่มต่อค่าการสูญเสียความชื้นของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา 30% 73

รูปที่ 4.41 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มต่อค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตร เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 74

รูปที่ 4.42 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม ต่อค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และ แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 50% 75

รูปที่ 4.43 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มต่อค่าการหดตัวของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยด้วยผงหินปูน 10 % 75

รูปที่ 4.44 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มต่อค่าการหดตัวของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และ แทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา 30% 76

รูปที่ 4.45 ผลของอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น1.2 และ1.4 ต่อการหดตัวแบบแห้งคอนกรีต และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 77

รูปที่ 4.46 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35, 0.55 และ 0.80 ต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 78

รูปที่ 4.47 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 79

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.48 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน ต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 80

รูปที่ 4.49 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ผงหินปูน 10% ร่วมด้วยเถ้าลอย 20% ต่อการหดตัวแบบ แห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 81

รูปที่ 4.50 ผลของการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา 30% ต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 82

มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันปัจจุบัน โดยมีชื่อเรียกแตกต่างกันตามสัดส่วนผสม คือ ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) ประกอบด้วย ซีเมนต์ น้ำ และฟองอากาศ , มอร์ตาร์ (Mortar) ประกอบด้วย ซีเมนต์เพสต์ผสมทราย และคอนกรีต (Concrete) ประกอบด้วย มอร์ต้าร์ผสมหิน โดยมีน้ำเป็นตัวช่วยทำปฏิกิริยาเมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง พอที่จะเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากนั้นก็แปรสภาพเป็นของแข็งมีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีต

ในปัจจุบันปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต เป็นปัญหาที่ส่งผลต่อความคงทนของคอนกรีตในอนาคต ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับการหดตัวของคอนกรีตจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีตมีอยู่หลายปัจจัย เช่น อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น , อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน , การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน , การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาและเงื่อนไขการบ่มคอนกรีต เป็นต้น

โครงงานนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลของการบ่มต่อการหดตัวของคอนกรีต ซึ่งการบ่มคอนกรีตมีความสำคัญต่องานคอนกรีตเป็นอย่างมาก เนื่องจากการบ่มคอนกรีตจะช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ คอนกรีตที่ได้รับการบ่มอย่างเพียงพอ จะลดปัญหาเรื่องการแตกร้าวและทำให้กำลังอัดพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในโครงงานนี้จึงได้ศึกษาผลของวิธีการบ่มคอนกรีต 4 วิธีคือ การบ่มด้วยน้ำ , การบ่มด้วยกระสอบ , การบ่มด้วยพลาสติกและการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต และมีการศึกษาปัจจัยเพิ่มเติมได้แก่ อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น , อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน , การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูนและการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา และผลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการพิจารณาวิธีการบ่มคอนกรีตที่ช่วยลดปัญหาการหดตัวของคอนกรีตได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการบ่มที่มีต่อกำลังอัด และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของ อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น , อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน , การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูนและการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา ที่มีผลต่อกำลังอัดและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ทราบถึงผลการบ่มที่มีต่อกำลังอัด และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

1.3.2 ทราบถึงผลของ อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น , อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน , การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูนและการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาที่มีต่อกำลังอัด และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

1.4 ขอบเขตการทำโครงงาน

โครงงานนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวข้องกับผลของการบ่มต่อกำลังอัด และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต โดยกำหนดขอบเขตการศึกษาดังนี้

- อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น (1.2 และ 1.4)
- อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (0.35, 0.55 และ 0.80)
- การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะ (30 % และ 50%)
- การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (10% และ 20%)
- การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา (30%)
- วิธีการบ่มคอนกรีต (น้ำ , กระสอบ , พลาสติก และน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต)
- ระยะเวลาการบ่มคอนกรีต (0, 7, 14 และ 28 วัน)
- อุณหภูมิและความชื้น (35°C และ 50% RH)

1.5 แผนการดำเนินโครงงาน

เดือน / กิจกรรม	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม
1.การศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวกับการทำโครงงาน						
2.เตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการทำโครงงาน						
3.ทำการทดสอบการหดตัวแบบแห้งและกำลังอัดของคอนกรีต						
4.วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ						
5.เขียนโครงงาน						

1.6 รายละเอียดงบประมาณตลอดการดำเนินโครงงาน

- ค่าวัสดุสำนักงาน 1000 บาท
- ค่าวัสดุสนาม/ในห้องปฏิบัติการ 1000 บาท
- ค่าถ่ายเอกสาร และเข้ารูปเล่ม 1000 บาท

รวมค่าใช้จ่าย 3000 บาท (สามพันบาทถ้วน)

หมายเหตุ ถัวเฉลี่ยทุกรายการ

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

ในบทนี้จะกล่าวถึง หลักการและงานศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการบ่มต่อกำลังอัดและการหดตัวของคอนกรีต การบ่มคอนกรีตเป็นการควบคุมน้ำในคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตต้องการน้ำสำหรับทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อน้ำระเหยออกจากคอนกรีต ก็จะทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวแบบแห้ง ซึ่งการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่เกิดขึ้นนั้น บางส่วนไม่อาจกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ แม้ว่าจะทำให้คอนกรีตเปียกชื้นขึ้นมาใหม่ ซึ่งการหดตัวแบบแห้งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการแตกร้าวของคอนกรีต

2.1 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต (Drying Shrinkage)

การหดตัวแบบแห้งเกิดจากการที่คอนกรีตอยู่ในสภาวะอากาศที่มีความชื้นต่ำทำให้คอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศสูญเสียน้ำ และเกิดการหดตัวของคอนกรีตขึ้น การสูญเสียน้ำในเนื้อคอนกรีตนั้นสามารถป้องกันได้ได้ด้วยวิธีการบ่มเปียกหรือบ่มชื้น และการบ่มด้วยวิธีต่างๆที่ป้องกันการสูญเสียความชื้น

2.1.1 กลไกของการเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งและการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง มีกลไกการเกิด คือ ในคอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศที่มีความชื้นต่ำกว่าความชื้นในช่องว่างคะปิลลารี (Capillary Pores) จึงทำให้น้ำอิสระ (Free Water) เกิดการสูญเสียความชื้นไปสู่อากาศได้ด้วยการระเหย ทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในช่องว่างคะปิลลารี ประกอบกับปริมาตรของคอนกรีตลดลง หรือหดตัวลงจากการสูญเสียน้ำ ถ้าการหดตัวนี้ถูกยึดรั้ง ไม่ว่าด้วยโครงสร้างที่อยู่รอบข้าง หรือด้วยเนื้อคอนกรีตภายในที่ไม่มีการสูญเสียความชื้น รอยแตกก็อาจเกิดขึ้นได้ ถ้าการยึดรั้งนี้ก่อให้เกิดหน่วยแรงยึดรั้งที่มีค่าสูงกว่ากำลังดึงของคอนกรีตในขณะนั้น การแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งจะแตกต่างกับการแตกร้าวแบบพลาสติก ตรงที่ช่วงเวลาการเกิดการแตกร้าวแบบพลาสติก จะเกิดในช่วงที่คอนกรีตอยู่ในช่วงพลาสติก และสามารถแก้ไขได้ง่าย โดยการตกแต่งผิวคอนกรีตก่อนที่คอนกรีตจะแข็งตัว ส่วนการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งจะเกิดหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว ซึ่งไม่สามารถจะตกแต่งผิวใหม่ได้แล้ว [1]

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้ง

1) ปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต คอนกรีตที่มีปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีตมาก จะมีปริมาณน้ำอิสระมาก น้ำอิสระเป็นน้ำที่สามารถจะระเหยออกจากคอนกรีตไปได้

2) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูง จะทำให้มีช่องว่างคะปิลลารีมาก ปริมาณน้ำอิสระก็จะมากด้วยการที่คอนกรีตมีช่องว่างคะปิลลารีมาก จะทำให้น้ำระเหยออกจากคอนกรีตได้สะดวก

3) ปริมาณมวลรวมโดยปกติแล้วการหดตัวจะเกิดในซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยหรืออีกนัยหนึ่งมีปริมาณมวลรวมมาก ก็จะทำให้เกิดการหดตัวน้อย

4) ชนิดและคุณภาพของมวลรวม เนื่องจากมวลรวมมักจะเป็นส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของปริมาตร ดังนั้นมวลรวมจึงมีคุณสมบัติที่จะช่วยต่อต้านการหดตัวในคอนกรีตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามวลรวมมีโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูง การแตะกันของมวลรวมเป็นกลไกที่สำคัญอันหนึ่งของการต้านทานการหดตัว ซึ่งเกิดจากซีเมนต์เพสต์ได้ มวลรวมที่มีการดูดซึมน้ำมาก ก็มักจะก่อให้เกิดการหดตัวแบบแห้งในคอนกรีตมากตามไปด้วย ตัวอย่างมวลรวมที่มีการดูดซึมน้ำมาก เช่น มวลรวมเบา (Light Weight Aggregate) เป็นต้น ซึ่งปกติแล้วมวลรวมที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงก็มักจะมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นต่ำด้วย ทำให้แรงต้านทานการหดตัวต่ำตามไปด้วยขนาดคละของมวลรวมที่ดีก็จะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้การหดตัวของคอนกรีตลดลงเนื่องจากจะทำให้คอนกรีตต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยลง

5) ชนิดและปริมาณของวัสดุผสม การใช้สารปอซโซลาน หรือวัสดุผงบางชนิด ก็มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต เช่น เถ้าลอยสามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้ เนื่องจากช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีตและเถ้าลอยบางชนิดก็ยังมีคุณสมบัติช่วยให้คอนกรีตขยายตัวเล็กน้อย ทำให้ชดเชยการหดตัวได้บางส่วน การใช้ผงซิลิกาฟูมก็สามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้ เนื่องจากช่วยเพิ่มความแน่นให้กับคอนกรีต การใช้ผงฝุ่นหินก็อาจสามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งด้วยเช่นกัน ถ้าการใช้นั้นไม่เป็นการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต เป็นต้น

6) อุณหภูมิและความชื้นของสิ่งแวดล้อม สิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำได้เร็วขึ้น จึงทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งมากขึ้น

7) มิติและรูปร่างลักษณะของโครงสร้างคอนกรีต โครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากก็จะสูญเสียความชื้นได้เร็ว จึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งได้ง่าย [1]

2.1.3 บริเวณที่มักจะเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งมักจะเกิดขึ้นให้เห็นตรงบริเวณผิวคอนกรีตที่สัมผัสกับอากาศ บางครั้งถ้าเป็นผนังบางก็อาจมีรอยแตกข้ามไปถึงพื้นผิวอีกด้านหนึ่งได้ ในกรณีของผิวถนนก็มักจะเห็นรอยแตกตามขวางหรือตามยาวรอยแตกตามมุมช่องเปิดของหน้าต่างหรือประตูก็เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของบริเวณที่มักจะเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง [1]

2.1.4 ช่วงเวลาที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง

ช่วงเวลาที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งมักจะเป็นช่วงเวลาที่หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มเป็นต้นไป รอยแตกร้าวนี้อาจจะเพิ่มขึ้นไปได้เรื่อยๆ แม้แต่อายุคอนกรีตจะมากจนเป็นปีแล้วก็ตาม แต่ส่วนใหญ่แล้วมักจะเริ่มเกิดให้เห็นในช่วง 2-3 เดือนแรกหลังจากสิ้นสุดการบ่ม [1]

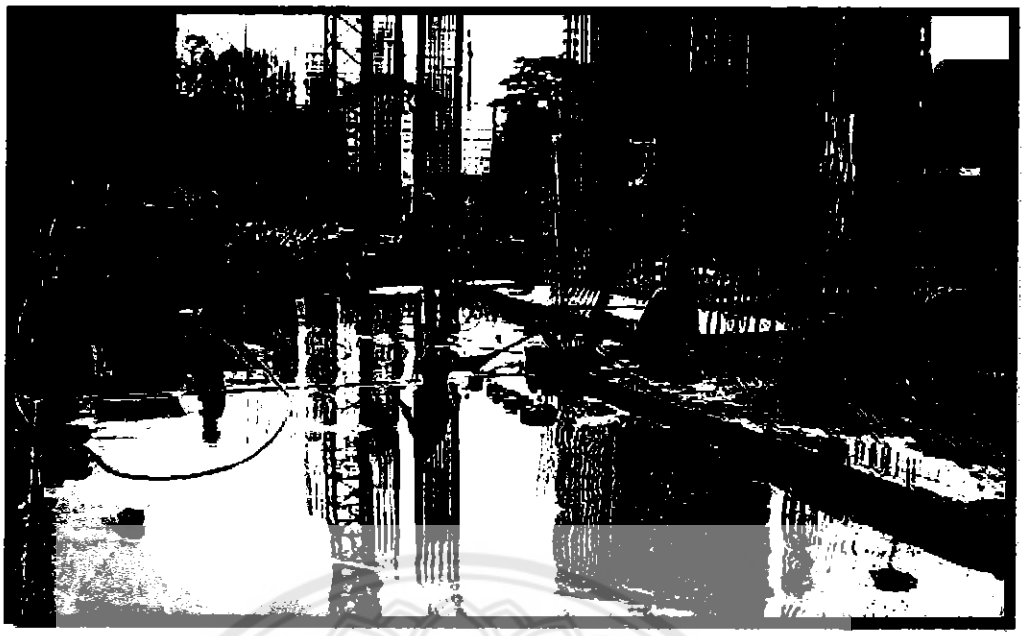
2.2 การบ่มคอนกรีต

การบ่มคอนกรีตเป็นการควบคุมและป้องกันมิให้น้ำในคอนกรีตระเหยออกจากคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญที่สุดสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง ดังนั้น หลังจากที่ผิวหน้าคอนกรีตแข็งตัวแล้ว จะต้องบ่มคอนกรีตให้มีความชื้นอยู่เสมอ กำลังของคอนกรีตจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตราบเท่าที่ยังมีความชื้นให้ปูนซีเมนต์ได้ทำปฏิกิริยากับน้ำ ส่วนวิธีการสำหรับบ่มคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับสภาพของงานคอนกรีตนั้นๆ เป็นหลัก ลักษณะของการบ่มคอนกรีตสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะ คือ การเพิ่มความชื้นให้คอนกรีต การป้องกันการเสียน้ำของคอนกรีต และการเร่งกำลัง

2.2.1 การบ่มโดยการเพิ่มความชื้นให้คอนกรีต

การบ่มลักษณะนี้จะเพิ่มความชื้นให้กับผิวคอนกรีตโดยตรง เพื่อทดแทนการระเหยของน้ำออกจากคอนกรีต การบ่มลักษณะนี้สามารทำได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

1) การขังหรือหล่อน้ำ เป็นการทำนบกั้นน้ำไม้ให้น้ำไหลออกมักจะใช้กับงานทางระดับ เช่น พื้น หรือถนน เป็นต้น วัสดุที่ใช้ทำทำนบอาจจะเป็นดินเหนียว หรืออิฐก็ได้ ข้อควรระวังสำหรับวิธีนี้ คือ ต้องระวังอย่าให้ทำนบกั้นน้ำพัง และหลังจากบ่มเสร็จแล้ว อาจจะต้องทำความสะอาดผิวหน้าคอนกรีต

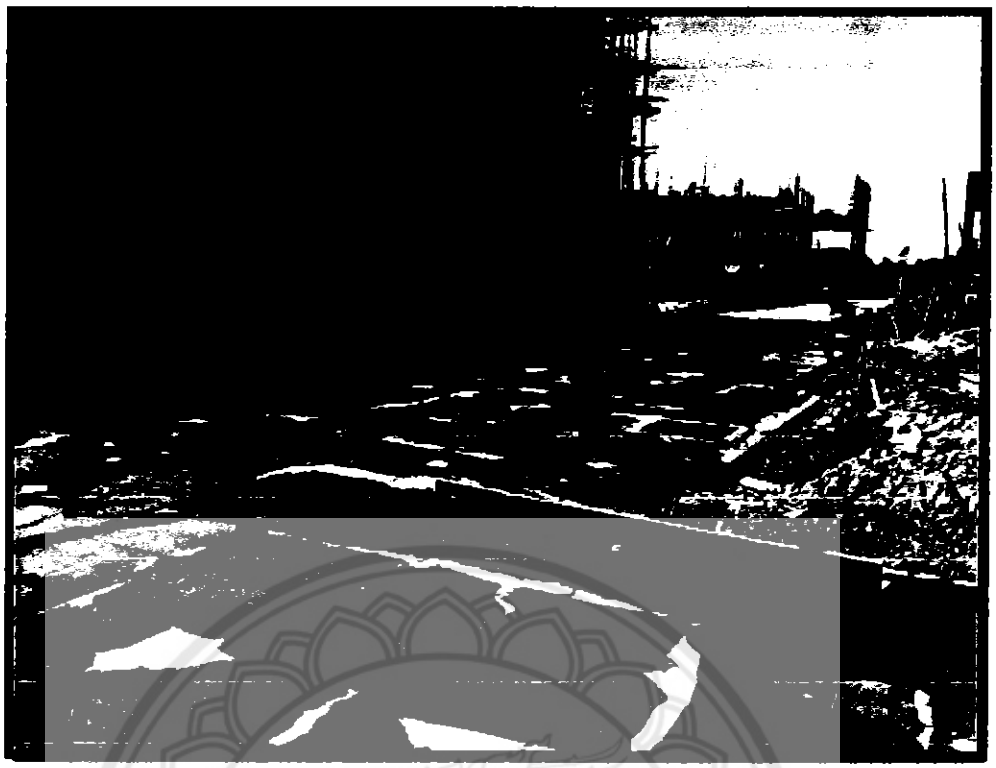


รูปที่ 2.1 การบ่มด้วยวิธีการขังหรือการหล่อน้ำ

ที่มา http://www.bhumisiamsupply.com

2) การฉีดน้ำหรือรดน้ำ เป็นการฉีดน้ำให้ผิวคอนกรีตเปียกอยู่เสมอวิธีนี้ใช้ได้กับงานคอนกรีต ทั้งในแนวดิ่ง แนวระดับ หรือแนวเอียง ข้อควรระวัง คือต้องฉีดน้ำให้ทั่วถึงทุกส่วนของคอนกรีต และแรงดันน้ำต้องไม่แรงเกินไปจนชะเอาผิวหน้าคอนกรีตที่ยังไม่แข็งตัวดีออก วิธีนี้ต้องสิ้นเปลืองน้ำมากและต้องอาศัยที่ที่มีแรงดันน้ำมากพอ

3) การคลุมด้วยวัสดุเปียกชื้น เป็นวิธีที่ใช้กันมาก เพราะสะดวก ประหยัด และสามารถใช้ได้กับงานทั้งแนวระดับ แนวดิ่ง และแนวเอียง วัสดุที่ใช้คลุมอาจจะใช้ ผ้าใบ กระสอบ หรือวัสดุอื่นที่อมน้ำ ข้อควรระวัง คือวัสดุที่คลุมต้องเปียกชุ่มอยู่เสมอ การคลุมต้องคลุมให้วัสดุคลุมเหลื่อมกัน วัสดุที่ใช้คลุมต้องปราศจากสารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต หรือทำให้คอนกรีตด่าง สำหรับการคลุมงานคอนกรีตในแนวดิ่ง ต้องยึดวัสดุคลุมให้แน่นหนา ไม่เลื่อนหล่นลงมาได้ โดยเฉพาะเวลาที่ราดน้ำ ซึ่งจะต้องทำเป็นประจำ



รูปที่ 2.2 การบ่มด้วยวิธีการคลุมด้วยวัสดุเปียกชื้น

ที่มา http://www.watisan.com

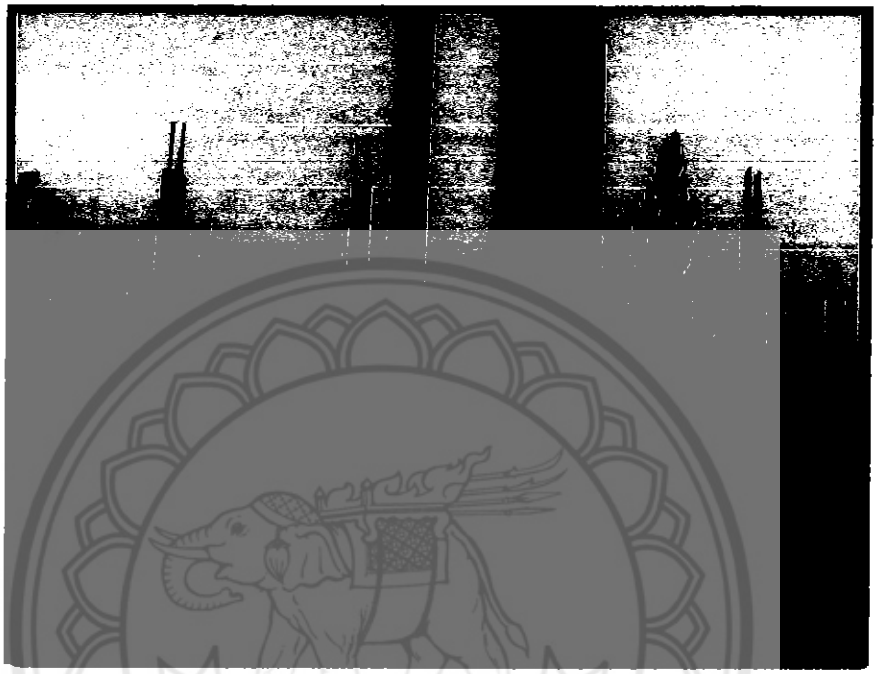
2.2.2 การบ่มโดยการป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต

วิธีการนี้ใช้การผนึกผิวของคอนกรีต เพื่อป้องกันมิให้ความชื้นจากคอนกรีตระเหยออกจากเนื้อคอนกรีต การบ่มลักษณะนี้สามารถกระทำได้หลายวิธีดังนี้

1) **การบ่มในแบบหล่อ** แบบหล่อไม้ที่เปียก และแบบหล่อเหล็ก สามารถป้องกันการสูญเสียความชื้นได้ดี วิธีนี้จัดได้ว่าง่ายที่สุด เพียงแต่ทิ้งแบบหล่อให้อยู่กับคอนกรีตที่หล่อไว้ให้นานที่สุดเท่าที่จะทำได้ และคอยดูแลให้ผิวด้านบนคอนกรีตมีน้ำอยู่ โดยน้ำนั้นสามารถไหลซึมลงมาระหว่างแบบหล่อกับคอนกรีตได้

2) **การใช้กระดาษกันน้ำซึม** เป็นการใช้กระดาษกันน้ำซึม ปิดทับผิวคอนกรีตให้สนิทเป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน วิธีนี้มักนิยมใช้กับงานคอนกรีตแนวระดับ กระดาษกันน้ำซึมนี้ เป็นกระดาษเหนียวสองชั้นยึดติดกันด้วยยางมะตอย และเสริมความเหนียวด้วยใยแก้ว มีคุณสมบัติในการยืดหดตัวไม่มากนักเวลาที่เปียกและแห้ง ข้อควรระวังในการใช้กระดาษ คือ บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นจะต้องผนึกให้แน่นด้วยกาว หรือเทป และกระดาษต้องไม่มีร่อยรอยฉีกขาด หรือชำรุด

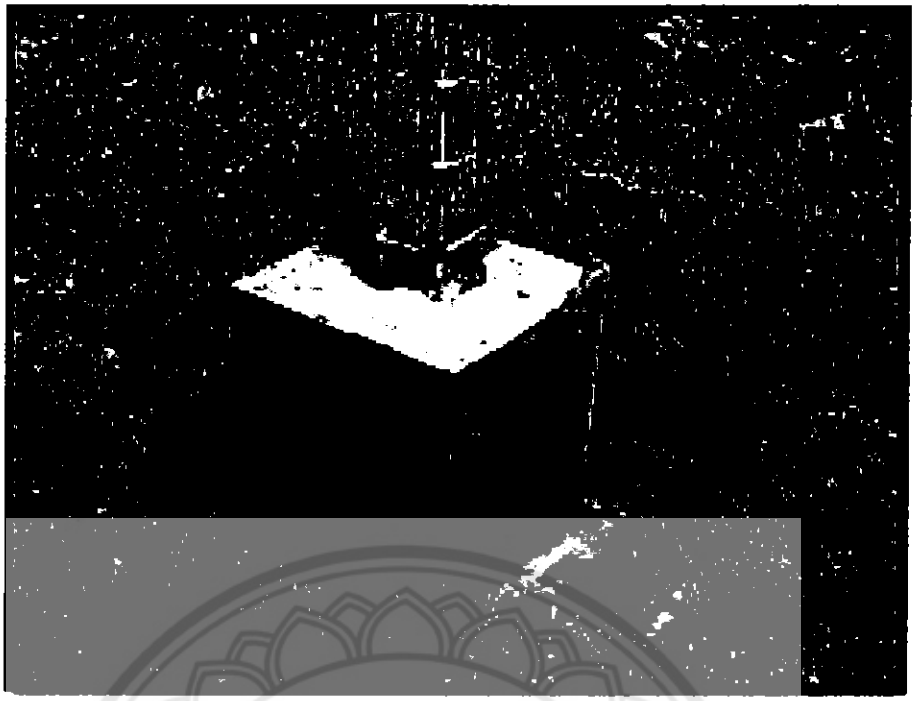
3) การใช้แผ่นผ้าพลาสติกคลุม วิธีการนี้จะเหมือนกับการใช้กระดาษกันน้ำ แต่แผ่นผ้าพลาสติกจะเบากว่ามาก จึงสะดวกในการใช้มากกว่า สามารถใช้กับงานโครงสร้างทุกชนิด ข้อควรระวังก็เช่นเดียวกับกระดาษกันน้ำ คือ รอยต่อและการชำรุดฉีกขาด และเนื่องจากมีน้ำหนักเบา จึงต้องระวังเรื่องการผูกยึด ป้องกันลมพัดปลิวด้วย



รูปที่ 2.3 การบ่มด้วยวิธีการใช้แผ่นผ้าพลาสติกคลุม

ที่มา http://www.bloggang.com

4) การใช้สารเคมีเคลือบผิวคอนกรีต เป็นการพ่นสารเคมีลงบนผิวคอนกรีตซึ่งสารเคมีที่พ่นนี้จะกลายเป็นเยื่อบางๆ คลุมผิวคอนกรีตป้องกันการระเหยออกของน้ำในคอนกรีตได้ การบ่มวิธีนี้ทั้งสะดวกและรวดเร็วแต่ค่าใช้จ่ายจะสูง จึงมักใช้กับงานที่บ่มด้วยวิธีอื่นได้ลำบาก การพ่นสารเคมีนี้ต้องกระทำในขณะที่ผิวคอนกรีตยังชื้นอยู่ และต้องพ่นให้ทั่วถึง ข้อที่ควรทราบ คือ สารเคมีประเภทนี้จะทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตที่จะเทใหม่เสียไป จึงไม่ควรใช้กับงานคอนกรีตที่ต้องต่อเติม หรือฉาบปูนในภายหลัง และหากใช้สารเคมีฉีดพ่นแล้ว ไม่ควรฉีดน้ำซ้ำ เพราะน้ำจะไปชะล้างสารเคมีออก ควรชี้แจงให้คนที่ทำงานทราบถึงประเด็นนี้ เพื่อจะได้ไม่ฉีดชะล้างสารเคมีออกโดยรู้เท่าไม่ถึงการณ์



รูปที่ 2.4 การบ่มด้วยวิธีการใช้สารเคมีเคลือบผิวคอนกรีต

ที่มา http://www.sclectcon.com

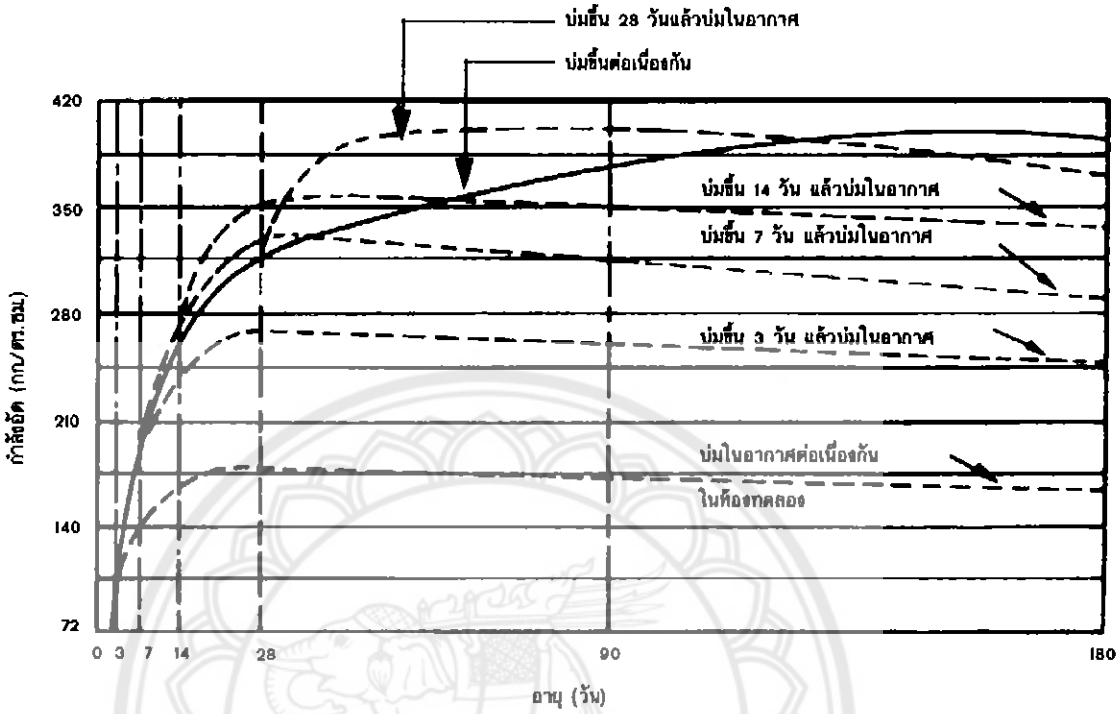
2.2.3 การบ่มด้วยการเร่งกำลัง

เป็นการบ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำ โดยให้ความชื้น และความร้อน กับคอนกรีตที่หล่อเสร็จใหม่ๆ วิธีนี้จะทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นโดยรวดเร็วช่วยลดการหดตัว และเพิ่มความต้านทานต่อสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต การบ่มคอนกรีตด้วยวิธีนี้สามารถทำได้สองวิธี คือ การบ่มด้วยไอน้ำที่มีความดันต่ำ และการบ่มด้วยไอน้ำที่มีความดันสูง การบ่มด้วยการเร่งกำลัง นิยมใช้กันในงานอุตสาหกรรมคอนกรีตสำเร็จรูป

2.2.4 ผลของการบ่มที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีต

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นรวดเร็วในช่วงวันแรกๆถ้าได้รับการบ่ม ซึ่งชี้ถึงความสำคัญของการบ่มในวันแรกๆ กำลังอัดของคอนกรีตมีโอกาสเพิ่มขึ้นเรื่อยๆหลังอายุ 28 วัน โดยอัตราการเพิ่มของกำลังจะช้าลงแต่ก็เพิ่มตลอดเวลาหากได้รับการบ่มที่ดี จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าเราควรบ่มคอนกรีตนานที่สุดเท่าที่จะนานได้ นั่นคือบ่มจนคอนกรีตกำลังสูงตามต้องการในทางปฏิบัติไม่สามารถบ่มคอนกรีตได้นานนัก เนื่องจากข้อจำกัดและกำหนดการก่อสร้าง จากรูป 2.4 แสดงให้เห็นว่าการบ่มชื้นถึง 7 วันทำให้เราได้กำลังของคอนกรีตสูงทัดเทียมกับกำลังของคอนกรีตที่บ่มและทดสอบในสภาพความชื้นถึง 28 วัน ตามมาตรฐานอเมริกาแนะนำ

ให้ใช้เวลาบ่มชื้น 7 วันสำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป หรือเวลาที่จำเป็นเพื่อให้ได้กำลังอัด 70% ของกำลังอัดที่กำหนด สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณมากๆ เช่น ฐานรากแผ่ขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีการบ่มนานอย่างน้อย 2 สัปดาห์ [2]



รูปที่ 2.5 ผลของการบ่มที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีต [2]

2.3 เถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าถ่านหิน หรือ เถ้าลอย เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน จากนั้นตัวดักจับจะรวบรวมเถ้าถ่านหินเพื่อเก็บไว้ในไซโลต่อไป ในบางกรณีที่เผาถ่านหินด้วยอุณหภูมิซึ่งสูงกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าถ่านหิน (ประมาณ 1500 ^{0}C หรือ สูงกว่า) เถ้าถ่านหินจะหลอมเหลวและบางส่วนจับกันเป็นก้อนหรือเป็นเม็ดใหญ่ขึ้น ทำให้มีน้ำหนักมาก และตกลงสู่ก้นเตา จึงเรียกว่า เถ้าก้นเตา (Bottom Ash)

2.3.1 ชนิดของเถ้าลอย

มาตรฐาน ASTM C618 [3] แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 3 ชนิด

1) ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส ปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica,SiO_2) อะลูมินา (Alumina, Al_2O_3) และเฟอร์ริคออกไซด์ (Ferric Oxide, Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 – 2.2 วิธีการเก็บตัวอย่างและทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311 [4] โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียก

อีกชื่อหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและควอรตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [3]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด		
	N	F	C
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ อย่างต่ำร้อยละ	70.0	70.0	50.0
SO_3 อย่างสูง, ร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI), สูงสุดร้อยละ	10.0	6.0	6.0

หมายเหตุ สารปอซโซลานชนิด N (class N) เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan)

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติมตามมาตรฐาน ASTM C618 [3]

ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติม	ชนิด		
	N	F	C
ปริมาณอัลคาไลน์สูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O, ร้อยละ	1.5	1.5	1.5

หมายเหตุ ปริมาณนี้จะใช้ระบุสำหรับคอนกรีตที่มีมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาและต้องใช้ซีเมนต์ที่มีอัลคาไลน์ไม่เกินกำหนด

2) ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

2.3.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะมีปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ ทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2 3H_2O$) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต

($3CaO.2AI_2.3H_2O$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) หลังจากนั้นสารปอซโซลานในที่นี้คือเถ้าลอย ซึ่งมีส่วนผสมของซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์ลงในส่วนผสมของคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้สารไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$) และไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ผลิตผลเช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ แต่ปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมที่เกิดขึ้นจะช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้ในงานคอนกรีตเมื่อใส่เถ้าลอยลงไปในปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆก็จะทำให้คอนกรีตสามารถระบายความร้อนได้ทัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในรูปสมการเคมีได้ดังนี้

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

$$3Ca(OH)_2 + 2.Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO.2.Al_2O_3.3H_2O$$

ปฏิกิริยาระหว่าง $Ca(OH)_2$ กับเถ้าลอยลิกไนต์ (pozzolanic reaction)

อย่างไรก็ตามกลไกในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะซับซ้อนกว่าที่นำสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยตรง มีรายงานเถ้าลอยจะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนตซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงแรก แต่จะหน่วงแค่ไหนขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟต ปริมาณอัลคาไลน์ และปริมาณแคลเซียมในเถ้าลอย [5]

2.3.3 การบ่มคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสม

ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยเกิดขึ้นช้าและใช้เวลานานดังนั้นการบ่มจึงมีความสำคัญต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย การบ่มสามารถใช้บ่มน้ำปกติหรือบ่มชื้นบวกความร้อน คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยทิ้งไว้ในอากาศโดยไม่ได้บ่มด้วยน้ำหรือความชื้นจะมีกำลังรับแรงค่อนข้างต่ำ กำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ทิ้งไว้ในอากาศ 91 วันจะต่ำกว่ากำลังรับแรงที่อายุ 7 วัน ของคอนกรีตเดียวกันที่บ่มชื้น [6] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องบ่มคอนกรีตผสมเถ้าลอยนานกว่าคอนกรีตธรรมดา [1]

2.3.4 ข้อดี-ข้อเสียการใช้เถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมในคอนกรีต

ข้อดี คือ คอนกรีตสามารถเทได้ง่ายขึ้น เพราะเถ้าถ่านหินเป็นรูปทรงกลมแรงเสียดสีระหว่างอนุภาคต่ำ ลดการแยกตัวของคอนกรีต ลดการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต ลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ยืดเวลาการก่อตัว และ ลดราคาของคอนกรีตให้ต่ำลง

ข้อเสีย คือ กำลังอัดที่อายุต้นๆจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาจึงจำเป็นต้องมีการบ่มมากกว่าคอนกรีตธรรมดา

2.4 ผงหินปูน (Limestone Powder)

ผงหินปูนเป็นผลพลอยได้จากการย่อยหิน สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ โดยปกติแล้วผงหินปูนจะถูกเก็บไว้ในบริเวณแหล่งย่อยหิน และเนื่องจากอนุภาคของผงหินปูนมีขนาดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร จึงเป็นขนาดที่ก่อให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ที่อาศัยอยู่ในบริเวณใกล้กับแหล่งย่อยหินเหล่านั้น ผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็มหรือหล่อลื่น โดยมีผลกระทบด้านความทนทาน การกัดกร่อนจากเกลือซัลเฟต และผลกระทบด้านกายภาพ เมื่อผสมผงหินปูนลงในคอนกรีต จะทำให้ลดปริมาณช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่น จึงส่งผลให้เกลือซัลเฟตซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณน้ำอิสระทั้งหมดที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีตที่แข็งตัวลงได้ปริมาณร้อยละ 20 ถึง 25 โดยน้ำหนักของน้ำอิสระทั้งหมดที่อยู่ภายในคอนกรีต ปริมาณผงหินปูนในส่วนผสมในสัดส่วนร้อยละ 5 และร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เมื่อเวลาผ่านไป 5 ปี คอนกรีตที่ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และคอนกรีตที่บ่มในอากาศจะมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่บ่มในน้ำ ในขณะที่ค่าการซึมผ่านของออกซิเจนจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณผงหินปูนมีค่าเพิ่มขึ้น การผสมผงหินปูนในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของคอนกรีตจะไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสมบัติของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ไม่ควรผสมผงปูนเกินกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ [7]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เศกสรรค์ ชูทับทิม และ วชิร สามวัง ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยที่มีอายุการบ่มต่างกัน โดยมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยที่บ่มด้วยน้ำตลอดเวลามีกำลังอัดสูงขึ้นเมื่ออายุมากขึ้นและมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยในส่วนผสมน้อยกว่าจะมีกำลังสูงกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยในส่วนผสมมากกว่า แต่มอร์ต้าร์ผสม เถ้าลอยทั้งหมดยังคงมีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมทุกอายุการทดสอบ เมื่อดูถึงผลกระทบจากอายุการบ่มพบว่า เมื่อใช้เถ้าลอยในส่วนผสมเท่ากัน มอร์ต้าร์ที่มีอายุการบ่มนานกว่าจะมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าร์ที่มีอายุการบ่มน้อยกว่า ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยในส่วนผสมในปริมาณมากต้องการการบ่มที่นานขึ้นเพื่อให้มอร์ต้าร์เหล่านั้นมีกำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ที่มีการบ่มตลอดเวลา [8]

ทวิช กล้าแท้ และ คมสันมาลีสี ได้ทำการศึกษาอัตราการเพิ่มของผงหินปูนที่ 10% มีแนวโน้มให้กำลังอัดสูงที่สุด ค่ากำลังอัดจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนปริมาณน้ำที่มากขึ้นทำให้เกิดฟองอากาศซึ่งส่งผลกระทบต่อช่องว่างในเนื้อของซีเมนต์เพสต์ทำให้ความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ลดลงดังนั้นผงหินปูนจะช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดได้อย่างรวดเร็วในช่วงต้นและส่งผลต่อค่ากำลังอัดในระยะยาวและช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตในระยะต้น [9]

บุรฉัตร ฉัตรวีระ (2543) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย พบว่าสามารถลดการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตลงได้และช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดในระยะยาว [10]

สุชาติ ภาคภูมิเกียรติคุณและอิทธิพร ศิริสวัสดิ์ ได้ทำการศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนที่อัตราส่วนร้อยละต่างๆ จะส่งผลทำให้การหดตัวและร้อยละการไหลแผ่จะเพิ่มมากขึ้น ตามปริมาณผงฝุ่นหินปูนที่เพิ่มขึ้นด้วย แต่ปริมาณฟองอากาศและความสามารถในการก่อตัวจะลดลงเล็กน้อยตามปริมาณผงฝุ่นหินปูนที่เพิ่มขึ้น ในส่วนคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดและแรงดึงจะลดลงตามปริมาณผงฝุ่นหินปูนที่เพิ่มขึ้น ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ และพบว่าเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น กำลังรับแรงอัดและแรงดึง ที่ร้อยละผงฝุ่นหินปูน 5 และ 10 จะมีการพัฒนากำลังเข้าใกล้กำลังรับแรงของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ส่วนที่ร้อยละผงฝุ่นหินปูน 15, 20 และ 25 จะมีการพัฒนากำลังต่ำกว่ากำลังรับแรงของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อผงฝุ่นหินปูนที่เหมาะสมที่สุด คือ ร้อยละ 90:10 โดยน้ำหนัก [11]

บทที่ 3
วิธีดำเนินโครงงาน

บทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับ การดำเนินการของโครงงาน การทดสอบกำลังอัด (Compressive strength) และการหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage) ของคอนกรีต โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ วัสดุที่ใช้ในการศึกษา ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต การบ่มคอนกรีตด้วยวิธีต่างๆ และขั้นตอนการทดสอบคอนกรีต ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ตราช้าง) ที่ใช้กันโดยทั่วไป ผลิตโดย บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (ลำปาง) ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม 15-2532 ขนาดบรรจุ 50 กก./ถุง โดยมีองค์ประกอบทางเคมี แสดงดังตารางที่ 3.1

ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 3.15 (ภาคผนวก ก) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188 [12]

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่ใช้กันโดยทั่วไป [9]

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์
SiO_2	20.0
Al_2O_3	5.8
Fe_2O_3	3.2
CaO	64.4
MgO	0.5
SO_3	2.52
Na_2O	0.5
K_2O	0.5
สารประกอบอื่น	1.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา	1.0
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง	0.5

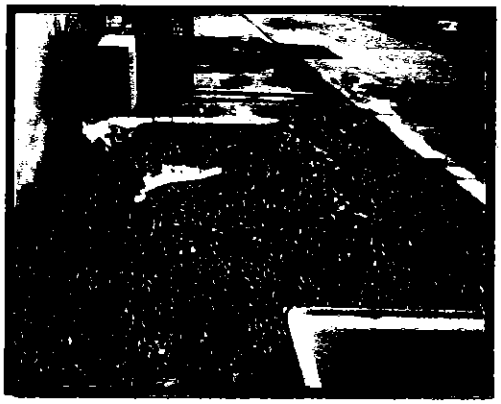
รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง)

3.1.2 มวลรวมหยาบ

มวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดสอบ คือ หินปูน (Limestone) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ก) ขนาดโตสุดของหินที่ใช้เท่ากับ 3/4 นิ้ว โดยมีแหล่งผลิตอยู่ที่จังหวัดนครสวรรค์

การเตรียมหินที่จะใช้ในการทดสอบจะทำการล้างหินโดยการตักใส่ในอ่างน้ำที่เตรียมไว้ ใส่ในน้ำสะอาดลงไปในอ่างให้ท่วมเม็ดหินทั้งหมด แช่ไว้ 24 ชั่วโมง หรือประมาณ 1 วัน จากนั้นนำหินที่แช่ไว้ล้างให้สะอาดปราศจากดินหรือวัสดุที่ติดมาออกให้หมด จากนั้นนำหินที่ล้างเสร็จแล้วมาผึ่งในที่ร่มจนกว่าหินอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข) และเก็บไว้ในถังพลาสติก พร้อมทั้งคลุมด้วยกระดาษชุ่มน้ำพร้อมทั้งปิดฝาเพื่อป้องกันฝุ่น และการสูญเสียความชื้น ดังรูปที่ 3.3

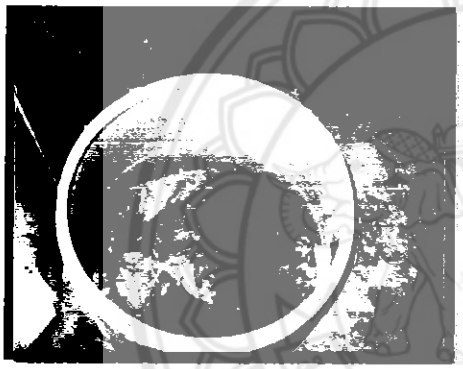
วิธีการหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษา โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127 [13] จากการทดสอบพบว่ามวลรวมหยาบที่ใช้ มีค่าความถ่วงจำเพาะในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 2.70 ร้อยละการดูดซึมเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.75 และมีค่าหน่วยน้ำหนักของหินมีค่าเท่ากับ 1,534 กก./ลบ.ม (ภาคผนวก ก)



ก.มวลหยาบ

ข.การผึ่งมวลหยาบในที่ร่ม

รูปที่ 3.2 มวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดสอบ



ก.คลุมด้วยกระดาษชุ่มน้ำ

ข.เก็บไว้ในถังพลาสติก และปิดฝา

รูปที่ 3.3 การจัดเก็บมวลรวมหยาบเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น

3.1.3 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ คือ ทรายแม่น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) โดยมีแหล่งผลิตอยู่ที่อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก

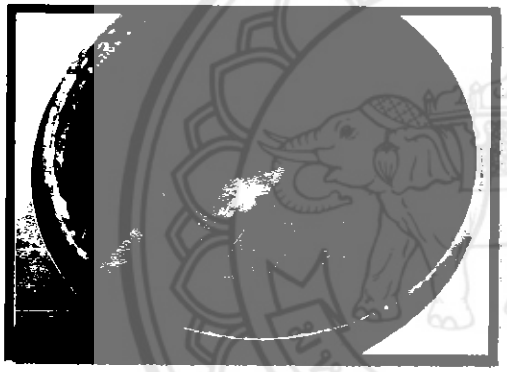
การเตรียมทรายที่จะใช้ในการทดสอบนั้น จะนำทรายที่มีความชื้นที่ไม่สม่ำเสมอกันผึ่งในที่ร่ม จนกว่าอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง หรือให้มีความชื้นระหว่าง 1 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำทรายที่จะใช้ในการทดสอบเก็บไว้ในถังพลาสติก ปิดฝาให้แน่นพร้อมทั้งคลุมด้วยกระดาษชุ่มน้ำ เพื่อป้องกันฝุ่นละอองและการสูญเสียความชื้น ดังรูปที่ 3.5

วิธีการหาค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128 [14] และมาตรฐาน ASTM C29 [15] ตามลำดับ มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ มีค่าความถ่วงจำเพาะในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 2.53 ร้อยละการดูดซึมเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.93 และมีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,527 กก./ลบ.ม (ภาคผนวก ก)

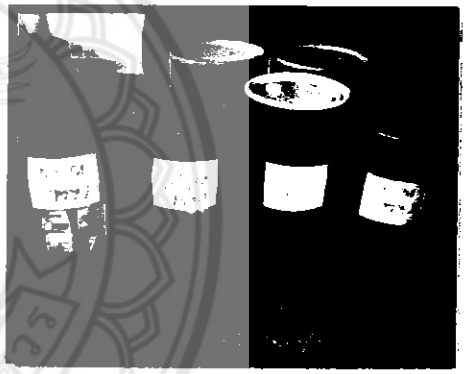
ก. มวลรวมละเอียด

ข. การผึ่งมวลรวมละเอียดในที่ร่ม

รูปที่ 3.4 มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ



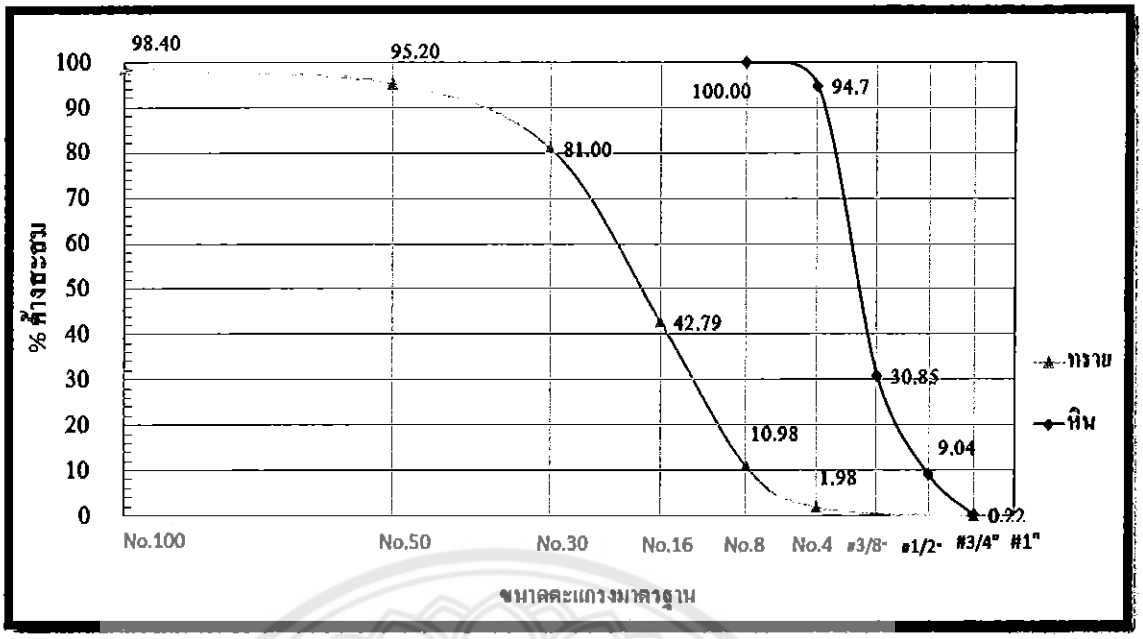
ก.ปิดคลุมด้วยกระดาษชุ่มน้ำ



ข.เก็บไว้ในถุงพลาสติก และปิดฝา

รูปที่ 3.5 การจัดเก็บมวลรวมละเอียดที่ในทำการทดสอบ

ในการหาขนาดคละของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 136 [16] และ ASTM C 33 [17] ซึ่งเป็นการทดสอบ ที่เรียกว่า การวิเคราะห์หาส่วนขนาดคละของมวลรวมด้วยตะแกรง (Gradation of Aggregates by Sieve Analysis) การทดสอบโดยร่อนหินหรือทราย ผ่านตระแกรงมาตรฐานที่มีลักษณะเป็นช่องเปิดสี่เหลี่ยม แล้วใช้ตระแกรงมาตรฐานขนาด 1/2" 3/4" 3/8" และเบอร์ 4 สำหรับการทดสอบมวลรวมหยาบ และใช้ตระแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 8 16 30 50 และ 100 สำหรับทดสอบทราย ซึ่งมีผลที่ได้จากการทดสอบได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงกราฟส่วนขนาดคละของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด

3.1.4 น้ำ

น้ำสำหรับผสมคอนกรีต

หน้าที่หลักของน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต มีดังต่อไปนี้

1) ทำให้ปูนซีเมนต์และวัสดุผสมมีความลื่น และส่วนผสมของคอนกรีตมีความข้นเหลวพอดี สะดวกต่อการเท และการเขย่าให้เข้าแบบตามต้องการ

2) ทำให้วัสดุผสมอันได้แก่ หินย่อยหรือกรวดและทรายที่แห้งให้เปียก เพื่อให้ปูนซีเมนต์เกาะยึดโดยรอบและสามารถแข็งตัวได้ อันจะเป็นผลทำให้วัสดุผสมเหล่านี้ยึดติดแน่นเข้าด้วยกัน

3) ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์ ทำให้คุณสมบัติจับตัวเกาะแน่นกับวัสดุผสม อันจะเป็นผลทำให้วัสดุผสมเหล่านี้เกาะตัวเป็นก้อนวัสดุที่แข็งแกร่ง

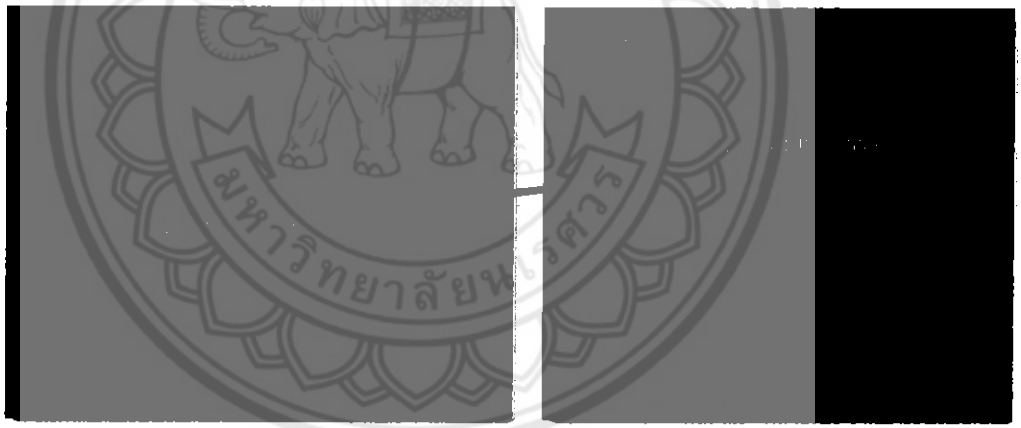
จะเห็นได้ว่า น้ำไม่เพียงแต่จะช่วยให้ส่วนผสมของคอนกรีต มีความข้นเหลวพอดีซึ่งทำให้สะดวกต่อการทำงานเท่านั้น แต่น้ำยังช่วยให้วัสดุผสมยึดแน่นเข้ากัน อันจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง ดังนั้นการเลือกใช้น้ำที่มีคุณภาพดีในปริมาณที่เหมาะสม ก็จะช่วยให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีด้วย

3.1.5 น้ำยาผสมคอนกรีต (Superplasticizer)

จากการทดลองผสมคอนกรีตในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในเบื้องต้น พบว่า คอนกรีตมีความข้นเหลวน้อยมาก ซึ่งสร้างปัญหาต่อการทำงาน หรือการเทลงในแบบหล่อ ดังนั้น จึงทำให้ต้องมีการใช้สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำอย่างแรง ซึ่งสารผสมนี้จะทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในอัตราส่วนผสม น้ำยาผสมคอนกรีต ที่ใช้ในการทดสอบคือ RHEOBUILD 1000 ดังแสดงในรูปที่ 3.7

สำหรับปริมาณสารผสมเพิ่มที่ใช้จะต้องไม่ส่งผลเสียต่อส่วนผสม อันได้แก่ การส่งผลต่อการหน่วงการก่อตัวของคอนกรีต หรือก่อให้เกิดการแยกตัวของส่วนผสม

ปริมาณการใส่สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำอย่างแรงนี้ในแต่ละส่วนผสมจะใส่ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับค่าการยุบตัวของคอนกรีตประมาณ 7.5 - 12.5 เซนติเมตร ซึ่งถ้าค่าการยุบตัวมีค่าอยู่ระหว่างนี้ จะไม่ใส่สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำอย่างแรง ถ้าค่าการยุบตัวมีค่าน้อยกว่า 7.5 เซนติเมตร ต้องทำการผสมคอนกรีตใหม่โดยการใส่สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำอย่างแรงเพื่อให้ค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 7.5 - 12.5 เซนติเมตร เพื่อให้สามารถเทเข้าแบบได้



รูปที่ 3.7 สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำอย่างแรง RHEOBUILD – 1000

3.1.6 เถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าลอย คือ ผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง มีองค์ประกอบคล้ายคลึงซีเมนต์ จัดว่าเป็นปอซโซลานชนิดหนึ่ง (ดังรูปที่3.8)

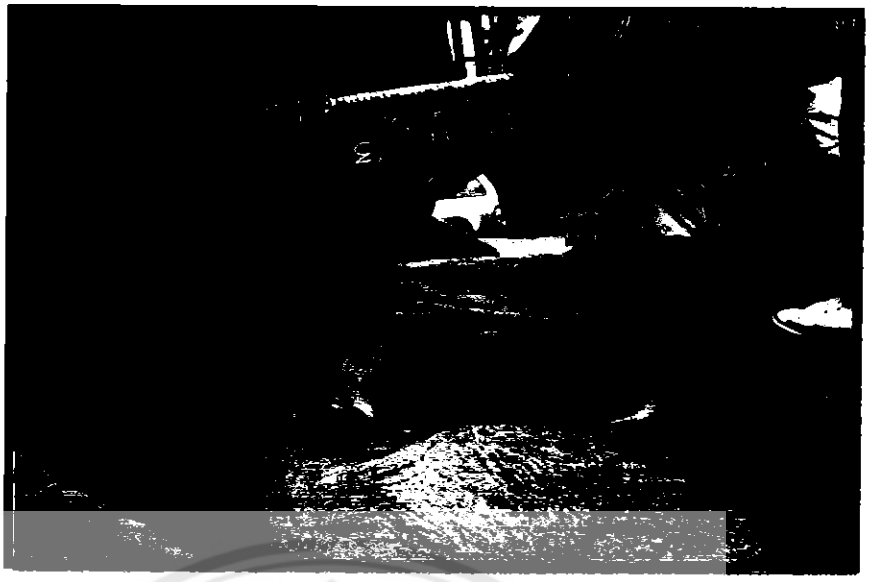
เถ้าลอยที่นำมาทดสอบเป็นเถ้าลอยชนิด C มีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองเนื่องจากมีปริมาณ CaO สูง เถ้าลอยแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเถ้าลอยแคลเซียมสูงโดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง ในปัจจุบันเถ้าลอยแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลงโดยมีสารนี้อยู่ประมาณร้อยละ 10 [18]

ความถ่วงจำเพาะ ของเถ้าลอยสามารถวัดได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C188 [12]

เถ้าลอยที่นำมาใช้ทดสอบในโครงงานนี้ เป็นเถ้าลอยที่นำมาจาก โรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง สามารถหาค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยได้เท่ากับ 2.08 โดยมีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย จากแม่เมาะ จ.ลำปาง [18]

ส่วนประกอบทางเคมี (%)	เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ
SiO_2	39.90
Al_2O_3	18.20
Fe_2O_3	13.60
CaO	17.20
MgO	2.40
SO_3	1.50
Na_2O	1.30
K_2O	2.70
TiO_2	0.34
P_2O_5	0.2
LOI	0.1

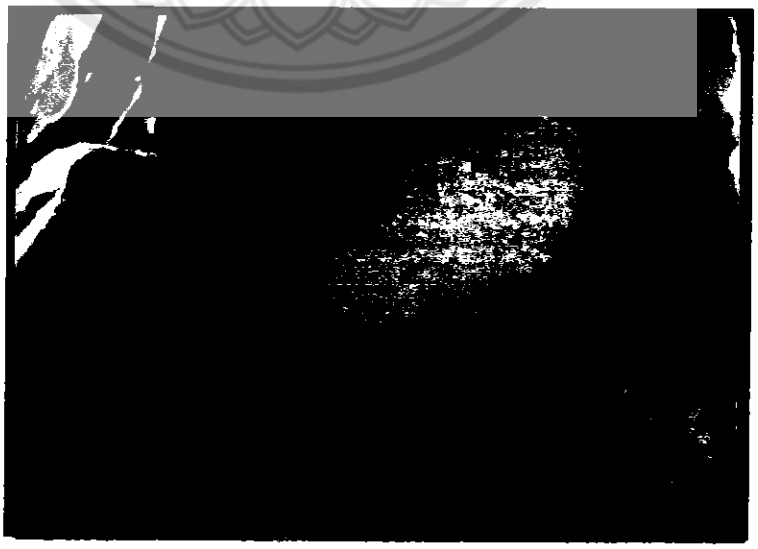


รูปที่ 3.8 เถ้าลอย

3.1.7 ผงหินปูน(Limestone Powder)

ผงหินปูน (Limestone Powder หรือ Calcium Carbonate, $CaCO_3$) ที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้มีขนาด 8 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 3.9

ผงหินปูน ที่นำมาใช้ทดสอบในโครงงานวิศวกรรมเป็นผงหินปูนที่นำมาจาก บริษัท สุรินทร์ ออมย่า เคมิคอล ประเทศไทย ความถ่วงจำเพาะของผงหินปูน หาได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C188 [12] ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยของผงหินปูนละเอียด ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 2.85 (ภาคผนวก ก)

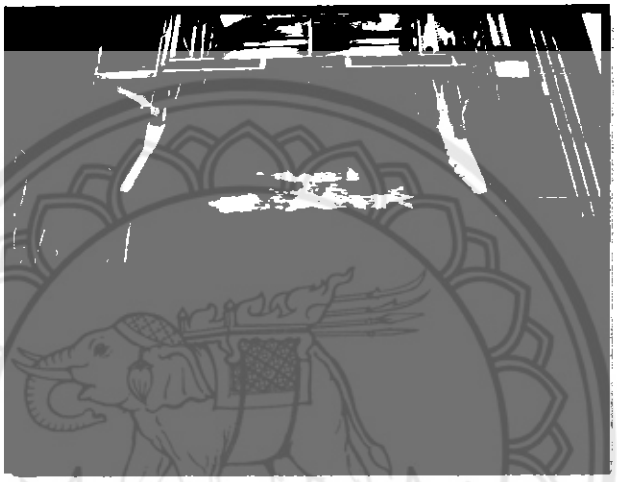


รูปที่ 3.9 ผงหินปูน

3.1.8 เถ้าก้นเตา (Bottom Ash)

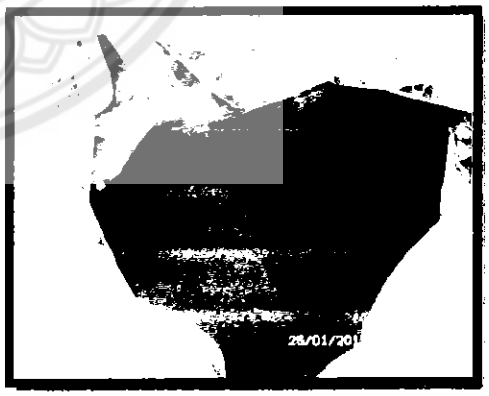
เถ้าก้นเตาที่นำมาทดสอบเป็นเถ้าก้นเตาแม่เมาะจาก จ.ลำปาง ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งมีความชื้น 29.6 ก่อนนำมาผสมคอนกรีตต้องมีการปรับความชื้นให้เท่ากับหรือใกล้เคียงกับความชื้น ดังรูปที่ 3.11 จากแหล่งที่นำมาเสียก่อน และเก็บไว้ในถุงพลาสติกปิดให้มิดชิดป้องกันการสูญเสียความชื้น เถ้าก้นเตาที่นำมาทดสอบปรับความชื้นได้ 29.82 (ภาคผนวก ก)

สูตรทางเคมีของเถ้าก้นเตา = SiO_2 (Amorphous และ Crystalline) + $Al2O_3$ Fe_2O_3 CaO + MgO + TiO



รูปที่ 3.10 เถ้าก้นเตา

ก.การปรับความชื้นเถ้าก้นเตา



ข.การเก็บตัวอย่างไว้ในถุงพลาสติกปิดให้มิดชิด

รูปที่ 3.11 การปรับความชื้น และการเก็บตัวอย่างเถ้าก้นเตา

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบคอนกรีต

ในการเตรียมตัวอย่างการทดสอบคอนกรีต เพื่อทำการผสมคอนกรีต หลังการผสมคอนกรีตเสร็จ โดยจะแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การเตรียมส่วนผสมคอนกรีตแบบมีน้ำยาผสมคอนกรีต และการเตรียมตัวอย่างส่วนผสมคอนกรีตแบบไม่ใส่น้ำยาผสมคอนกรีต

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบคอนกรีตสำหรับทดสอบการหดตัวของคอนกรีตแบบแห้ง

จากตารางที่ 3.2 แสดงสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่างการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

1) เตรียมส่วนผสมในอัตราส่วนที่กำหนด ดังตารางที่ 3.3 และวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีต ดังรูปที่ 3.12 (ก)

ตารางที่ 3.3 แสดงส่วนผสมของคอนกรีตสำหรับ ทดสอบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

ลำดับที่	ส่วนผสม	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	วิธีการบ่ม	จำนวนที่ผสม (ลิตร)	จำนวนก้อนตัวอย่าง (ก้อน)	ค่ายุบตัว (เซนติเมตร)
1	g1.2w55r0	0,7,14	W,C,M,P	46.0	24	10.00
2	g1.4w35r0	0,7,14	W,C,M,P	46.0	24	9.0
3	g1.4w55r0	0,7,14	W,C,M,P	46.0	24	12.5
4	g1.4w80r0	0,7,14	W,C,M,P	46.0	24	12.5
5	g1.4w35r30	0,7,14	W,C	23.0	12	10.5
6	g1.4w55r30	0,7,14	W,C,M,P	46.0	24	12.5
7	g1.4w35r50	0,7,14	W,C	23.0	12	8.0
8	g1.4w35r50	0,7,14	W,C,M,P	46.0	24	12.5
9	g1.4w55LP10	0,7,14	W,C,M,P	46.0	24	12.0
10	g1.4w55LP20	0,7,14	W,C	23.0	12	13.5
11	g1.4w55BA30	0,7,14	W,C,M,P	46.0	24	16.0
12	g1.4w55r20LP10	0,7,14	W,C,M,P	46.0	24	12.0

เรฐ 76236 มร.
ว16741
2554

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงปริมาณวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีตต่อลิตร

ลำดับที่	ส่วนผสม	ปูนซีเมนต์ (kg)	ทราย (kg)	หิน (kg)	FA (kg)	LP (kg)	BA (kg)	น้ำ (kg)	SP (%)
1	g1.2w55r0	14.53	35.04	50.96	-	-	-	7.83	0.75
2	g1.4w35r0	22.18	32.72	47.58	-	-	-	7.52	1.08
3	g1.4w55r0	17.07	32.72	47.58	-	-	-	9.29	-
4	g1.4w80r0	13.25	32.72	47.58	-	-	-	10.50	-
5	g1.4w35r30	7.33	16.36	23.79	2.45	-	-	3.56	0.85
6	g1.4w55r30	11.43	32.72	47.58	4.90	-	-	8.88	-
7	g1.4w35r50	5.05	16.36	23.79	5.05	-	-	3.45	0.65
8	g1.4w55r50	7.93	32.72	47.58	7.93	-	-	8.57	-
9	g1.4w55LP10	15.30	32.72	47.58	-	1.70	-	9.25	-
10	g1.4w55LP20	6.77	16.36	23.79	-	1.69	-	4.61	-
11	g1.4w55BA30	8.53	11.45	23.79	-	-	5.11	4.66	-
12	g1.4w55r20LP10	11.55	22.90	47.58	3.30	1.65	-	9.01	-

หมายเหตุ

g คือ ปริมาณซีเมนต์เพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวม

w คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

r คือ อัตราส่วนเถ้าลอยการแทนที่ซีเมนต์

LP คือ อัตราส่วนผงหินปูนการแทนที่ซีเมนต์

BA คือ อัตราส่วนเถ้าก้นเตาการแทนที่มวลรวมละเอียด

SP คือ ปริมาณน้ำยาผสมเพิ่ม

W คือ การบ่มด้วยน้ำสะอาด

M คือ การบ่มด้วยด้วยกระสอบเปียก

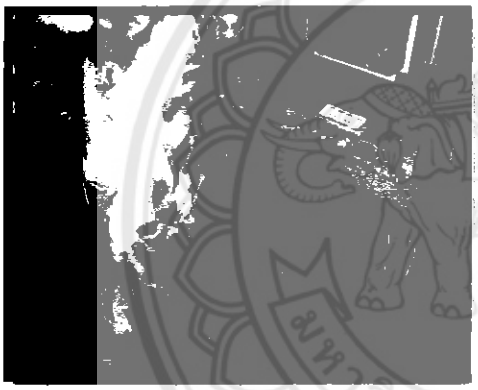
P คือ การบ่มด้วยพลาสติก

C คือ การบ่มด้วยน้ำยาบ่มคอนกรีต

การหาค่าการหดตัวของคอนกรีตทำ 252 ก้อน

ก.การเตรียมวัสดุผสม

ข. การเคลือบเครื่องผสมคอนกรีต



ค.การผสมแห้ง

ง. การผสมทรายกับเถ้าก้นเตา

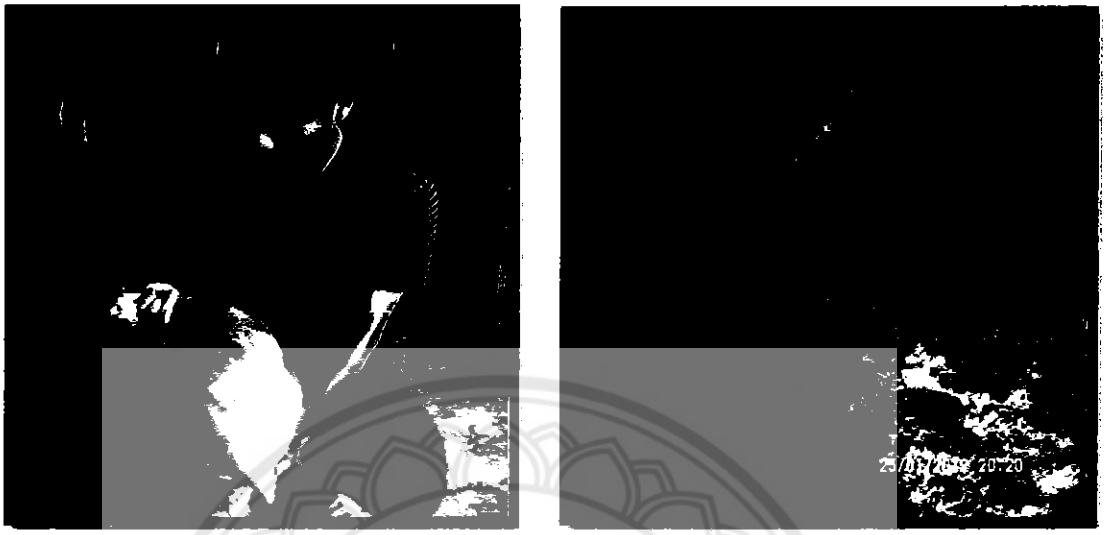
รูปที่ 3.12 การผสมคอนกรีต

2) ทำการเคลือบเครื่องผสม คอนกรีตด้วยซีเมนต์เพสต์ ตามส่วนผสมที่คำนวณไว้ ดังรูปที่ 3.12 (ข)

3) นำมวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบใส่ลงในเครื่องผสมคอนกรีตชนิดราบ จากนั้นนำปูนซีเมนต์ที่เตรียมไว้ค่อยๆ ใส่ลงไปในเครื่องผสมตามลำดับ และทำการผสมแห้งประมาณ 2 นาที ดังรูปที่ 3.12 (ค)

- ส่วนผสมที่มีเถ้าก้นเตา ต้องนำมาผสมให้เข้ากับมวลรวมละเอียด ก่อนที่จะใส่ลงในเครื่องผสมคอนกรีต ดังรูปที่ 3.12 (ง)

- ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย หรือผงหินปูน ต้องน้ำเถ้าลอย หรือผงหินปูน ผสมให้เข้ากับปูนซีเมนต์ก่อน ก่อนที่จะใส่ลงในเครื่องผสมคอนกรีต ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การผสมเถ้าลอย หรือผงหินปูนให้เข้ากับปูนซีเมนต์

4) การใส่น้ำลงในเครื่องผสมคอนกรีตชนิดราบเพื่อทำการผสมเปียกมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

- ส่วนผสมที่มีการใส่น้ำยาผสมคอนกรีต

นำน้ำที่เตรียมไว้ค่อยๆ ใส่ลงไปในเครื่องผสมโดยการแบ่งน้ำออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ส่วนแรกเป็นน้ำ และส่วนที่สองเป็นน้ำผสมน้ำยาผสมคอนกรีต ซึ่งการใส่น้ำหรือน้ำผสมน้ำยาผสมคอนกรีต จะต้องพยายามใส่ให้น้ำกระจายให้ทั่วในวัสดุผสม และทำการผสมเปียกประมาณ 2 - 3 นาที

- ส่วนผสมที่ไม่ใส่น้ำยาผสมคอนกรีต

นำน้ำที่เตรียมไว้ค่อยๆ ใส่ลงไปในเครื่องผสมโดยการแบ่งน้ำออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ซึ่งการใส่น้ำ จะต้องพยายามใส่ให้น้ำกระจายให้ทั่วในวัสดุผสม และทำการผสมเปียกประมาณ 2-3 นาที

5) เมื่อทำการผสมคอนกรีตเสร็จแล้ว นำเอาคอนกรีตสดมาทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test) รูปที่ 3.14 ตามมาตรฐาน ASTM C 143 [19]

รูปที่ 3.14 การทดสอบหาค่าการยุบตัว

ก. แบบหล่อคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยม ข. เหล็กวัดหัวน็อตความยาว 25 เซนติเมตร

รูปที่ 3.15 แบบหล่อคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยม ขนาด (7.5 x7.5 x 28.5 เซนติเมตร)

6) เทคอนกรีตลงในแบบหล่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 3.15 (ก) แล้วนำไปวางบนเครื่องสั่นคอนกรีต เพื่อไล่ฟองอากาศ ดังรูปที่ 3.16 ทำการสั่นประมาณ 10 วินาที แล้วนำไปเก็บในที่ร่มที่จัดเตรียมไว้ และปิดบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ดังรูปที่ 3.17

รูปที่ 3.16 การสั่นคอนกรีต

รูปที่ 3.17 การปิดหน้าผิวคอนกรีต

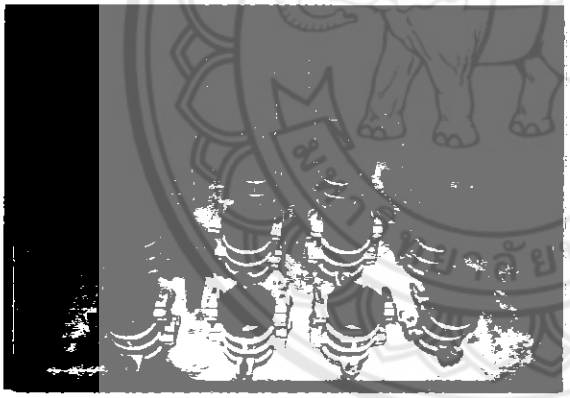
7) เมื่อครบ 24 ชั่วโมง แกะคอนกรีตออกจากแบบเพื่อทำการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตแบบแห้งแล้วนำไปบ่มด้วยน้ำ บ่มกระสอบ บ่มพลาสติก และบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต

8) ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 – 7 จนครบ ตามอัตราส่วนผสมการทดสอบคอนกรีตสำหรับการการหดตัวของคอนกรีตแบบแห้ง ของคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 3.3

3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

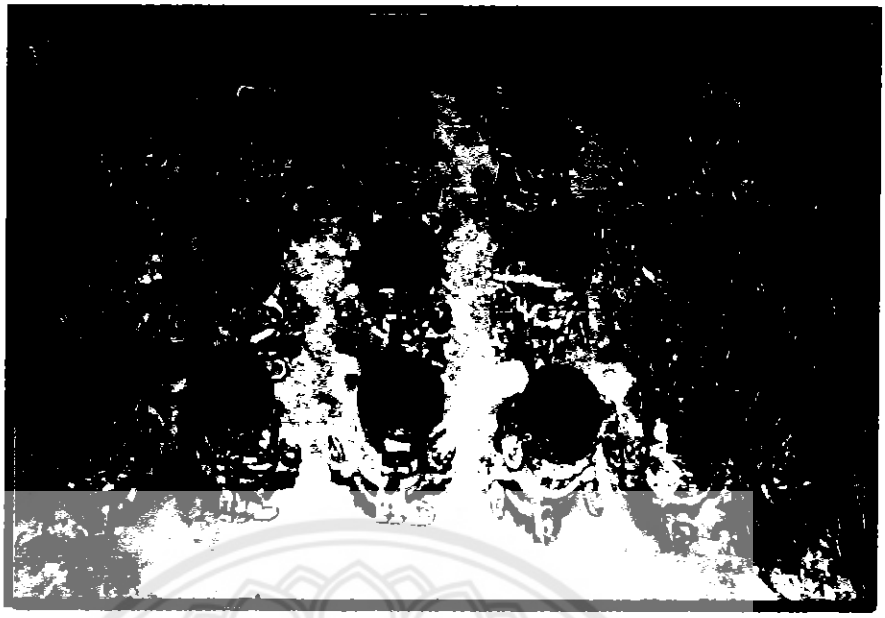
1) การเตรียมตัวอย่างการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ทำการเตรียมตัวอย่างการทดสอบคอนกรีตเช่นเดียวกับการทดสอบคอนกรีตแบบแห้งตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-5 ดังแสดงในตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ สำหรับเตรียมตัวอย่างการทดสอบกำลัง

2) เทคอนกรีตลงในแบบทรงกระบอกมาตรฐานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และความสูง 20 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.18 แล้วนำไปวางบนเครื่องสั่นคอนกรีต เพื่อไล่ฟองอากาศ ดังรูปที่ 3.19 ทำการสั่นประมาณ 10 -15 วินาที แล้วนำไปเก็บในที่ร่มที่จัดเตรียมไว้ และปิดบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.18 แบบทรงกระบอกมาตรฐานขนาด10 x 20 ซม.

รูปที่ 3.19 การสั่นคอนกรีต



รูปที่ 3.20 การปิดผิวหน้าด้วยพลาสติก

3) เมื่อครบ 24 ชั่วโมง แกะคอนกรีตออกจากแบบ แล้วนำไปบ่มน้ำ บ่มกระสอบ บ่มพลาสติก และบ่มน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตบ่มคอนกรีต เพื่อทดสอบกำลังอัด

4) ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 – 3 จนครบตามอัตราส่วนผสมการทดสอบคอนกรีตสำหรับการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงส่วนผสมคอนกรีตสำหรับการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ลำดับที่	ส่วนผสม	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	วิธีการบ่ม	จำนวนที่ผสม (ลิตร)	จำนวนก้อนตัวอย่าง (ก้อน)	ค่าการยุบตัว (ซม.)
1	g1.2w55r0	0,7,14,28	W,C,M,P	80.0	39	10.00
2	g1.4w35r0	0,7,14,28	W,C,M,P	80.0	39	9.0
3	g1.4w55r0	0,7,14,28	W,C,M,P	80.0	39	12.5
4	g1.4w80r0	0,7,14,28	W,C,M,P	80.0	39	12.5
5	g1.4w35r30	0,7,14,28	W,C	41.0	21	10.5
6	g1.4w55r30	0,7,14,28	W,C,M,P	80.0	39	12.5
7	g1.4w35r50	0,7,14,28	W,C	41.0	21	8.0
8	g1.4w35r50	0,7,14,28	W,C,M,P	80.0	39	12.5
9	g1.4w55LP10	0,7,14,28	W,C,M,P	80.0	39	12.0
10	g1.4w55LP20	0,7,14,28	W,C	41.0	21	13.5
11	g1.4w55BA30	0,7,14,28	W,C,M,P	80.0	39	16.0
12	g1.4w55r20LP10	0,7,14,28	W,C,M,P	80.0	39	12.0

ตารางที่ 3.6 ตารางแสดงปริมาณวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีตต่อลิตร

ลำดับที่	สัดส่วน	ปูนซีเมนต์ (kg)	ทราย (kg)	หิน (kg)	FA (kg)	LP (kg)	BA (kg)	น้ำ (kg)	SP (%)
1	g1.2w55r0	14.53	35.04	50.96	-	-	-	7.83	0.75
2	g1.4w35r0	22.18	32.72	47.58	-	-	-	7.52	1.08
3	g1.4w55r0	17.07	32.72	47.58	-	-	-	9.29	-
4	g1.4w80r0	13.25	32.72	47.58	-	-	-	10.50	-
5	g1.4w35r30	7.33	16.36	23.79	2.45	-	-	3.56	0.85
6	g1.4w55r30	11.43	32.72	47.58	4.90	-	-	8.88	-
7	g1.4w35r50	5.05	16.36	23.79	5.05	-	-	3.45	0.65
8	g1.4w55r50	7.93	32.72	47.58	7.93	-	-	8.57	-
9	g1.4w55LP10	15.30	32.72	47.58	-	1.70	-	9.25	-
10	g1.4w55LP20	6.77	16.36	23.79	-	1.69	-	4.61	-
11	g1.4w55BA30	8.53	11.45	23.79	-	-	5.11	4.66	-
12	g1.4w55r20LP10	11.55	22.90	47.58	3.30	1.65	-	9.01	-

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ทดสอบ 414 ก้อน

3.3 การบ่มคอนกรีต

การบ่มคอนกรีต เป็นการป้องกันการสูญเสียน้ำของคอนกรีตเนื่องจากการระเหยของน้ำออกจากคอนกรีต เมื่อน้ำดังกล่าวระเหยออกจากตัวคอนกรีตจะทำให้เกิดช่องว่างภายในขึ้นและส่งผลให้การรับกำลังลดลงหรือมีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต ดังนั้นจึงต้องมีการบ่มคอนกรีตเพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง [20] ซึ่งการบ่มคอนกรีตในปัจจุบันมีการบ่มหลายลักษณะในโครงงานนี้ศึกษาการบ่มคอนกรีต ได้แก่ การบ่มน้ำ การบ่มกระสอบเปียก การบ่มด้วยพลาสติก และการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตโดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การบ่มด้วยน้ำ โดยนำก้อนคอนกรีตบ่มไว้ในถังพลาสติก โดยให้น้ำท่วมก้อนคอนกรีต ดังรูที่ 3.21

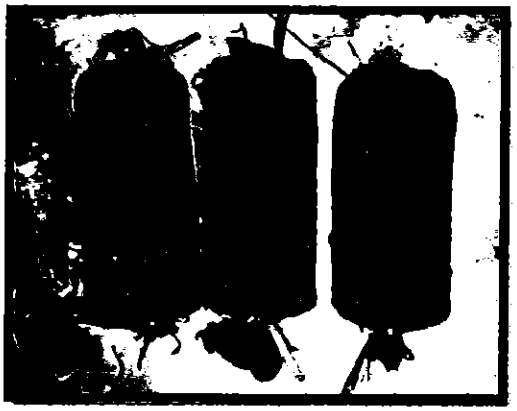
- การทดสอบการหดตัวแบบแห้งบ่มจนครบ 7 วันและ 14 วัน แล้วก็เก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ

- การทดสอบกำลังอัด บ่มคอนกรีตจนครบอายุการบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน แล้วจึงนำขึ้นจากน้ำ ใช้อย่างละ3 ก้อน แล้วทดสอบกำลังอัดที่อายุคอนกรีต 28 วัน

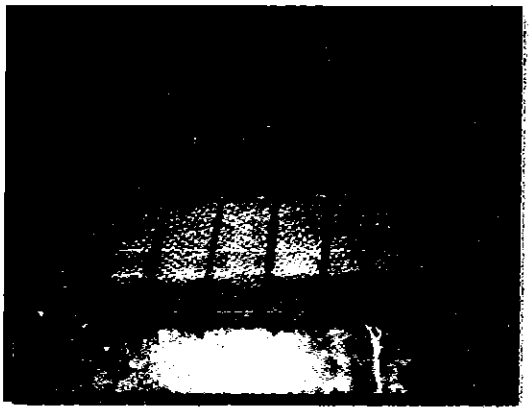
ก.การบ่มเพื่อทดสอบกำลังอัด ข.การบ่มเพื่อทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

รูปที่ 3.21 การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำ

2) การบ่มโดยใช้กระสอบในการบ่ม โดยนำกระสอบมาตัดแล้วคลุมให้ทั่วก้อนคอนกรีต คลุมด้วยกระสอบชั้นเดียวฉีดน้ำให้ทั่ว โดยกระสอบชื้นอยู่ตอลอดเวลา ดังรูปที่ 3.22 แล้วเก็บไว้ในถังพลาสติก ระยะเวลาการบ่มเหมือนกับข้อ 1



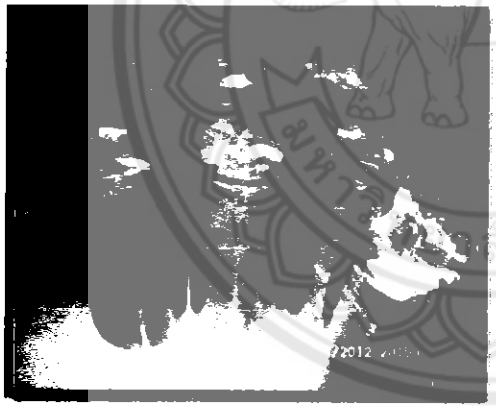
ก.การบ่มเพื่อทดสอบกำลังอัด



ข.การบ่มเพื่อทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

รูปที่ 3.22 การบ่มคอนกรีตด้วย กระสอบ

3) การบ่มด้วยพลาสติก โดยนำพลาสติกคลุมอาหารมาบ่ม โดยพันรอบๆก้อนคอนกรีต 4 ชั้น หรือตามความเหมาะสมเพื่อให้แน่ใจว่าน้ำไม่สามารถระเหยออกจากก้อนคอนกรีตได้ ดังรูปที่ 3.23

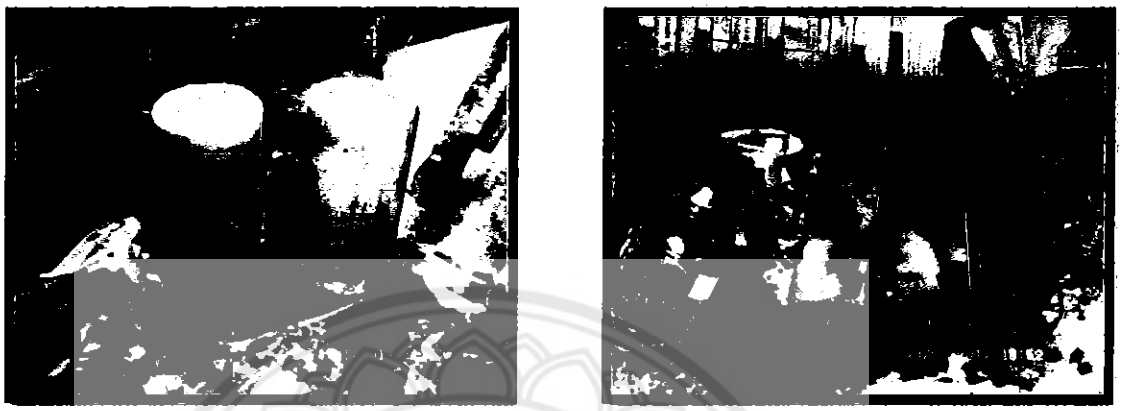


ก.การบ่มเพื่อทดสอบกำลังอัด

ข.การบ่มเพื่อทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

รูปที่ 3.23 การบ่มคอนกรีตด้วยพลาสติก

4) การบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต โดยการฉีดน้ำยาบ่มคอนกรีตให้ทั่วทุกด้านของก้อนคอนกรีต อย่างสม่ำเสมอ รอบเดียว ดังรูปที่ 3.24



ก.การบ่มเพื่อทดสอบกำลังอัด ข.การบ่มเพื่อทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

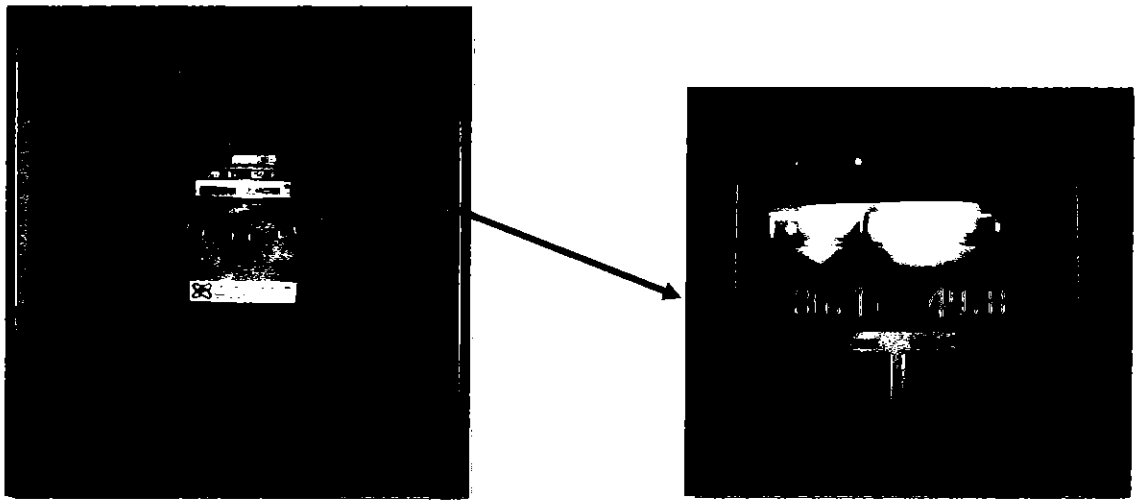
รูปที่ 3.24 การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต

3.4 ขั้นตอนการทดสอบคอนกรีต

3.4.1) การวัดค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

การหาค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตสามารถแบ่งตามระยะเวลาการบ่มออกเป็น 7 วัน และ 14 วัน ซึ่งหลังจากถอดแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตแล้ว นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มด้วยน้ำ กระสอบ พลาสติก น้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต และที่ไม่ได้บ่ม จากนั้นทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาว และการสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีต เมื่อบ่มครบ 7 วัน และ14 วัน ก็นำตัวอย่างคอนกรีตไปวางบนชั้นวาง และวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวไปเรื่อยๆ ตามอายุของคอนกรีต โดยก้อนตัวอย่างนั้นถูกเก็บไว้ในอุณหภูมิห้อง 29 $\pm$ 1 °C ประมาณ 1- 2 สัปดาห์ หลังจากนั้นก็ย้ายเข้าไปที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ 35 $\pm$ 1 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 $\pm$ 5% โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) จดบันทึกค่าอุณหภูมิห้อง และความชื้นสัมพัทธ์ทุกครั้ง ก่อนทดสอบก้อนตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 การจดบันทึกค่าอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ของห้องควบคุมอุณหภูมิ

รูปที่ 3.26 ตั้งค่าแท่งเหล็ก Zet zero

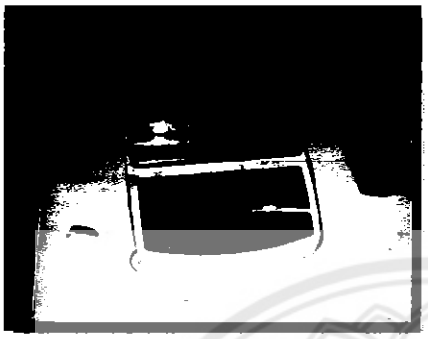
รูปที่ 3.27 วัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาว คอนกรีต

2) ทำการวัดแท่งเหล็กอ้างอิง (Reference Bar) ของเครื่องมือที่ใช้พิจารณาความยาวที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่าง (Length Comparator) แล้วจดบันทึกค่าความยาวอ้างอิงเริ่มต้น (รูปที่ 3.26)

3) นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตขึ้นจากน้ำ (ใช้ผ้าแห้งเช็ดก้อนตัวอย่างคอนกรีตให้อยู่ในรูปสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง) คอนกรีตที่บ่มด้วยกระสอบก็เอากระสอบออก ใช้ผ้าเช็ดเช่นเดียวกับการบ่มด้วยน้ำ จากนั้นนำก้อนคอนกรีตไปวัดการเปลี่ยนแปลงความยาว โดยใช้เครื่องวัดความเปลี่ยนแปลงความยาว (Length Comparator) จดบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของก้อนตัวอย่างคอนกรีต ดังรูปที่ 3.27 จากนั้นก็นำไปบ่มเช่นเดิม รอจนกว่าจะบ่มครบ 7 วัน และ 14 วัน สำหรับก้อนตัวอย่างที่บ่มด้วยพลาสติกก็เจาะรูตรงบริเวณหัวน็อตเล็กน้อย โดยไม่ต้องแกะพลาสติก

ออก แล้วค่อยวัดการเปลี่ยนแปลงความยาว รอจนกว่าบ่มครบ 7 วัน และ 14 วัน ค่อยแกะพลาสติกออก ส่วนก้อนตัวอย่างที่บ่มด้วยน้ำยาบ่มคอนกรีต และคอนกรีตที่ไม่ได้บ่ม นำมาวัดหาค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวได้ทันที

4) นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปชั่งน้ำหนัก แล้วจดบันทึกค่า ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่าง

รูปที่ 3.29 ตำแหน่งที่เก็บก้อน**ตัวอย่างคอนกรีต**

5) นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มน้ำ บ่มกระสอบ บ่มพลาสติก และ น้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต และทำการวัดค่าต่อไปจนครบตามระยะเวลาที่กำหนด

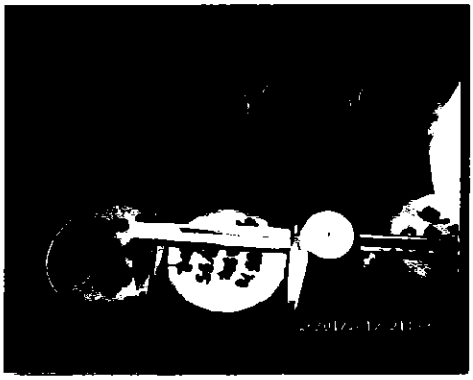
6) ทำการวัดค่าต่างๆ ตามข้อที่ 1- 5 ตามลำดับไปเรื่อยๆจนครบ**จำนวนตัวอย่างการทดสอบ**คอนกรีต

หมายเหตุ :ในกรณีที่บ่มก้อนคอนกรีตในน้ำ หลังจากถอดแบบคอนกรีต**จะ**ทำการบ่มก้อน**ตัวอย่าง**คอนกรีตไว้ในน้ำ 30 นาที ก่อนทำการวัดค่าการหดตัวแบบแห้งของคอน**กรีต**

3.4.2) การทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก บ่มครบ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน แล้วรอให้อายุคอนกรีตครบ 28 วัน จากนั้นจะนำไปทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 39

1) การบ่มด้วยน้ำ บ่มกระสอบ และ บ่มพลาสติกซึ่งจะบ่มคอนกรีต ที่ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน อย่างละ 3 ก้อน เมื่ออายุของคอนกรีตครบ 28วัน ก็นำก้อนคอนกรีตไปละวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ดังรูปที่ 3.30 ความสูง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก รูปที่ 3.31 จากนั้นนำไปทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องอัดคอนกรีต รูปที่ 3.35- รูปที่ 3.36



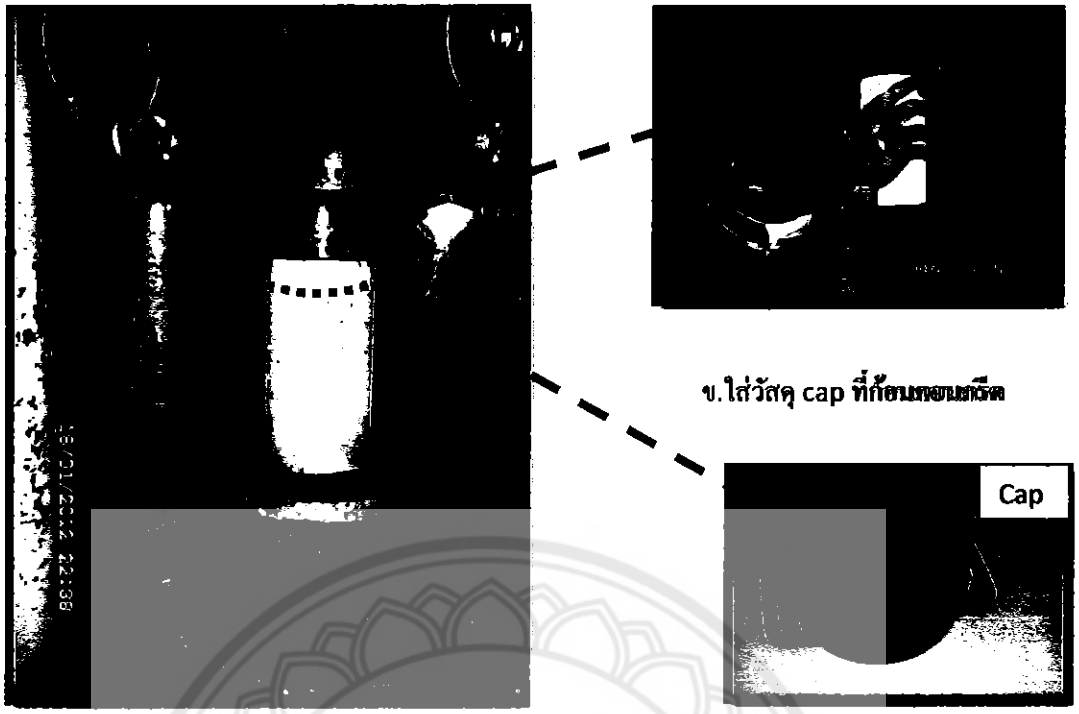
รูปที่ 3.30 การวัดความสูง และเส้นผ่าศูนย์กลาง

รูปที่ 3.31 ชั่งน้ำหนัก

2) การบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต ในแต่ละส่วนผสมในตารางที่ 3.5 จะมีก้อนคอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต จำนวน 9 ก้อน บ่มที่อายุ 7 วัน 14 วัน และบ่ม 28 วัน อย่างละ 3 ก้อน ซึ่งการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตจะแตกต่างจากการบ่มด้วยวิธีอื่นๆ ซึ่งจะนำไปทดสอบกำลังอัด ที่ อายุ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ตามระยะเวลาของการบ่มคอนกรีต ขั้นตอนทดสอบกำลังอัดเหมือนขั้นตอนที่ 1

3) สำหรับก้อนคอนกรีตที่ไม่ได้บ่ม ในแต่ละส่วนผสมในตารางที่ 3.5 จะมีก้อน 3 ก้อน ซึ่งรอให้อายุครบ 28 วัน จากนั้นก็จะนำไปทดสอบกำลังอัด ขั้นตอนทดสอบกำลังอัดเหมือนขั้นตอนที่ 1

รูปที่ 3.32 เครื่องทดสอบ กำลังอัดขอคอนกรีต



ข.ใส่วัสดุ cap ที่ก้อนตัวอย่างคอนกรีต

ก.การวางก้อนตัวอย่างอยู่ตรงกึ่งกลาง ค.วัสดุ cap

รูปที่ 3.33 การทดสอบกำลังอัด และการเตรียมก้อนตัวอย่างที่ถูกต้องก่อนเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัด

หมายเหตุ น้ำหนักที่กดควรถ่ายอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง จึงจะให้กำลังอัดที่ถูกต้อง ดังรูปที่ 3.33 จะเกิดได้ดังนี้ [21]

- ก้อนตัวอย่างต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลางและแกนของก้อนตัวอย่างอยู่ในแนวดิ่ง
- แผ่นรองกดต้องอยู่ในแนวตั้งฉากกับแกนของก้อนตัวอย่าง
- แผ่นรองกดต้องเคลื่อนตัวได้เล็กน้อย
- แผ่นรองกดจะต้องเรียบเป็นระนาบ
- ถ้าต้องใช้วัสดุ Cap ก้อนตัวอย่าง ควรจะเลือกวัสดุที่มีกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกับของคอนกรีต

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบที่เกิดจากการบ่มคอนกรีต 2 ส่วน คือ ผลการทดสอบกำลังอัด และผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต ซึ่งมีสัดส่วนผสมของคอนกรีตแตกต่างกันออกไป โดยเปรียบเทียบผลของการบ่มคอนกรีต สามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธี ได้แก่ การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำ การบ่มคอนกรีตด้วยกระสอบ การบ่มคอนกรีตด้วยพลาสติก และการบ่มคอนกรีตน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต รวมทั้งคอนกรีตที่ไม่ได้บ่ม ซึ่งมีผลต่อกำลังอัด และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน และการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา ซึ่งมีผลการทดสอบดังนี้

4.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

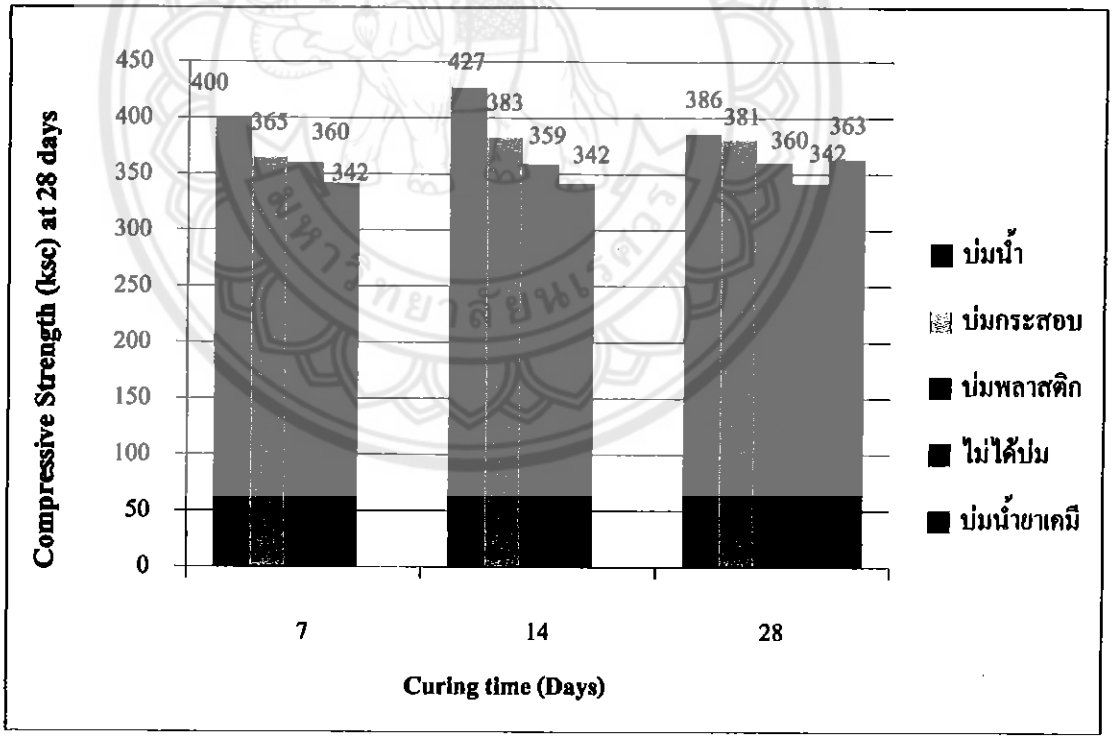
4.1.1 ผลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต

ซึ่งในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต ตามสัดส่วนผสมคอนกรีตที่แตกต่างกันออกไป ตามปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน และการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา ซึ่งแสดงเป็นกราฟแท่งเพื่อเปรียบเทียบผลของการบ่มคอนกรีตแต่ละวิธีตามระยะเวลาการบ่ม

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลกำลังอัดของคอนกรีต

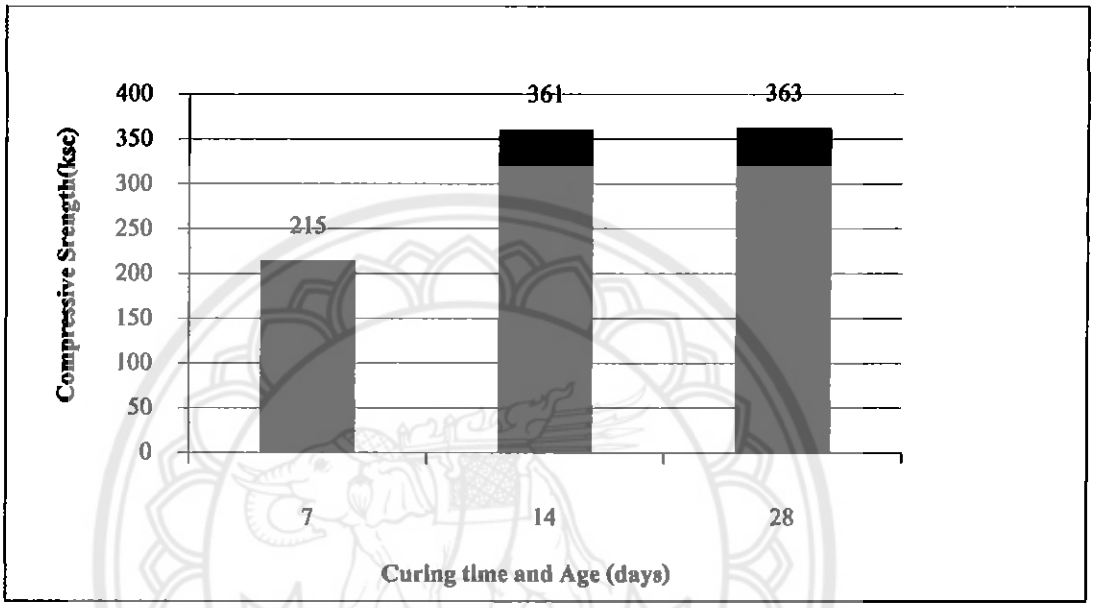
ลำดับที่	สัดส่วน	กำลังอัดที่ 28 วัน (ksc)										กำลังอัดที่อายุที่อายุต่างๆ		
		บ่มน้ำ (วัน)			บ่มกระสอบ (วัน)			บ่มพลาสติก (วัน)			ไม่บ่ม (วัน)	บ่มน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต (วัน)		
		7	14	28	7	14	28	7	14	28	28	7	14	28
1	g1.2W55r0	400	427	386	365	383	381	360	359	360	342	215	361	363
2	g1.4w35r0	572	580	605	564	582	599	526	559	570	505	510	516	539
3	g1.4w55r0	371	378	359	336	349	347	299	329	338	296	301	305	331
4	g1.4w80r0	150	163	156	143	156	152	129	136	134	106	104	115	116
5	g1.4w35r30	560	587	593	-	-	-	-	-	-	508	458	471	526
6	g1.4w55r30	304	338	342	307	316	318	273	279	297	275	190	225	277
7	g1.4w35r50	464	543	564	-	-	-	-	-	-	437	361	413	449
8	g1.4w55r50	251	275	277	245	267	263	225	233	249	206	154	207	208
9	g1.4w55LP10	338	384	381	312	345	341	303	315	334	295	281	316	318
10	g1.4w55LP20	310	323	334	-	-	-	-	-	-	266	248	262	291
11	g1.4w55BA30	400	446	337	378	401	386	234	231	267	218	222	224	225
12	g1.4w55r20LP10	318	342	389	266	308	334	261	287	294	268	238	265	270

จากรูปที่ 4.1 เป็นส่วนผสมที่มีปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม 1.2 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 จะเห็นได้ว่าการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำ กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่า การบ่มด้วยกระสอบ พลาสติก และน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต การบ่มคอนกรีตแต่ละวิธี ค่ากำลังอัดของคอนกรีตจะพัฒนาตามระยะเวลาการบ่มคอนกรีต ยกตัวอย่างการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำพบว่า บ่ม 7 วัน กำลังอัดเท่ากับ 400 ksc บ่ม 14 วัน กำลังอัดเท่ากับ 427 ksc แต่การบ่มคอนกรีตที่ 28 วัน กำลังอัดเท่ากับ 386 ksc กำลังอัดต่ำกว่าการบ่ม 7 วัน และ 14 วัน เนื่องจากแนวโน้มเกิดจากความชื้นในก้อนตัวอย่างคอนกรีตขณะทำการทดสอบกำลังอัด ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง และมีค่ากำลังอัดน้อยกว่าการเตรียมก้อนตัวอย่างที่แห้ง เช่น ระยะเวลาการบ่มคอนกรีตที่ 7 วัน และ14 วัน ต้องรอทำการทดสอบอีก 21 วัน และ 14 วัน ตามลำดับ เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ทำให้ก้อนตัวอย่างแห้งและมีกำลังรับแรงอัดจะสูงกว่าการบ่มที่ 28 วัน ซึ่งไม่ได้เตรียมก้อนตัวอย่างให้แห้ง ดังนั้นความชื้นในตัวคอนกรีตซึ่งเป็นอีกเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต [20]



รูปที่ 4.1 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อ ปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.2 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

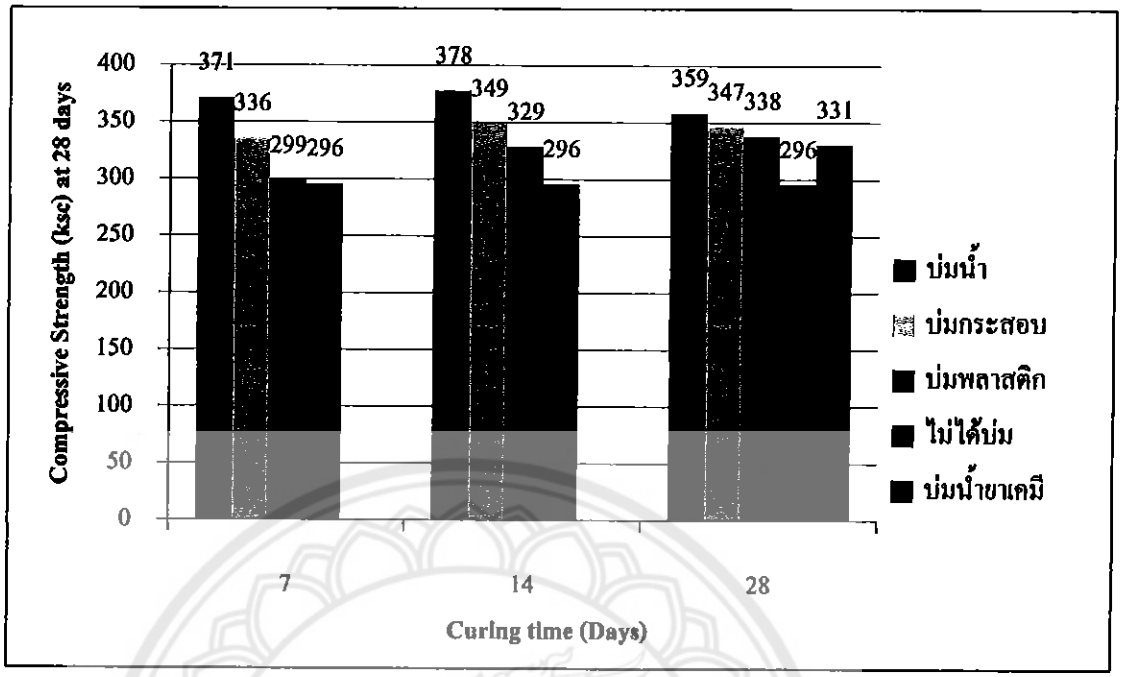
จากรูปที่ 4.2 การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตซึ่งจะแตกต่างจากการบ่มด้วยวิธีอื่นๆ เนื่องจากจะทดสอบกำลังอัด และระยะเวลาการบ่มในวันเดียวกัน ที่อายุ 7 วัน กำลังอัดเท่ากับ 215 ksc อายุ 14 วัน กำลังอัดเท่ากับ 361 ksc และอายุ 28 วันกำลังอัดเท่ากับ 363 ksc จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีต จะพัฒนาตามอายุและระยะเวลาการบ่มคอนกรีต ที่อายุคอนกรีต 7วัน 14วัน กำลังอัดจะพัฒนาได้ดี



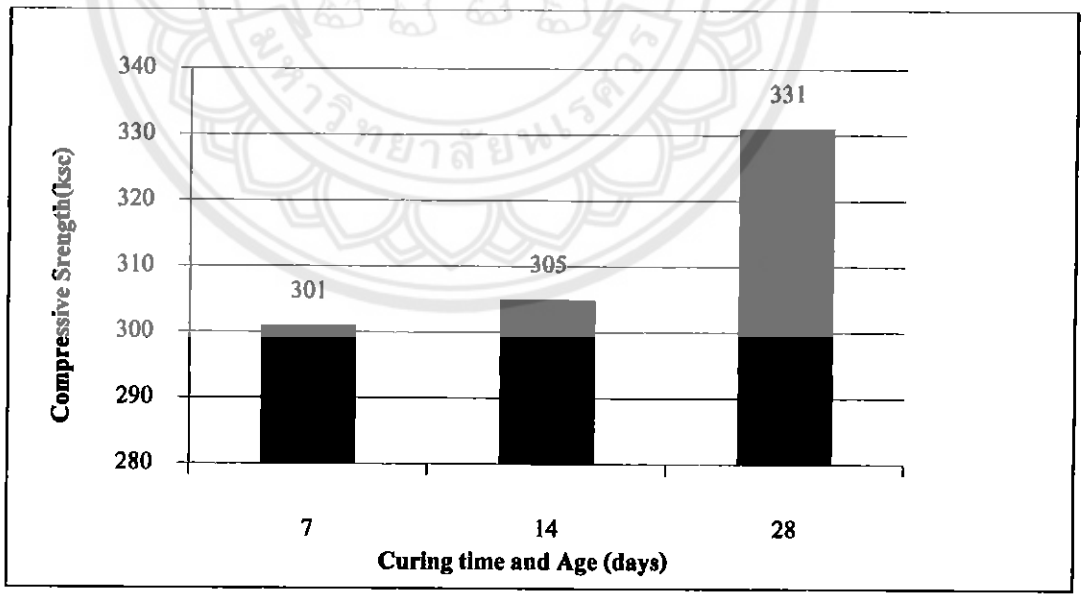
รูปที่ 4.2 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.2 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

จากรูปที่ 4.3 อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 การบ่มคอนกรีตด้วยวิธีต่างๆมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ คอนกรีตที่บ่ม 7 วัน กำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตที่บ่ม 14 วัน และ 28 วัน ยกเว้นคอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำและกระสอบ ซึ่งกำลังอัดที่บ่ม 28 วัน กำลังอัดต่ำว่าการบ่ม 14 วัน ซึ่งมีแนวโน้มของกำลังอัดที่ลดลง ผลจากความชื้นในตัวคอนกรีตซึ่งได้อธิบายข้างต้นที่ไว้แล้ว คอนกรีตที่ไม่ได้บ่มนั้น กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่บ่มด้วยวิธีต่างๆ จะเห็นได้อย่างชัดเจน และการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำ กำลังอัดสูงสุด รองลงมาคือการบ่มคอนกรีตด้วยกระสอบ พลาสติก และน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.4 การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต ซึ่งแตกต่างจากการบ่มคอนกรีตด้วยวิธีอื่นๆ ที่ได้กล่าวไว้แล้ว กำลังอัดของคอนกรีตจะพัฒนาตามอายุ และระยะเวลาบ่มคอนกรีต จากกราฟจะเห็นได้ว่า อายุคอนกรีต 7 วัน กำลังอัดเท่ากับ 301 ksc อายุคอนกรีต 14 วัน กำลังอัดเท่ากับ 305 ksc และอายุคอนกรีต 28 วัน กำลังอัดเท่ากับ 331 ks



รูปที่ 4.3 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อ ปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

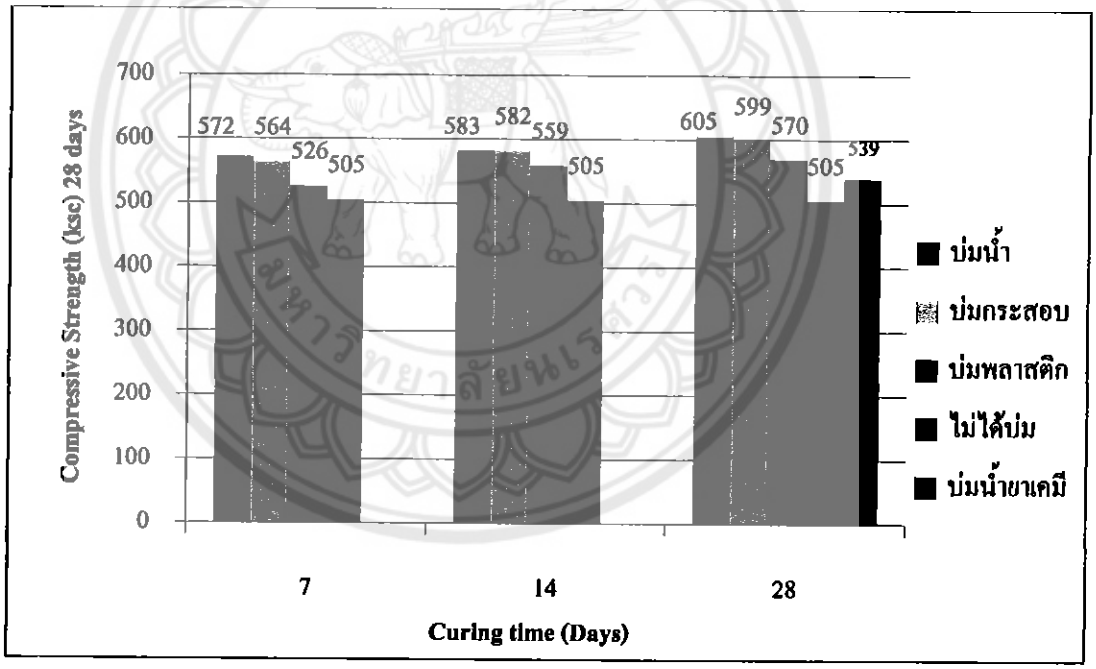


รูปที่ 4.4 ผลของการบ่มด้วยน้ำขาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5

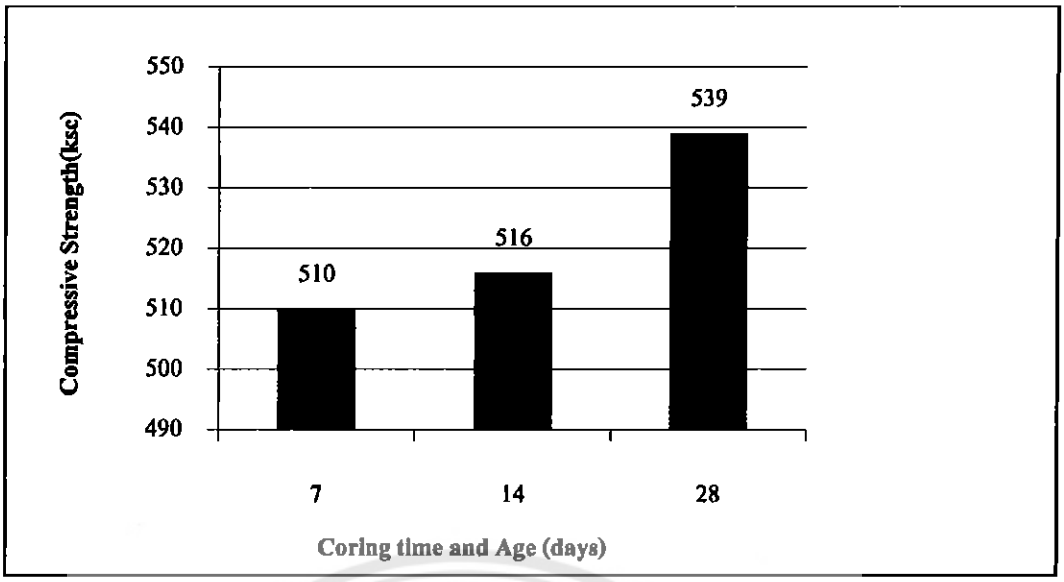
จากรูปที่ 4.5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตสูง เมื่อนำมาทดสอบ

กำลังอัดก้อนตัวอย่างเกิดการระเบิด ลักษณะการแตกของก้อนคอนกรีตนั้นรอยแตกจะผ่าตัวเพสต์และหินจำนวนมาก ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งแตกต่างจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ความเสียหายรอยแตกส่วนใหญ่จะผ่านตัวเพสต์ ผลของการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำและกระสอบ กำลังอัดสูงกว่า การบ่มด้วยพลาสติก และน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต คอนกรีตที่ไม่ได้บ่มกำลังอัดค่าต่ำที่สุด เช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว จากกราฟ การบ่ม 14 วันมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับการบ่ม 28 วัน ยกตัวอย่าง การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำ บ่มที่ 14 วัน เมื่อนำมาทดสอบ กำลังอัดเท่ากับ 583 ksc บ่มที่ 28 วัน กำลังอัดเท่ากับ 605 ksc บ่มที่14 วัน เมื่อเมื่อเทียบกับบ่มที่ 28 วัน แล้ว กำลังอัดเป็น 96% และบ่มที่ 7 วันกำลังอัดเป็น 94% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก เป็นสัดส่วนที่ความหนาแน่นมาก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 น้ำสามารถซึมผ่านได้น้อย การบ่มด้วยวิธีต่างๆค่ากำลังอัดจึงมีค่าไม่ต่างกันมาก ซึ่งการพัฒนากำลังอัดช่วงการบ่มคอนกรีตที่ 7 วัน ถึง 28 วัน มีค่าของกำลังอัดต่างกันไม่มาก

จากรูปที่ 4.6 การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตกำลังอัดคอนกรีตจะพัฒนาตามอายุของคอนกรีต กำลังอัดดูได้จากกราฟ



รูปที่ 4.5 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4

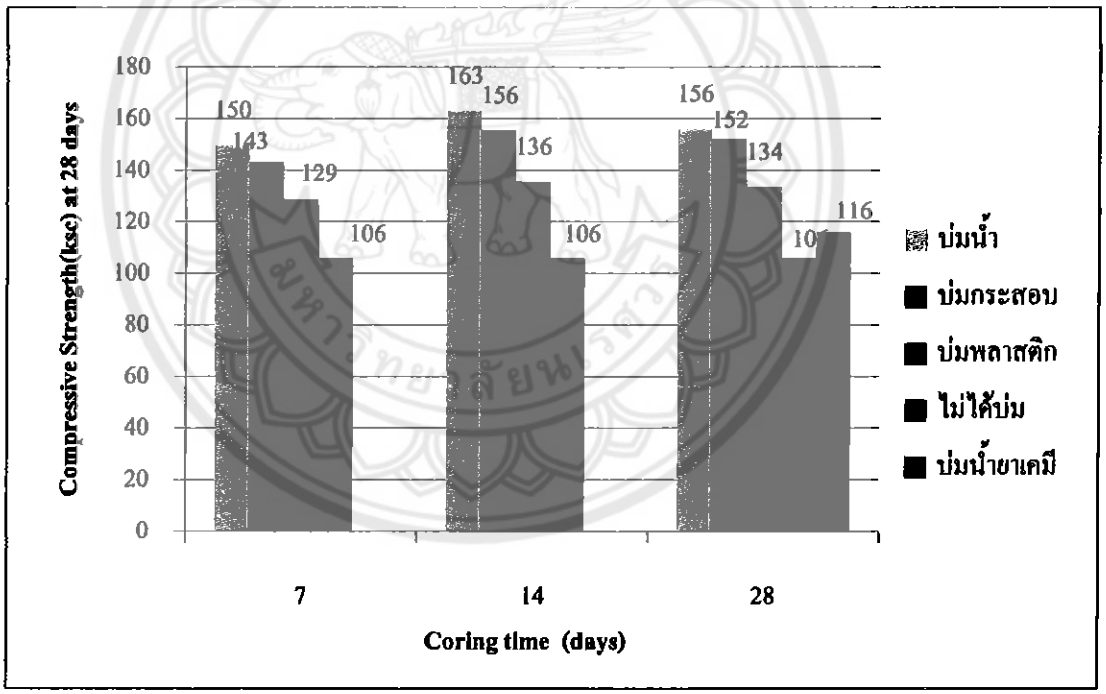


รูปที่ 4.6 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35

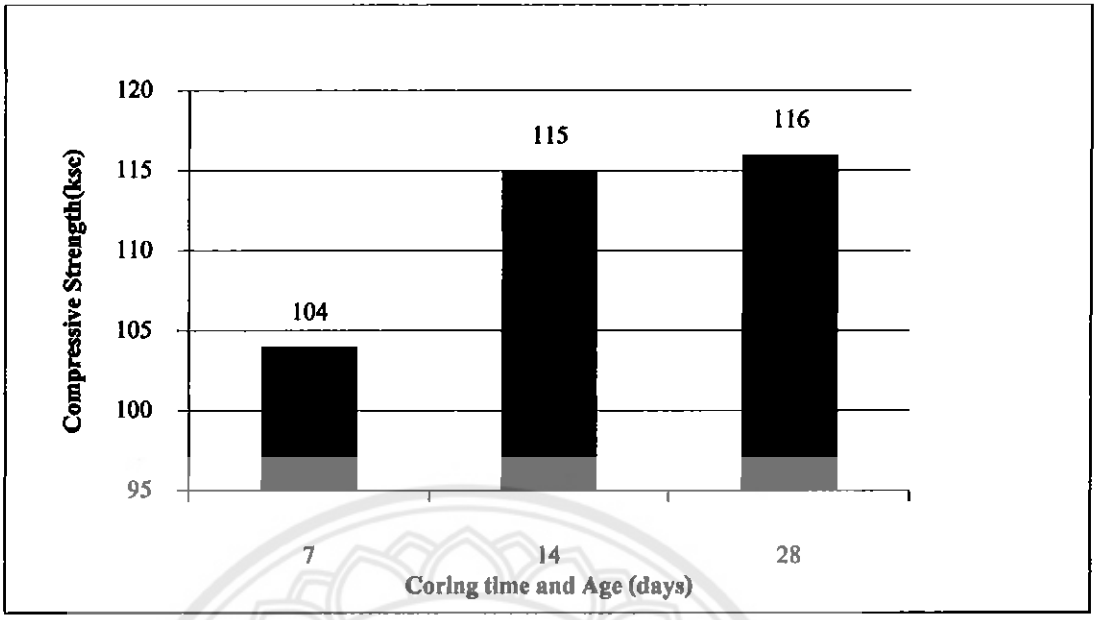
รูปที่ 4.7 ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4

จากรูปที่ 4.8 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.80 เป็นค่ากำลังอัดของคอนกรีตกำลังแบบธรรมดา ซึ่งมีค่ากำลังอัดต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และ0.55 ซึ่งการบ่มคอนกรีตด้วยกระสอบมีแนวโน้มค่ากำลังอัดสูงกว่า การบ่มด้วยน้ำ พลาสติก และน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต คอนกรีตที่ไม่ได้บ่มกำลังอัดต่ำสุด คอนกรีตที่ไม่ได้บ่มกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ยังต่ำกว่าอายุคอนกรีตเพียง 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต การบ่มด้วยน้ำ และกระสอบ ที่ 28 วัน กำลังอัดต่ำกว่า บ่ม14 วัน มีแนวโน้มเกิดจากความชื้นในก้อนตัวอย่างที่ได้กล่าวไว้แล้ว

จากรูปที่ 4.9 การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตการพัฒนากำลังอัดไม่ค่อยดีนัก จากกราฟจะเห็นได้ว่า อายุคอนกรีต 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน กำลังอัดเท่ากับ 104 ksc 115 ksc และ 116 ksc ตามลำดับ ค่ากำลังอัดใกล้เคียงกันมาก ซึ่งอาจเกิดจากการฉีดพ่นน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตที่ไม่สม่ำเสมอหรือไม่เพียงพอที่จะป้องกันการสูญเสียน้ำที่ระเหยออกไป



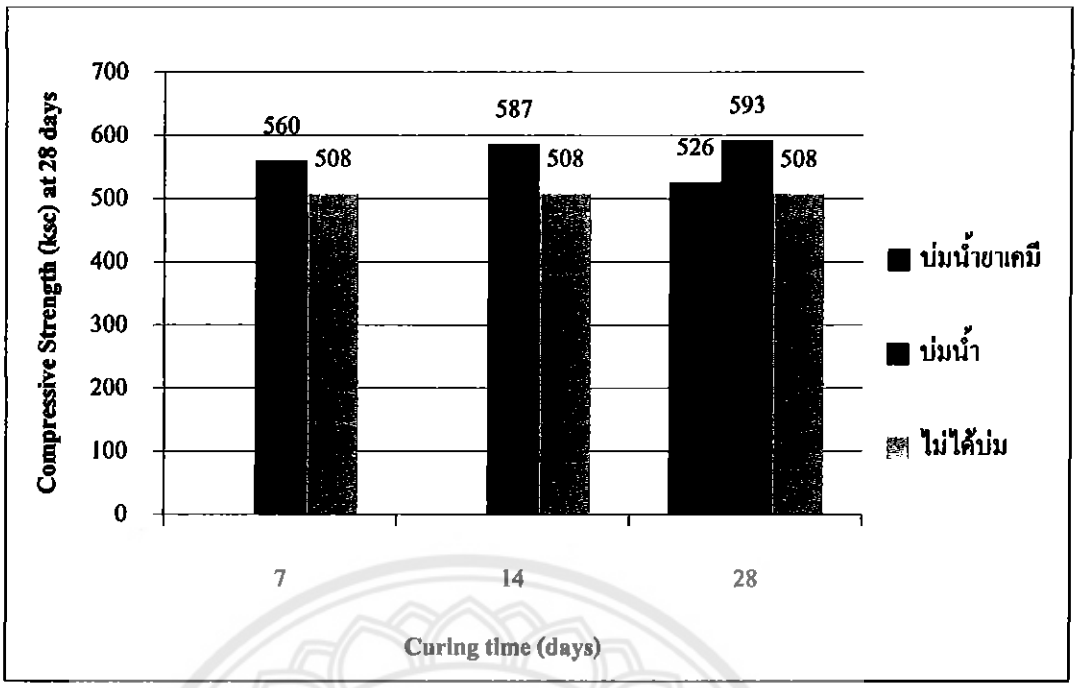
รูปที่ 4.8 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.80 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4



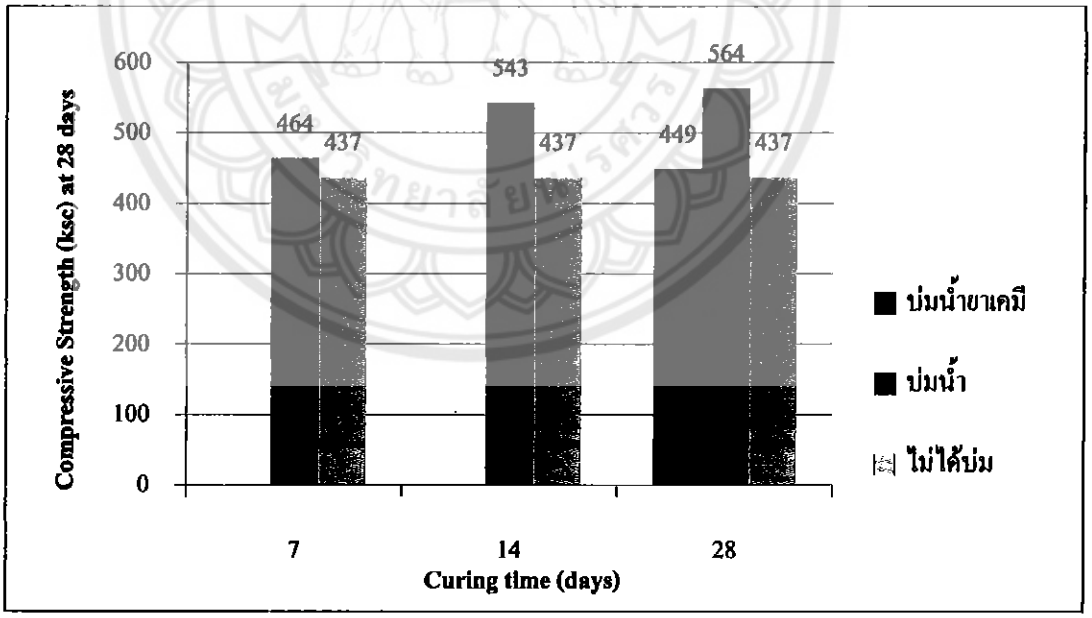
รูปที่ 4.9 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.80

จากรูปที่ 4.10-4.11 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 30% และ50% อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 ซึ่งทดสอบการบ่มคอนกรีต 2 วิธี คือการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำ และน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตพัฒนาดีขึ้น เมื่อบ่มคอนกรีตนานขึ้น ที่อายุคอนกรีต 28 วัน การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำ กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่า บ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต และคอนกรีตที่ไม่ได้บ่ม หากใช้เถ้าลอยเยอะผลของการบ่มจะมีมากกว่าการใช้เถ้าลอยที่น้อยกว่า

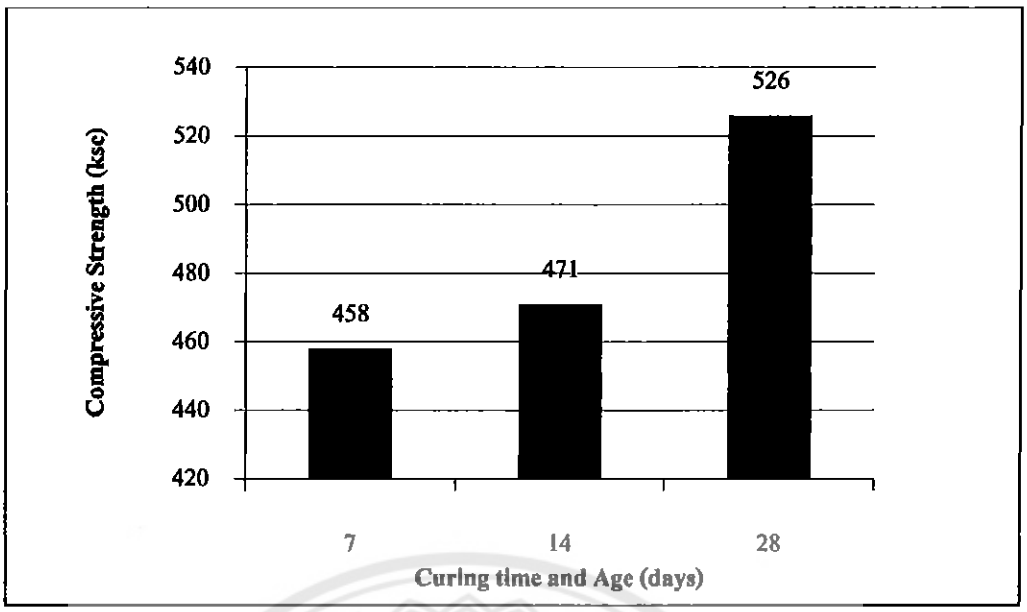
จากรูปที่ 4.12-4.13 คอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตกำลังอัดจะพัฒนา ตามอายุของคอนกรีต และระยะเวลาบ่ม ยกตัวตัวอย่าง ดูรูปที่ 4.12 ที่อายุคอนกรีต 7 วัน 14 วัน และ28 วัน กำลังอัดเท่ากับ 458 ksc 471 ksc และ 526 ksc ตามลำดับ



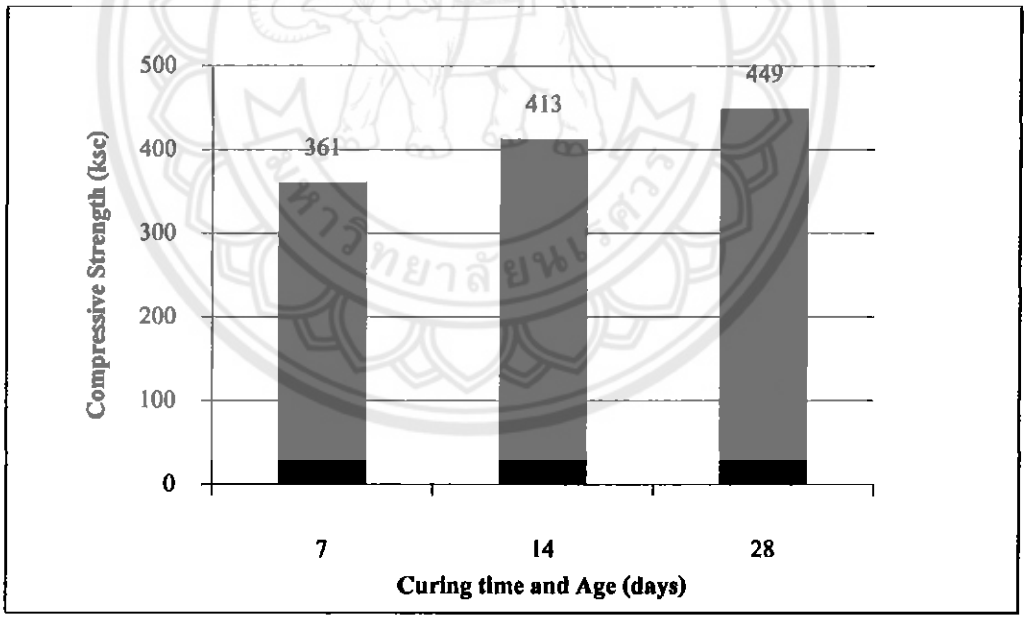
รูปที่ 4.10 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย **เถ้าลอย** 30% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อ**ปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น** 1.4



รูปที่ 4.11 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย เถ้าลอย 50% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4

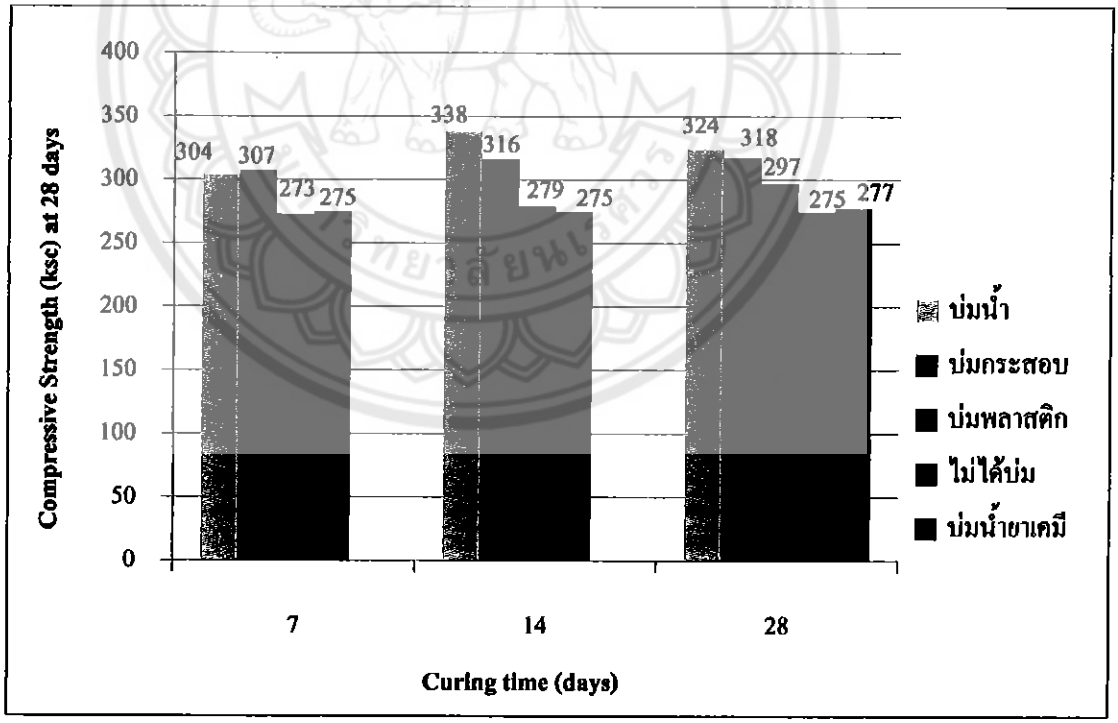


รูปที่ 4.12 ผลของการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดของคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าลอย 30% อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4

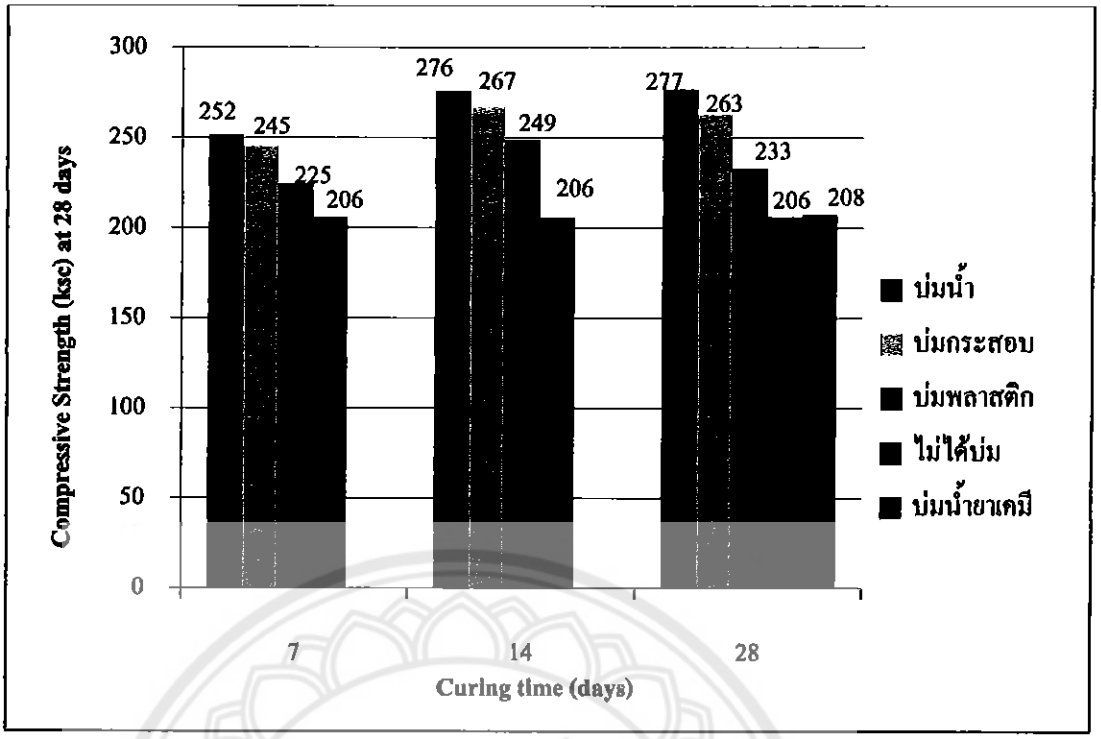


รูปที่ 4.13 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดของคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 50 % อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4

จากรูปที่ 4.14 - 4.15 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 30% และ50% อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำ และบ่มกระสอบ กำลังอัดสูงกว่าการบ่มด้วยบ่มพลาสติก และบ่มน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต กำลังอัดของคอนกรีตมีการพัฒนาตามระยะเวลาการบ่ม แต่กำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำ และกระสอบ บ่มที่ 28 วัน กำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตที่บ่ม 14 วัน เนื่องจากความชื้นในก้อนตัวอย่างที่ได้กล่าวข้างต้นไว้แล้ว และคอนกรีตที่ไม่ได้บ่มกำลังอัดต่ำสุด และจะเห็นได้ว่าการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำยากำลังอัดต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้บ่ม ดูรูปที่ 4.14 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 30% ที่อายุคอนกรีต 28 วัน คอนกรีตบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต กำลังอัดเท่ากับ 277 ksc คอนกรีตที่ไม่ได้บ่มกำลังอัดเท่ากับ 275 ksc ซึ่งต่างกันแค่ 1% และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 50% (รูปที่ 4.15) เช่นเดียวกัน ซึ่งอาจเกิดจากการการฉีดน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตไม่ทั่ว ไม่สม่ำเสมอหรือความหนาของน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต ที่ฉีดเข้าไปไม่เพียงพอที่จะป้องกันความชื้นที่ระเหยออกจากตัวคอนกรีตได้ จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจึงไม่สมบูรณ์ เมื่อดูจากผลการทดสอบแล้ว การบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตจึงไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ

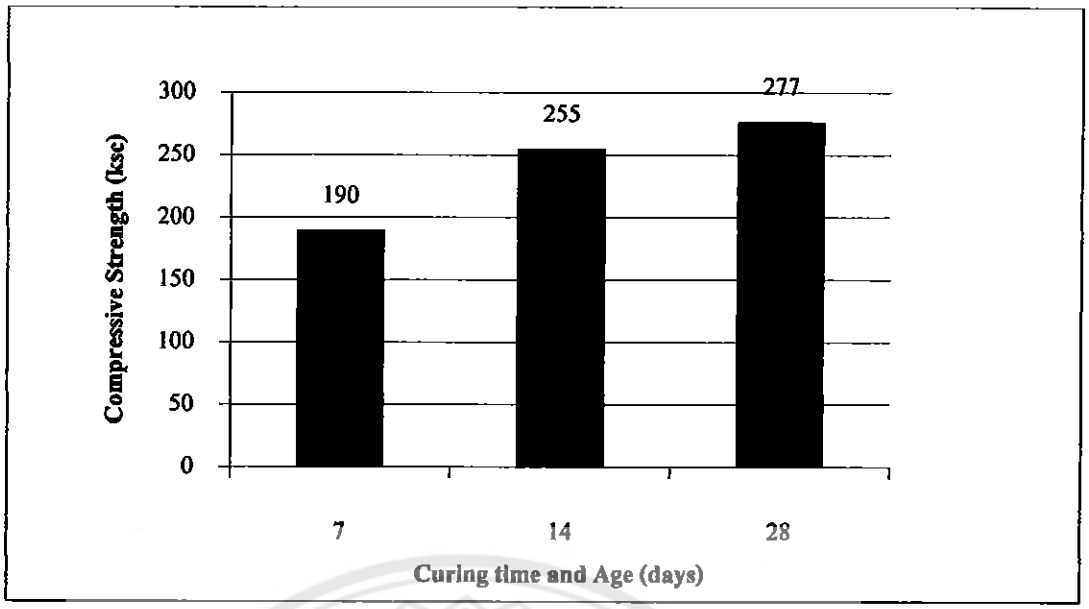


รูปที่ 4.14 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 30% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4

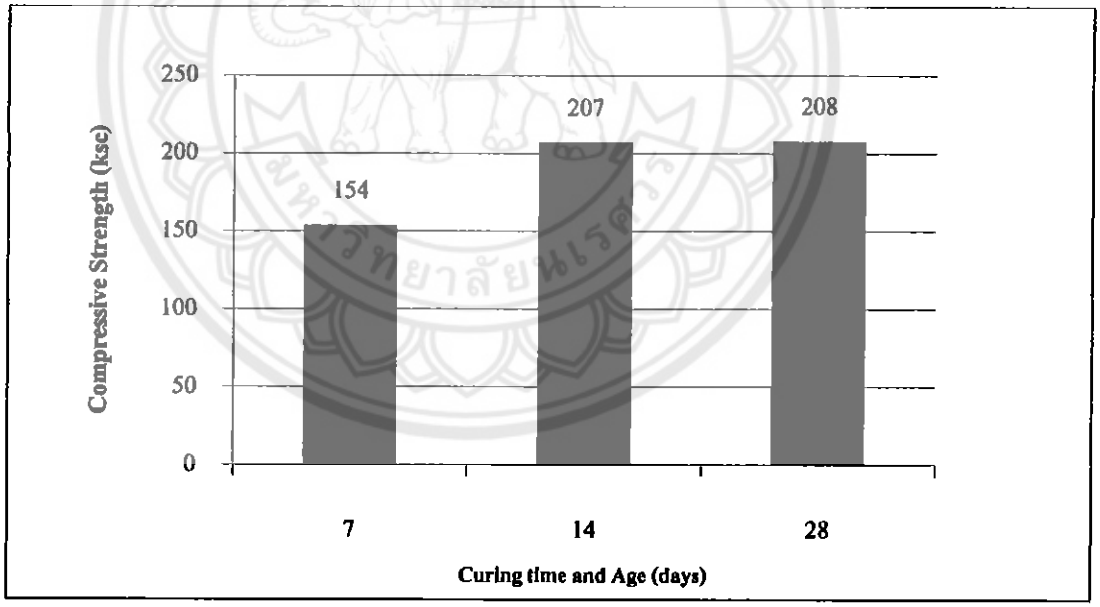


รูปที่ 4.15 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 50% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4

จากรูปที่ 4.16 - 4.17 การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 30% กับ 50% และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กำลังอัดของคอนกรีตจะพัฒนาตามอายุของคอนกรีต จากราฟจะเห็นได้ชัดเจน ยกตัวอย่างรูปที่ 4.16 บ่ม 7 วัน กำลังอัดเท่ากับ 190 ksc บ่ม 14 วัน กำลังอัดเท่ากับ 255 ksc และบ่ม 28 วัน กำลังอัดเท่ากับ 277 ksc

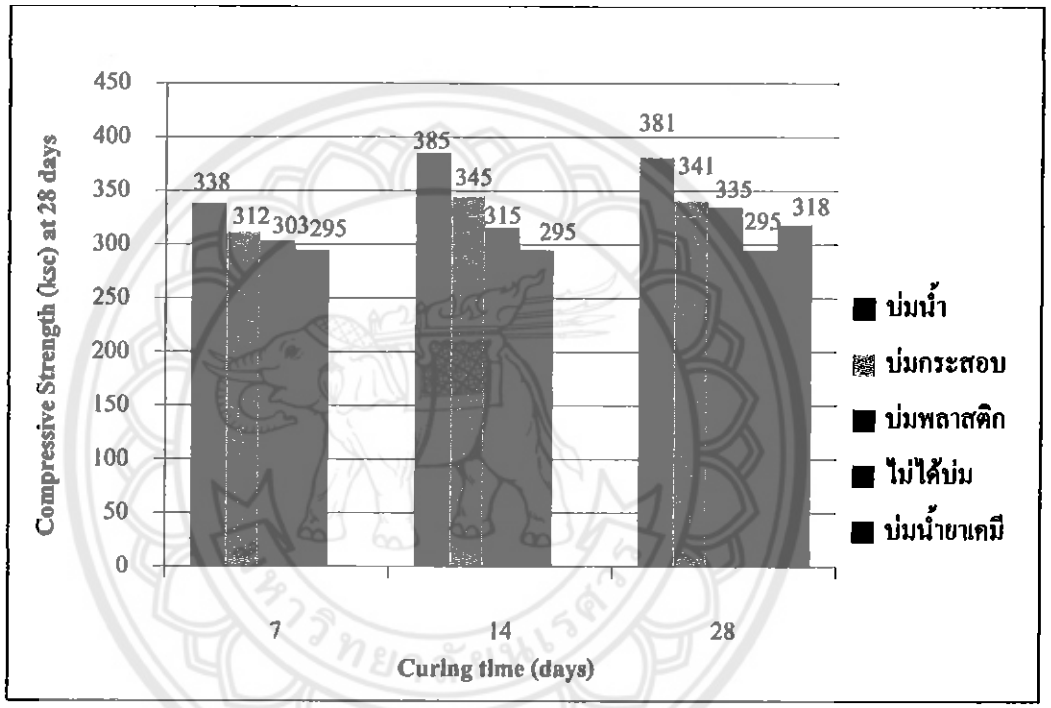


รูปที่ 4.16 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดของคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 30% อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4



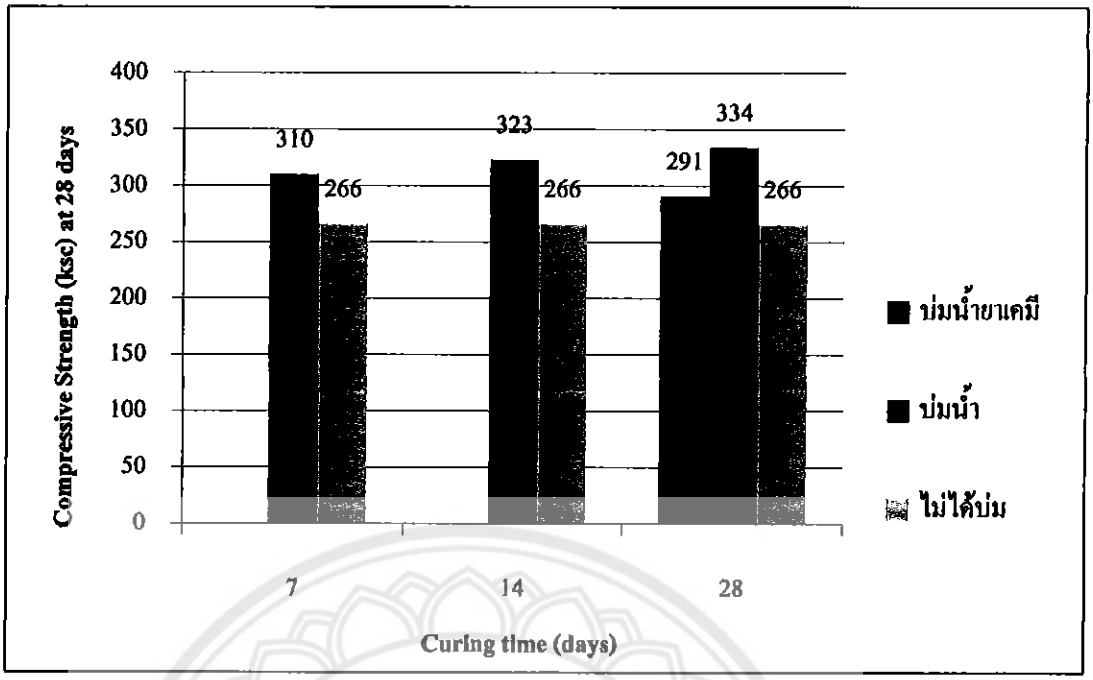
รูปที่ 4.17 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดของคอนกรีต การแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 50% อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4

จากรูปที่ 4.18 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 10% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 จะเห็นได้ว่าผลของการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำ กำลังอัดสูงสุด รองลงมาคือการบ่มคอนกรีตด้วยกระสอบ บ่มพลาสติก และบ่มน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต ตามลำดับ คอนกรีตที่ไม่ได้บ่ม กำลังอัดต่ำสุด กำลังอัดของคอนกรีตมีการพัฒนาตามระระเวลาบ่ม ซึ่งบ่มที่ 28 วัน กำลังอัดสูงกว่า บ่ม 7 วัน และ 14 วัน แต่การบ่ม 28 วัน ด้วยน้ำ และกระสอบ กำลังอัดต่ำกว่า บ่มที่ 14 วัน เนื่องจากความชื้นในก้อนตัวอย่าง ที่ได้กล่าวข้างต้นแล้ว



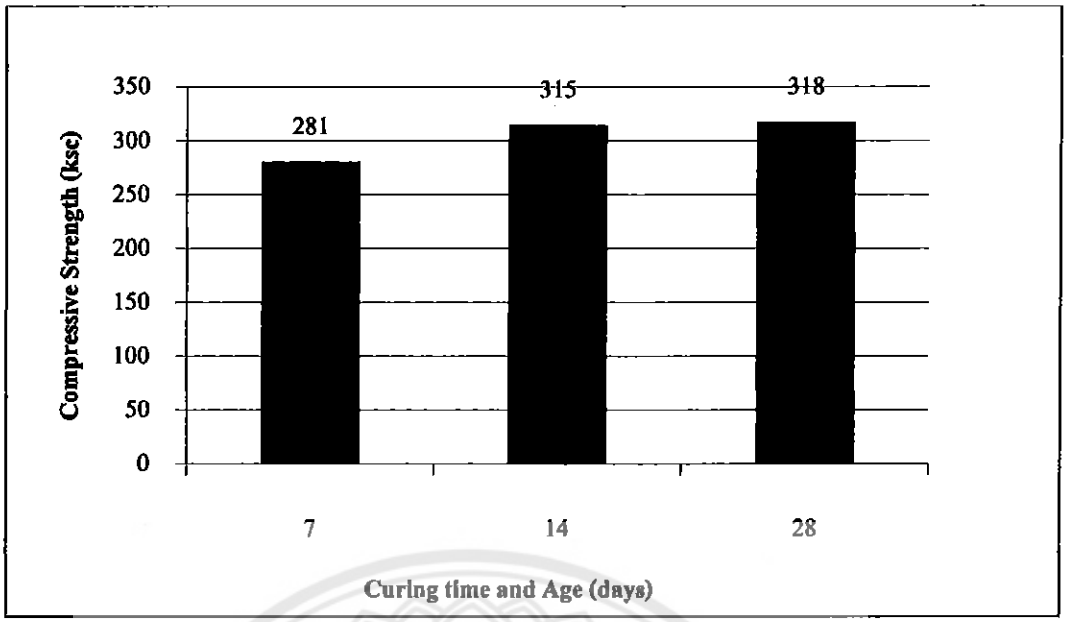
รูปที่ 4.18 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 10% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อ ปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4

จากรูปที่ 4.19 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 20% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 ทำการทดสอบ บ่มน้ำ และบ่มน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัด คอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำสูงกว่าการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต คอนกรีตที่ไม่ได้บ่มค่ากำลังอัด คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลาการบ่ม ยกตัวอย่างการบ่มด้วยน้ำ บ่มที่ 7 วัน กำลังอัดเท่ากับ 310 ksc ต่ำกว่า บ่ม 14 วัน กำลังอัดเท่ากับ 323 ksc และบ่ม 28 วัน กำลังอัดเท่ากับ 334 ksc ซึ่งการบ่มด้วยน้ำ 28 วัน ได้เตรียมก้อนตัวอย่างให้แห้ง กำลังอัดจึงสูงกว่าบ่มที่ 7 วัน และ 14 วัน

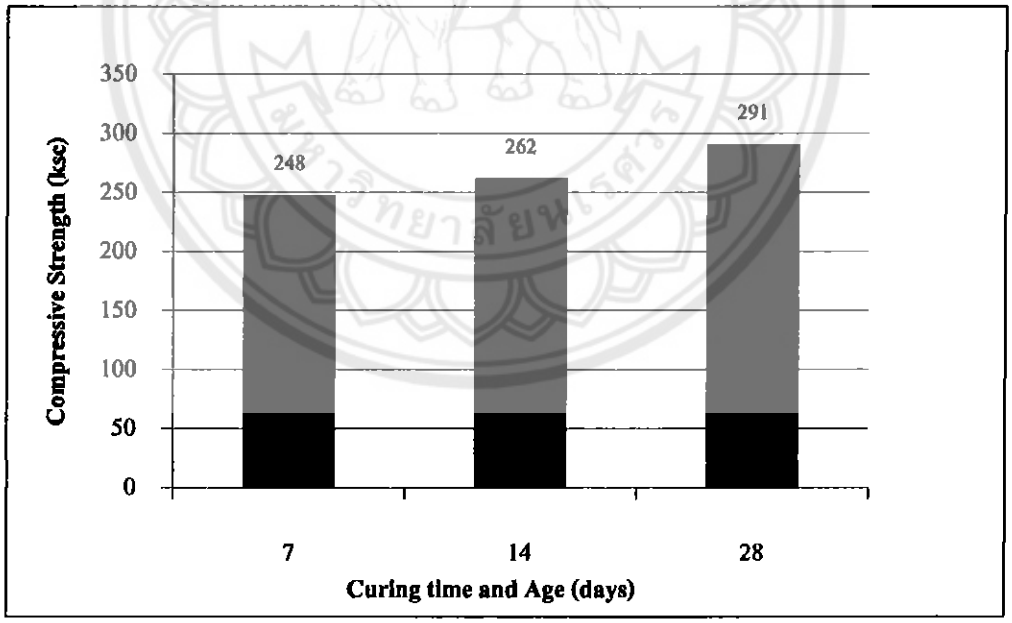


รูปที่ 4.19 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผง**หินปูน** 20% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อ**ปริมาตร**ช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4

จากรูปที่ 4.20 – 4.21 การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต ซึ่ง**กำลังอัดของคอนกรีต**จะพัฒนาตามอายุของคอนกรีต และระยะเวลาของการบ่ม

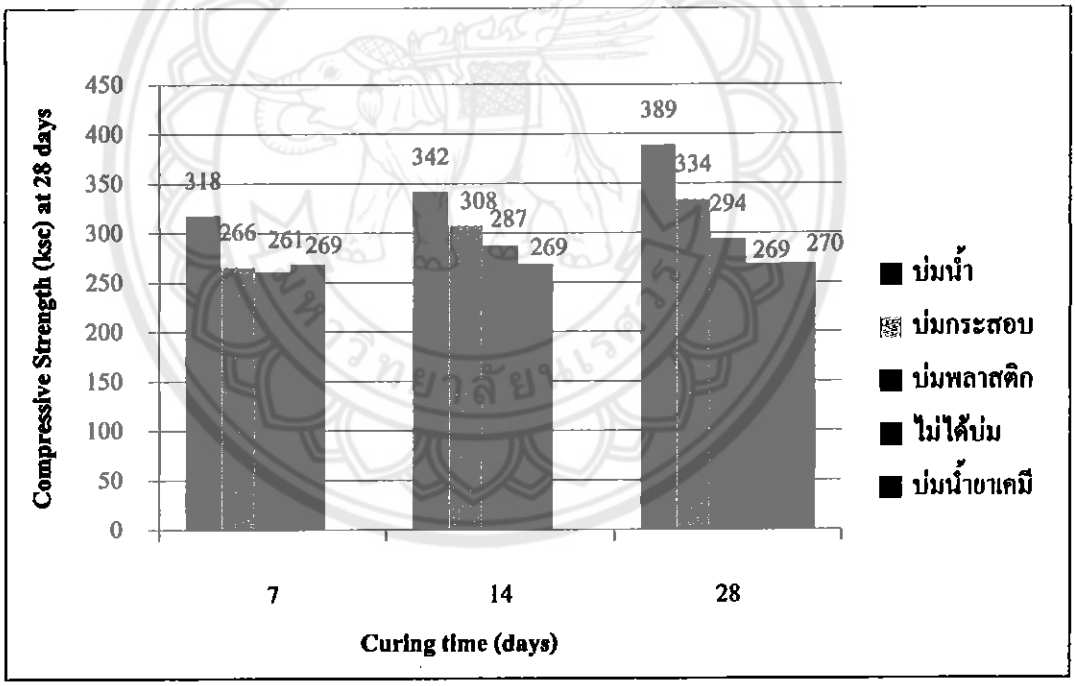


รูปที่ 4.20 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 10% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4



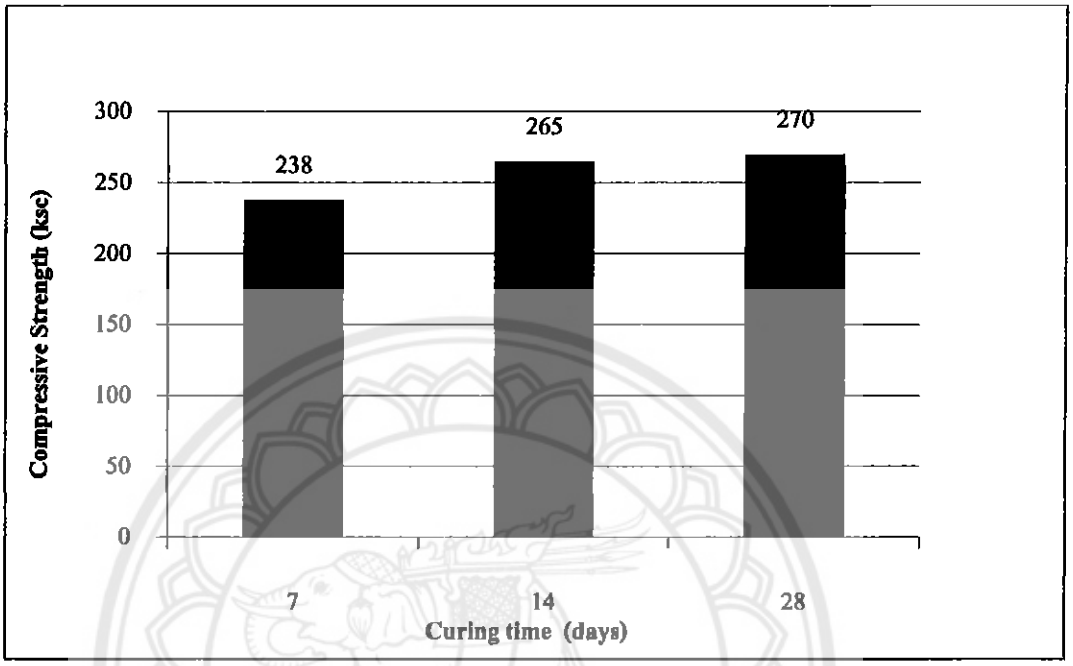
รูปที่ 4.21 ผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต ต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 20% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4

จากรูป 4.22 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 10% ร่วมกับเถ้าลอย 20% จากผลการทดสอบ การบ่มและอายุคอนกรีตที่ 28 วัน การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำกำลังอัดสูงสุด รองลงมา คือการบ่มด้วยกระสอบ พลาสติก และน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต ตามลำดับ คอนกรีตที่ไม่ได้บ่มกำลังต่ำสุด การบ่มด้วยน้ำ กระสอบ กำลังอัดคอนกรีตมีการพัฒนาตามระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น ในสัดส่วนผสมนี้ การบ่มที่ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ก่อนการทดสอบได้เตรียมก้อนตัวอย่างให้แห้ง โดยให้ความชื้นระเหยออกจากก้อนตัวอย่างให้มากที่สุด กำลังอัดคอนกรีตที่บ่ม 28 วันไม่ลดลงเหมือนกับบางสัดส่วนที่ไม่ได้เตรียมก้อนตัวอย่างให้แห้งก่อนนำมาทดสอบกำลังอัดคอนกรีต การบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตที่อายุ 28 วัน พบว่ามีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตกับคอนกรีตที่ไม่ได้บ่ม จากราฟการทดสอบกำลังอัดบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตเท่ากับ 270 ksc คอนกรีตที่ไม่ได้บ่ม กำลังอัดเท่ากับ 269 ksc ซึ่งความชื้นมีการระเหยอย่างต่อเนื่องในก้อนตัวอย่างจนถึง 28 วัน ซึ่งอาจเกิดจากการฉีดน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตไม่เพียงพอที่จะป้องกันความชื้นที่ระเหยออกจากก้อนตัวอย่างทำให้การบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตไม่ได้ประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.22 ผลของวิธีการบ่ม ต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 10% ร่วมกับเถ้าลอย 20% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4

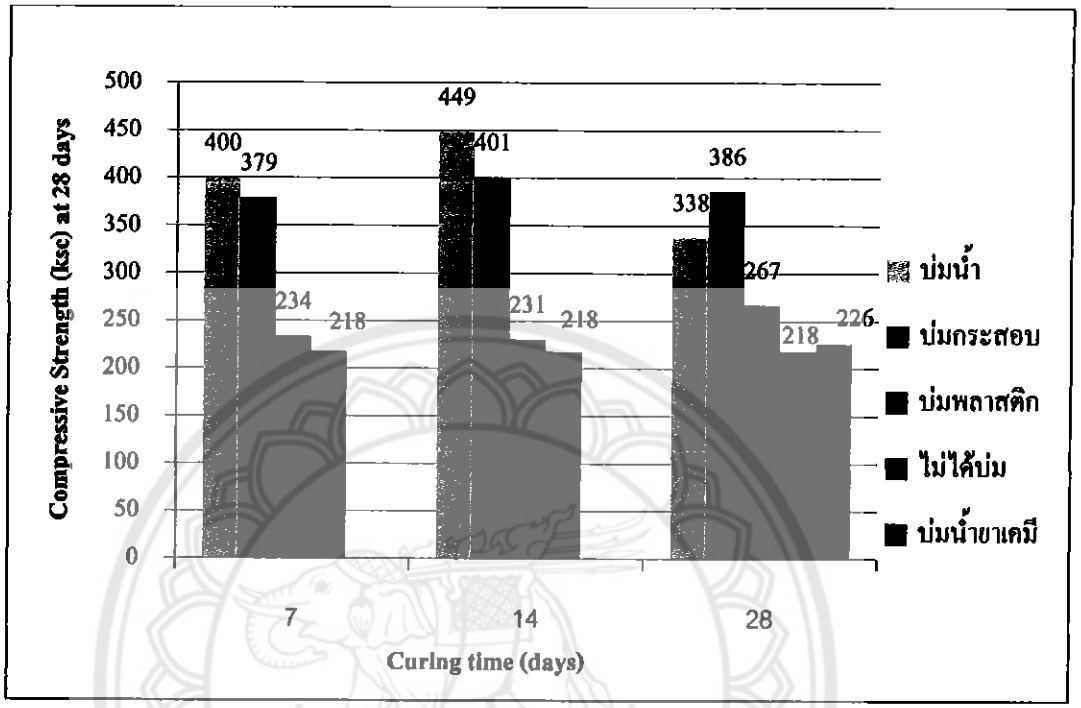
จากรูปที่ 4.23 การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต ซึ่งมีการผสมเถ้าลอย 20% ร่วมกับผงหินปูน 10% แนวโน้มของกำลังอัดไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ช่วงอายุ 7 วัน และ 14 วัน กำลังอัดจะพัฒนาได้เร็ว



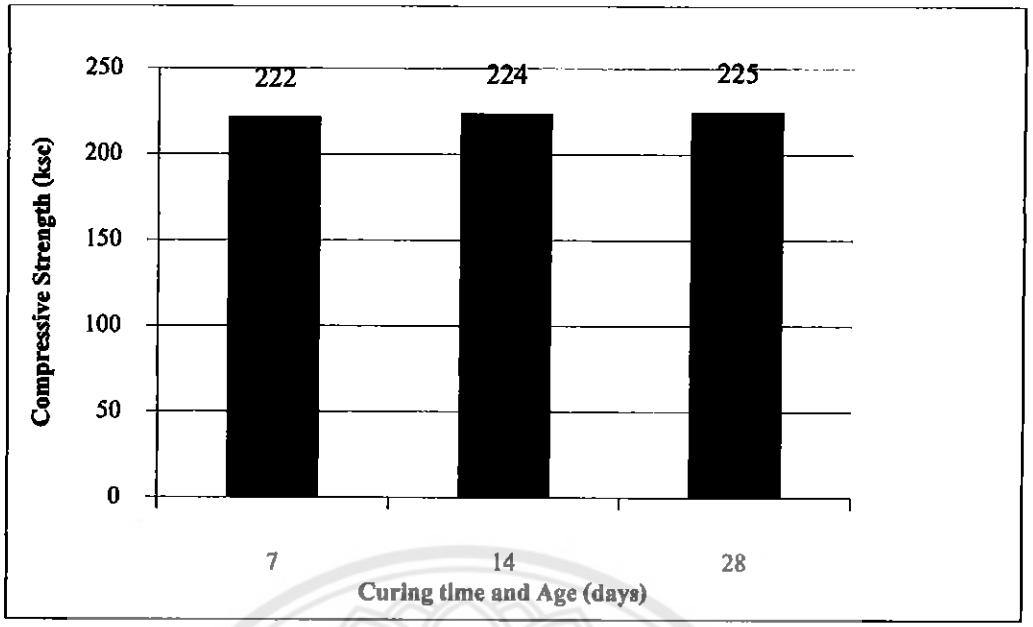
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงผลของการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต ต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 10% ร่วมกับเถ้าลอย 20% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และ อัตราส่วน ปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4

จากรูปที่ 4.24 การแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา 30% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 จะเห็นได้ว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา กำลังอัดที่อายุ 28 วัน การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำกำลังอัดจะมากที่สุดจากกราฟ ดูที่ การบ่มที่ 7 วัน 14 วัน แต่การบ่มคอนกรีต ที่ 28 วัน การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำกำลังอัดเท่ากับ 338 ksc ต่ำกว่าการบ่มคอนกรีตด้วยกระสอบกำลังอัดเท่ากับ 386 ksc การบ่มด้วยน้ำเมื่อเทียบการบ่มที่ 7 วัน กำลังอัดเท่ากับ 400 ksc และ14 วัน กำลังอัดเท่ากับ 449 ksc กำลังอัดที่บ่ม 28 วัน ต่ำกว่า เกิดจากปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้กำลังอัดลดลง ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่เห็นผลได้อย่างชัดเจนคือ ก้อนตัวอย่างมีความชื้นมากซึ่งไม่ได้ควบคุมความชื้นของก้อนตัวอย่าง กำลังอัดจึงต่ำลงมาก รวมถึงความชื้นในเถ้าก้นเตาด้วย [20] ซึ่งลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างที่นำมาทดสอบ ซึ่งรอยแตกจะผ่า เพสต์ซึ่งคอนกรีตมีความเปราะ (รูปที่ 4.26) และยังพบว่าก้อนตัวอย่างที่แตกนั้น มีความชื้นมาก สำหรับการบ่มด้วยพลาสติก และน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต กำลังอัดของคอนกรีตจะน้อยกว่าการบ่มด้วยน้ำ และการบ่มด้วยกระสอบ และคอนกรีตที่ไม่ได้บ่มกำลังอัดจะน้อยซึ่งน้ำระเหยออกไปมาก การบ่ม

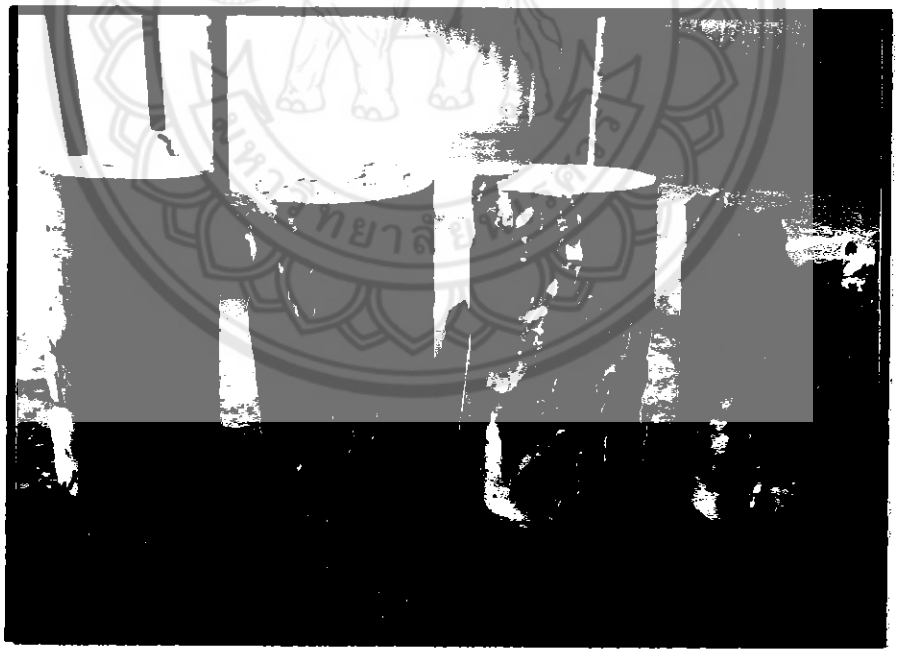
คอนกรีตด้วยกระสอบและการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำซึ่งมีความ เหมาะสำหรับการบ่มคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาก่วาวิธีการบ่มด้วยวิธีอื่นๆ เป็นอย่างมาก แต่ก่อนทดสอบกำลังอัดควรมีการเตรียมก้อนตัวอย่างให้แห้ง



รูปที่ 4.24 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา 30% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4



รูปที่ 4.25 ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา 30% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4



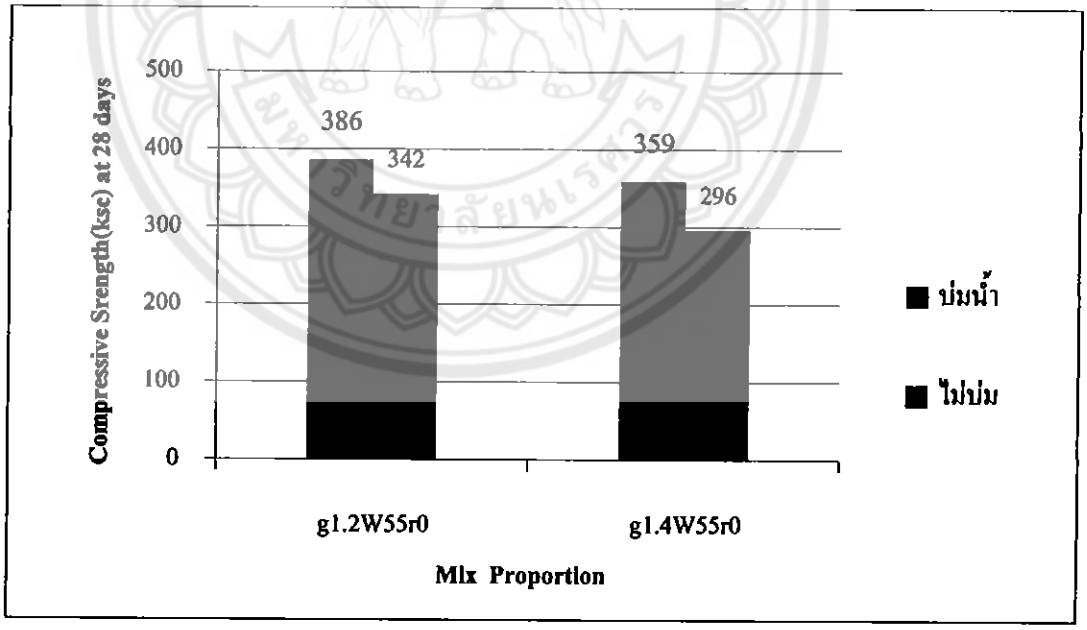
รูปที่ 4.26 ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา 0.30 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4

4.1.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต

ซึ่งเป็นเป็นปัจจัยที่ศึกษาเพิ่มเติมในสัดส่วนผสมคอนกรีต ได้แก่ อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน และแทนที่ทรายเถ้าก้นเตา ซึ่งทดสอบกำลังที่อายุคอนกรีต 28 วัน โดยใช้ก้อนคอนกรีตตัวอย่างที่ไม่ได้บ่ม และ วีการบ่มที่ดีที่สุด คือ การบ่มด้วยน้ำ ในการศึกษาปัจจัยดังกล่าว

1) ผลของปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ)

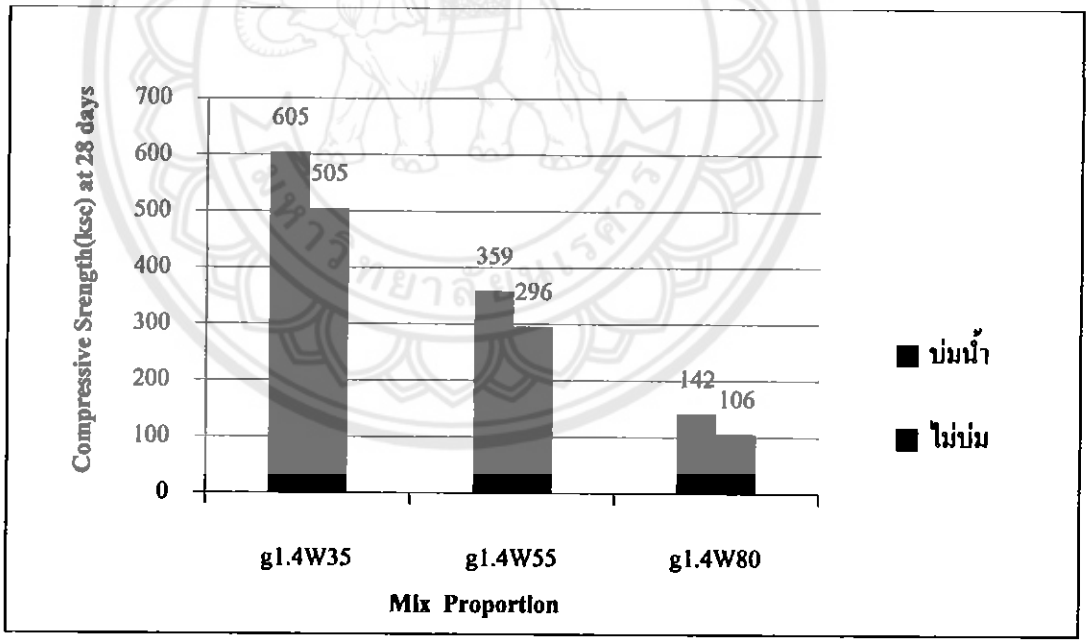
จากรูปที่ 4.27 ผลของอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.2 และ1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 จะเห็นได้ว่าปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.2 กำลังอัดมากกว่า ปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 แนวโน้มเกิดจากปริมาณเพสต์มากเกินไป ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นลดลง ค่ากำลังอัดจึงน้อยกว่าน้อยกว่า ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวมที่พอดี ซึ่งปริมาณเพสต์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต ปริมาณเพสต์ต้องเพียงพอที่เข้าไปอุดช่องว่างระหว่างมวลรวมเพื่อให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับเพสต์ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น



รูปที่ 4.27 ผลของอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.2 และ1.4 ต่อกำลังอัดของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

2) ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)

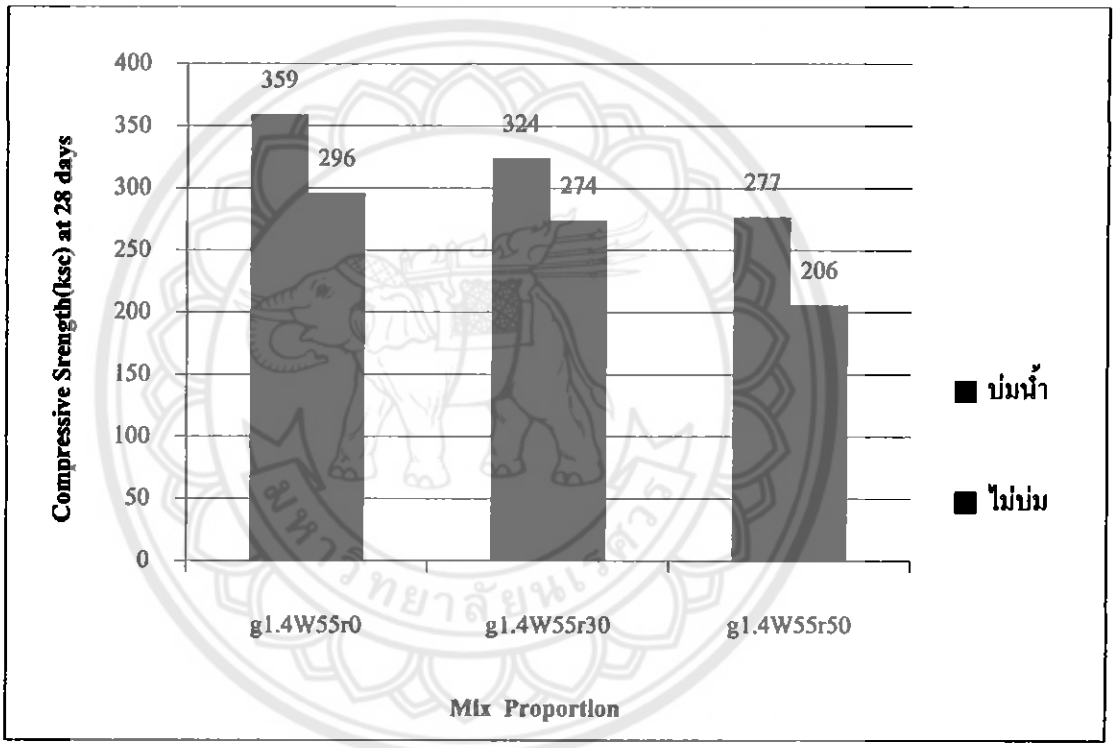
จากรูปที่ 4.28 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 กำลังอัดเท่ากับ 505 ksc กำลังอัดสูงสุด สูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กำลังอัดเท่ากับ 296 ksc และ 0.80 กำลังอัดเท่ากับ 106 ksc ที่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.80 ซึ่งกำลังอัดของคอนกรีตต่ำมาก เมื่อเทียบกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 ซึ่งกำลังอัดต่ำกว่า 80% และต่ำกว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 64% ซึ่ง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สูง เกิดโพรงอากาศในตัวคอนกรีตมาก กำลังอัดจึงต่ำลง รวมไปถึงซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สูง จะทำให้คอนกรีตรับแรงอัดได้ต่ำ เนื่องจากทำให้เกิดช่องว่างคะปิลลารี่ (Capillary Pores) มากในเพสต์ซึ่งเป็นผลทำให้ความหนาแน่นของเพสต์ต่ำ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจึงต่ำลงไปด้วย ส่วนคอนกรีตค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำซึ่งจะมีกำลังอัดสูง



รูปที่ 4.28 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 , 0.55 และ 0.80 ต่อกำลังอัดของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4

3) ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

จากรูปที่ 4.29 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยอัตราส่วน ปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน จะลดลงตามสัดส่วนของเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มากขึ้น กำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย จะค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งจะให้กำลังอัดของคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอยที่อายุคอนกรีต 28 วัน

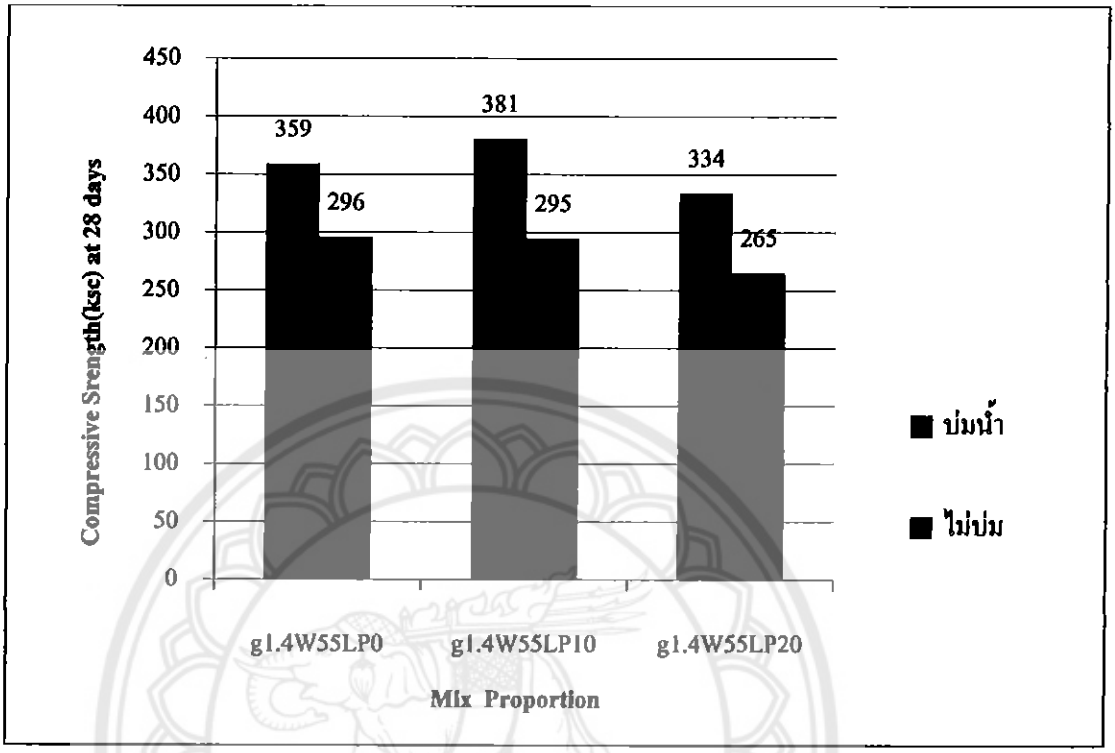


รูปที่ 4.29 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ต่อกำลังอัดของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

4) ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน

จากรูปที่ 4.30 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน กำลังอัดของคอนกรีตการแทนที่ผงหินปูน 10% ซึ่งมีแนวโน้มจะช่วยเพิ่มกำลังอัดให้กับคอนกรีตอายุ 28 วัน เนื่องจากผงหินปูนช่วยอุดช่องว่างระหว่างมวลรวม กำลังอัดจึงเพิ่มขึ้น และกำลังอัดของคอนกรีตจะแปลผันตามสัดส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน เมื่ออัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนมาก กำลังอัดของคอนกรีตอายุ 28 วัน ก็จะลดลง และเมื่อได้รับการบ่มที่ดีแล้วกำลังอัดจะเพิ่มขึ้น ดูตัวอย่าง

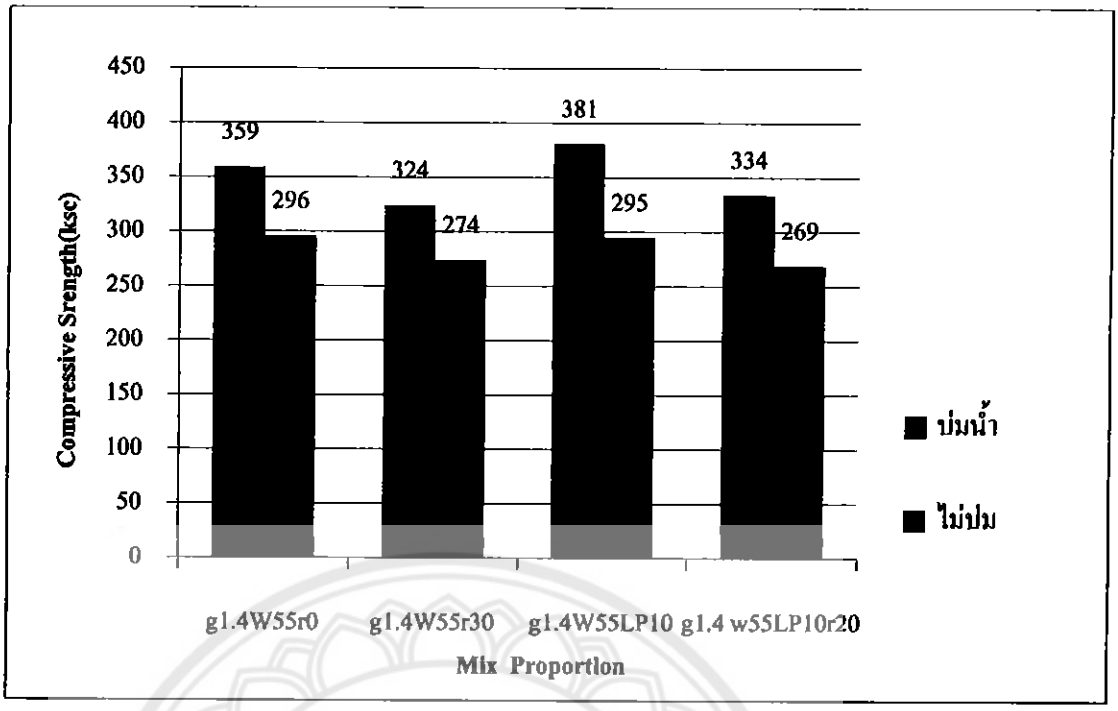
จากกราฟ จะเห็นได้ว่าการแทนที่ผงหินปูน 30% กำลังอัดไม่ได้บ่มเท่ากับ 274 ksc เมื่อบ่มด้วยน้ำ กำลังอัดเท่ากับ 324 ksc



รูปที่ 4.30 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนต่อกำลังอัดของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

5) ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน ร่วมกับเถ้าลอย

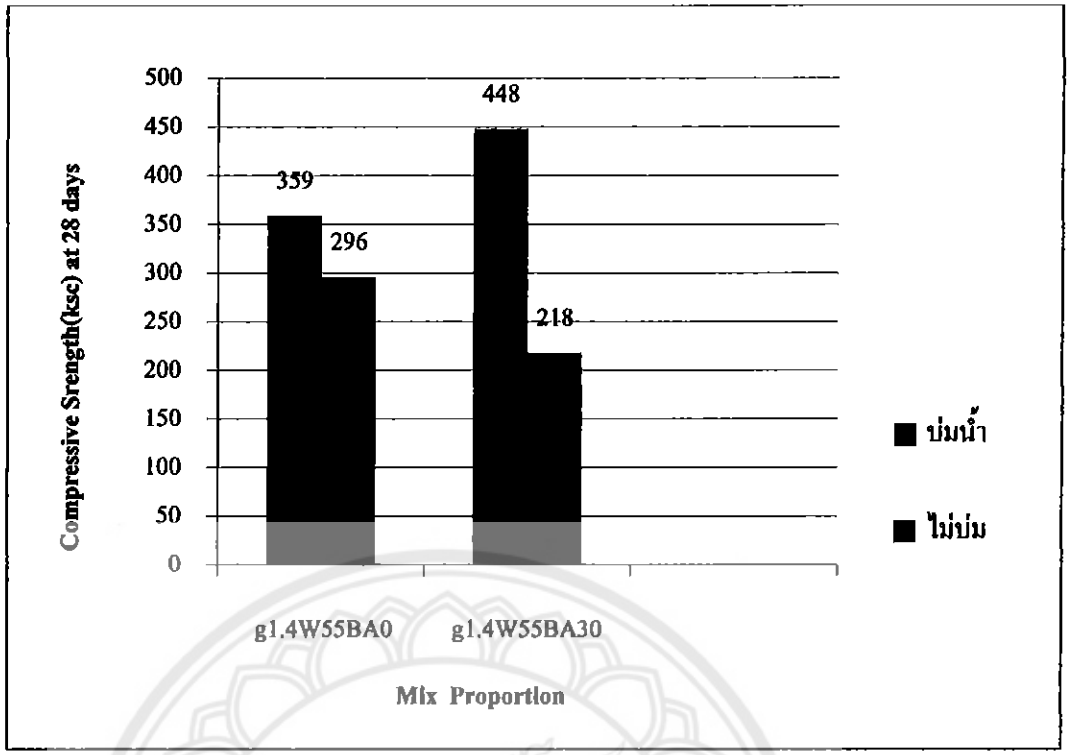
จากรูปที่ 4.31 กำลังอัดของการแทนที่ปูนซีเมนต์ผงหินปูน 10% ร่วมกับด้วยเถ้าลอย 20% อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 พบว่าที่อายุคอนกรีต 28 วัน คอนกรีตที่ไม่ได้บ่ม กำลังอัดเท่ากับ 269 ksc ซึ่งกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย 30 % หรือผงหินปูน เพียงอย่างเดียว 10% กำลังอัดเท่ากับ 274 ksc และ295 ksc ตามลำดับ คอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมผงหินปูน และเถ้าลอย กำลังอัดเท่ากับ 296 ksc คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีแนวโน้มที่จะช่วยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตหลังอายุคอนกรีต 28 วัน



รูปที่ 4.31 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ผงหินปูนร่วมกับด้วยเถ้าลอย ต่อกำลังอัดของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

6) ผลของการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา

จากรูปที่ 4.32 ผลของการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา ที่อายุ 28 วัน คอนกรีตที่ไม่ได้บ่ม กำลังอัดเท่ากับ 218 ksc น้อยว่าคอนกรีตธรรมดาไม่ได้ผสมเถ้าก้นเตา กำลังอัดเท่ากับ 296 ksc กำลังอัดเป็น 74% ของคอนกรีตธรรมดา ซึ่งที่อายุคอนกรีต 28วัน เมื่อผสมเถ้าเตา กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลง เมื่อนำมาบ่มด้วยน้ำพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา สูงขึ้น 448 ksc จากไม่บ่มกำลังอัดเพียง 218 ksc ซึ่งเถ้าก้นเตา มีลักษณะเป็นโพรง น้ำจึงสามารถซึมเข้าไปในตัวคอนกรีตได้มาก คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาต้องได้รับการบ่มเท่านั้นกำลังอัดจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้น



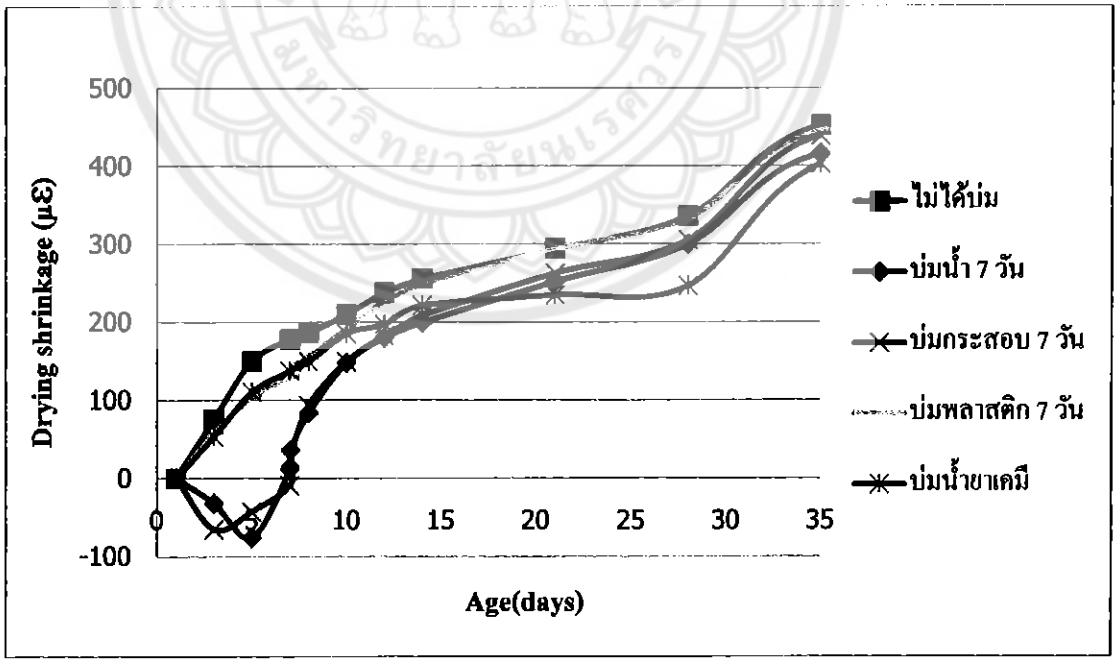
รูปที่ 4.32 ผลของการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา ต่อกำลังอัดคอนกรีต ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

4.2 การทดสอบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

4.2.1 ผลของวิธีการบ่มต่อพฤติกรรมการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

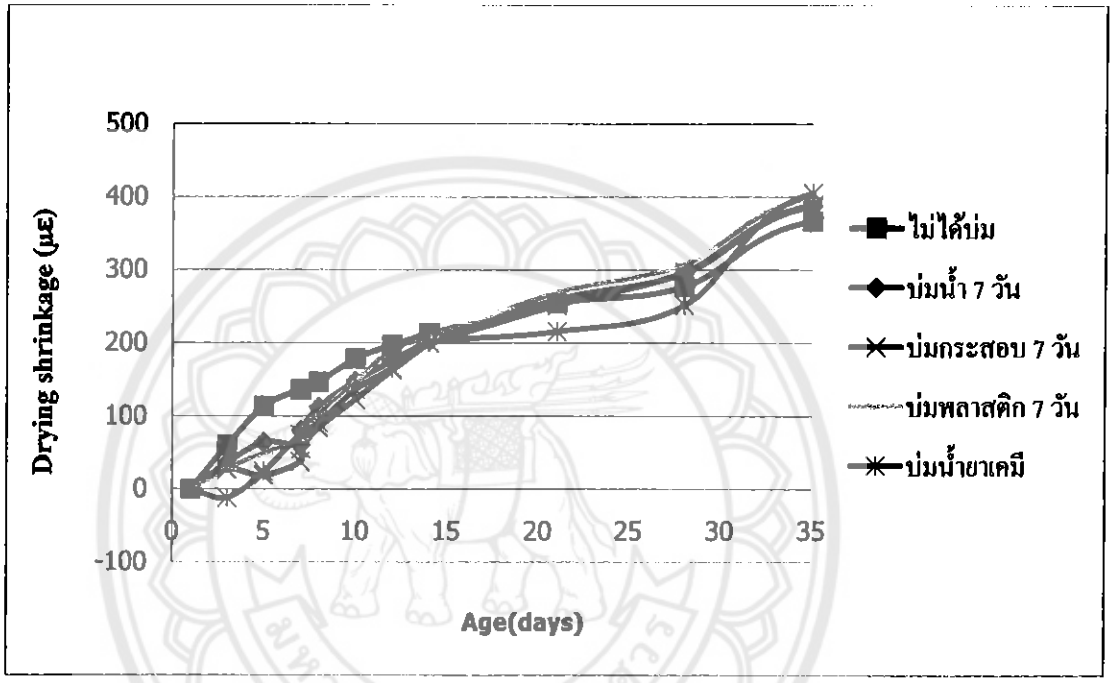
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลของการบ่มการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต ตามสัดส่วนผสมคอนกรีตที่แตกต่างการออกไป ซึ่งแสดงเป็นกราฟเส้นเพื่อเปรียบเทียบระยะเวลาบ่ม และผลของการบ่มแต่ละวิธี

จากรูป 4.33 จะเห็นได้ว่าช่วงระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต คอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำและบ่มด้วยกระสอบ จะเกิดการขยายตัวของคอนกรีตคอนกรีต เกิดการบวม (swelling) เนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ได้จากการบ่มถูกดูดเข้าไปในซีเมนต์เพสต์ ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว ส่วนการบ่มโดยการป้องกันการสูญเสียน้ำ บ่มโดยใช้พลาสติก และบ่มโดยใช้น้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต ช่วงระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตจะขยายตัวอย่างต่อเนื่อง หลังจากนำออกจากการบ่มแล้วคอนกรีตที่บ่มจะหดตัวอย่างต่อเนื่องโดยที่คอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำ และบ่มด้วยกระสอบจะช่วยชดเชยการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตในช่วงระยะเวลาการบ่มได้ และช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตได้ดีกว่าการบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต และบ่มด้วยพลาสติก



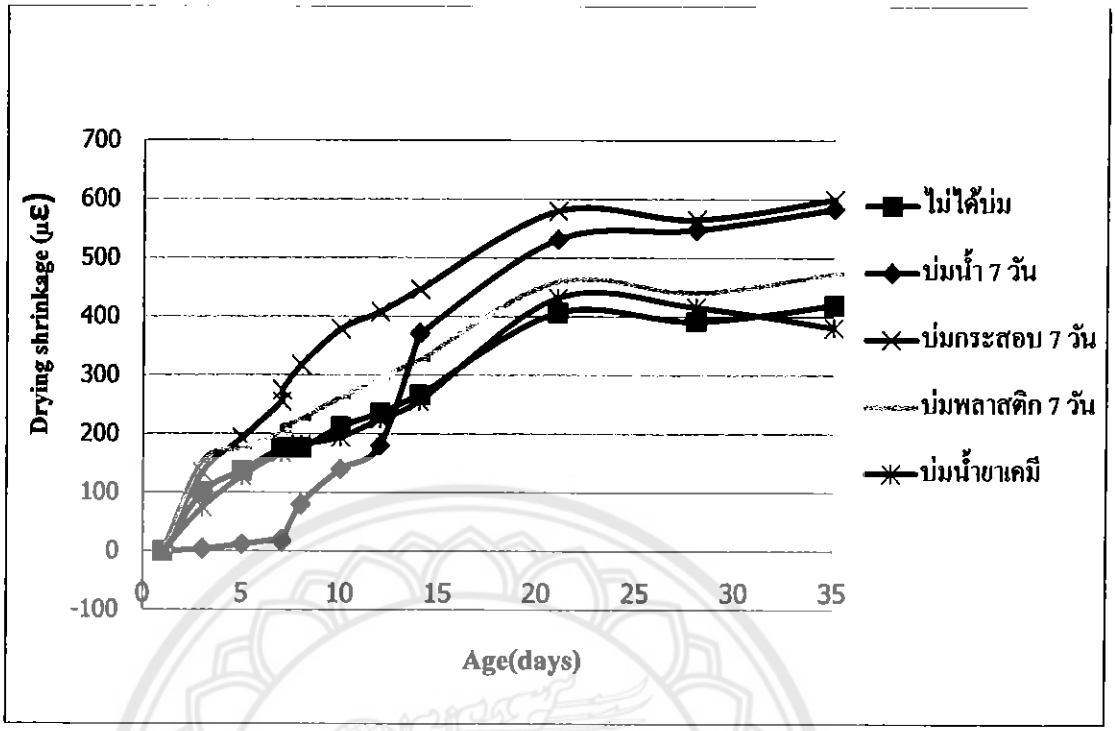
รูปที่ 4.33 ผลของวิธีการบ่มต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร ช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

จากรูปที่ 4.34 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วนเถ้าลอย 50% อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 นั้น ในช่วงการบ่มคอนกรีต คอนกรีตจะขยายตัวอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเถ้าลอยมีการกระจายตัวดีในเนื้อคอนกรีตจึงช่วยอุดช่องว่างในคอนกรีต การบวมตัวในคอนกรีตจะไม่เกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต มีแนวโน้มช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยได้ดี



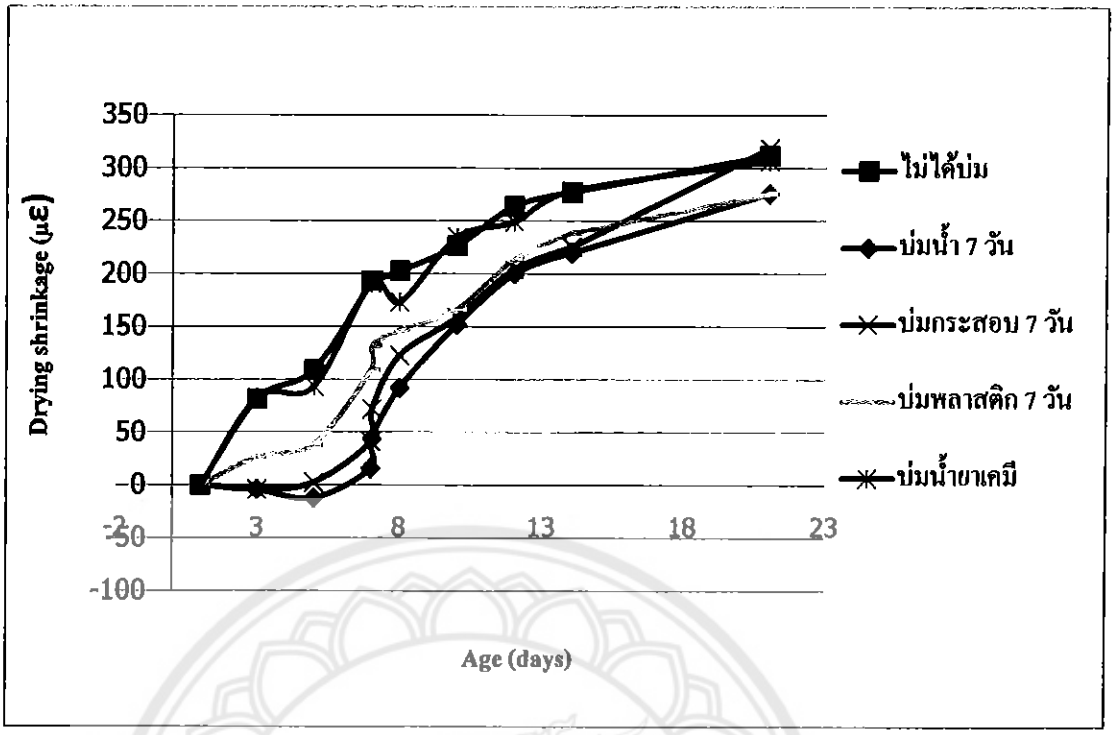
รูปที่ 4.34 ผลของวิธีการบ่มต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยด้วยเถ้าลอย 50%

จากรูปที่ 4.35 คอนกรีตที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 10% อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อ ปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 จะเห็นได้ว่าวการบ่มด้วยน้ำและบ่มด้วยกระสอบ ช่วงระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตก็ขยายตัวอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับการบ่มคอนกรีตด้วยพลาสติกและกระสอบเปียก หลังจากนำออกจากการบ่มแล้วคอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำและบ่มด้วยกระสอบค่าการดตัวของคอนกรีตจะสูงกว่าการบ่มด้วยพลาสติกและน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต เนื่องมาจากคอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำและบ่มด้วยกระสอบมีความชื้นในก้อนคอนกรีตสูงเมื่อนำออกมาจากการบ่ม ชื้นความชื้นในก้อนคอนกรีตมีความชื้นสูงกว่าความชื้นในสภาพแวดล้อมเป็นผลทำให้คอนกรีตหดตัวแบบแห้ง



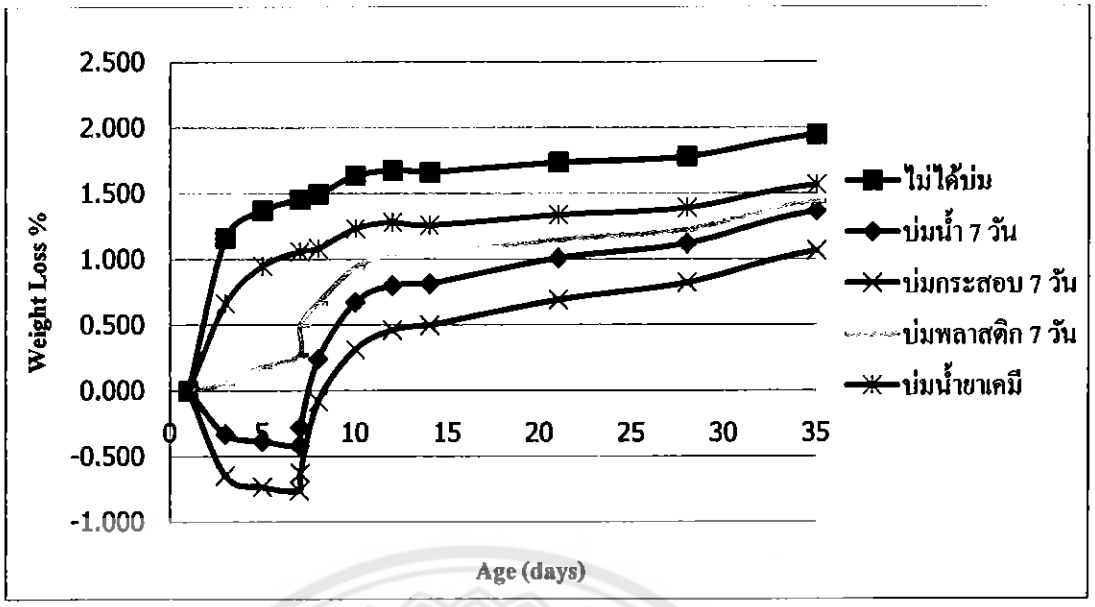
รูปที่ 4.35 ผลของวิธีการบ่ม ต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 10%

จากรูป 4.36 การแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา 30% อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 จะเห็นได้ว่าช่วงระยะเวลา 3 วันแรกคอนกรีตเกิดการขยายตัว เนื่องจากอุณหภูมิในห้องทดสอบมีค่าสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำในช่วงระการบ่มที่ 7 วัน การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำและบ่มด้วยกระสอบจะหดตัวน้อยกว่าการบ่มด้วยพลาสติกและบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต หลังจากนำออกจากการบ่มแล้วคอนกรีตก็หดตัวอย่างต่อเนื่อง โดยที่คอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำมีแนวโน้มช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตได้ดี

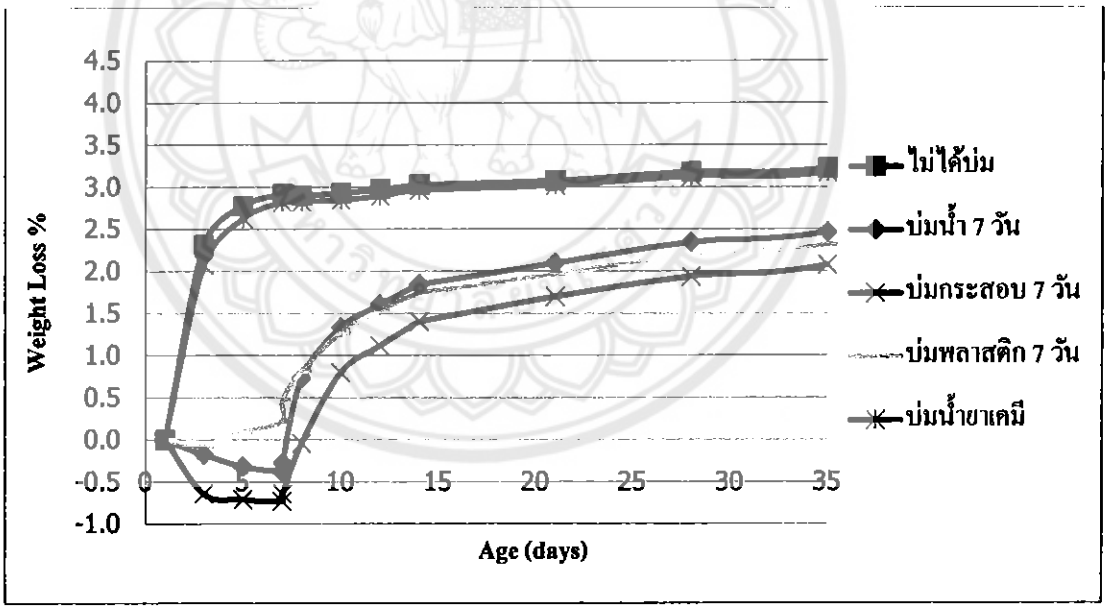


รูปที่ 4.36 ผลของวิธีการบ่มต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา 30%

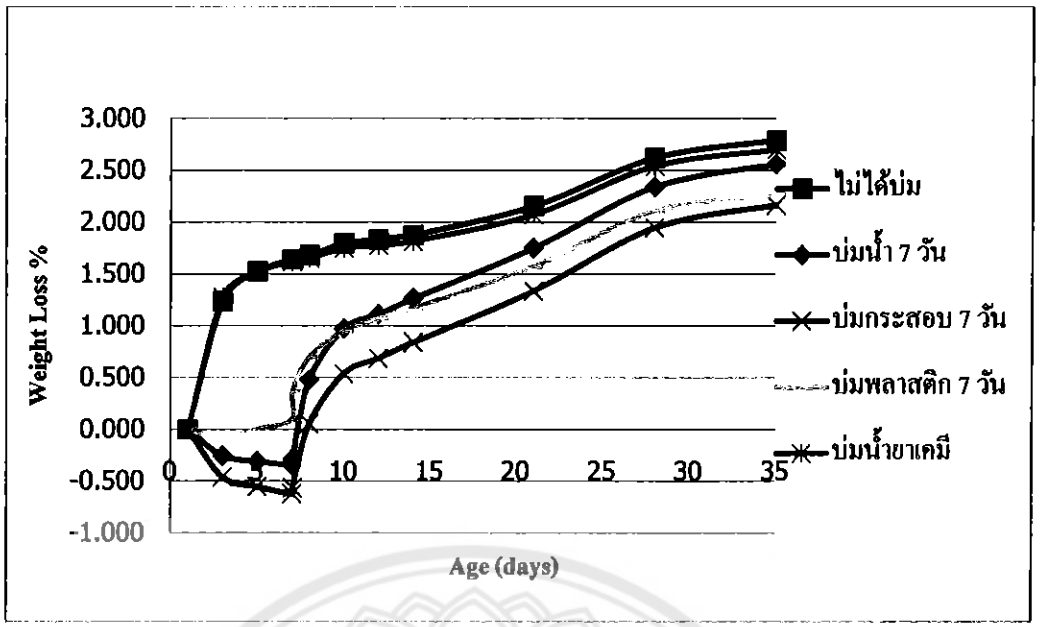
จากผลของการบ่มต่อการสูญเสียความชื้นในก้อนคอนกรีต ก้อนคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน(รูปที่ 4.37) ใช้เถ้าลอย 0.50 (รูปที่ 4.38) ใช้ผงหินปูน 10% (รูปที่ 4.39) ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าการบ่มด้วยน้ำและการบ่มด้วยกระสอบในช่วงของการบ่มจะมีความชื้นในก้อนคอนกรีตเพิ่มเนื่องจากการบ่มด้วยน้ำและกระสอบเป็นการบ่มโดยให้ความชื้นเข้าไปในคอนกรีต ส่วนการบ่มด้วยพลาสติกและน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตจะสูญเสียความชื้นในก้อนคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง โดยการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำและกระสอบจะชดเชยการสูญเสียความชื้นในก้อนคอนกรีตได้ ส่งผลให้คอนกรีตเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ส่วนการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาการบ่มด้วยน้ำและการบ่มด้วยกระสอบจะมีความชื้นสูงกว่าการบ่มด้วยพลาสติกและบ่มด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต เช่นกัน



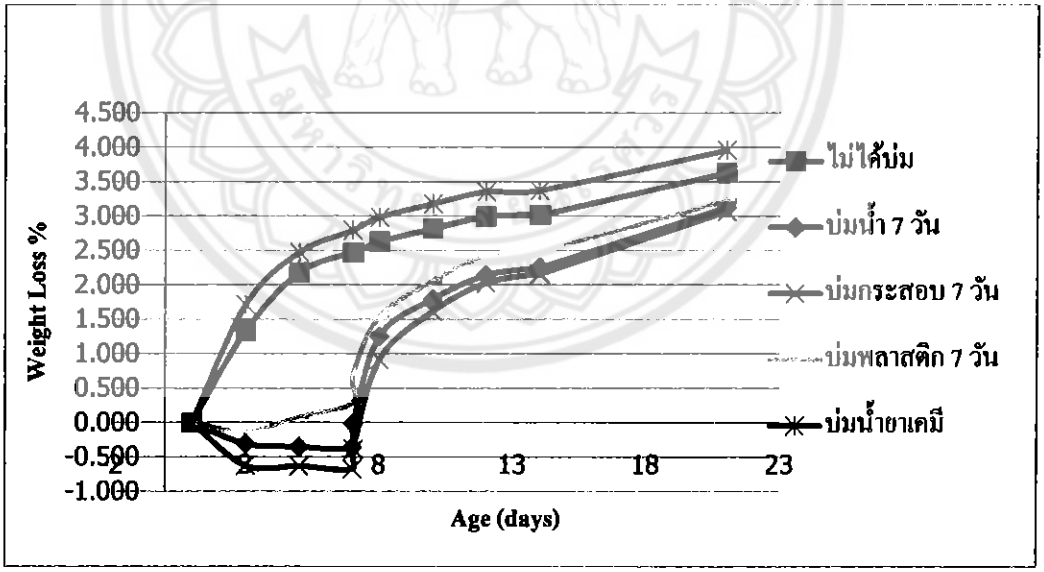
รูปที่ 4.37 ผลของวิธีการบ่มต่อค่าการสูญเสียความชื้นของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



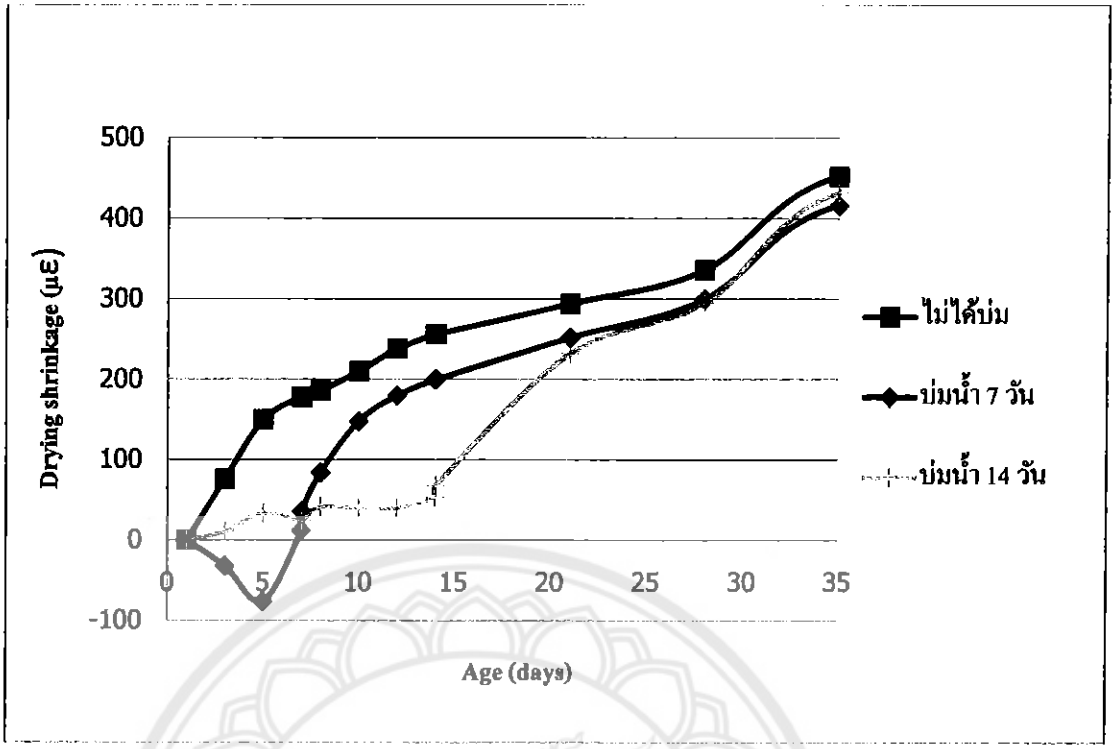
รูปที่ 4.38 ผลของวิธีการบ่มต่อค่าการสูญเสียความชื้นของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยด้วยเถ้าลอย 50%



รูปที่ 4.39 ผลของวิธีการบ่มต่อค่าการสูญเสียความชื้นของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยด้วยผงหินปูน 10%

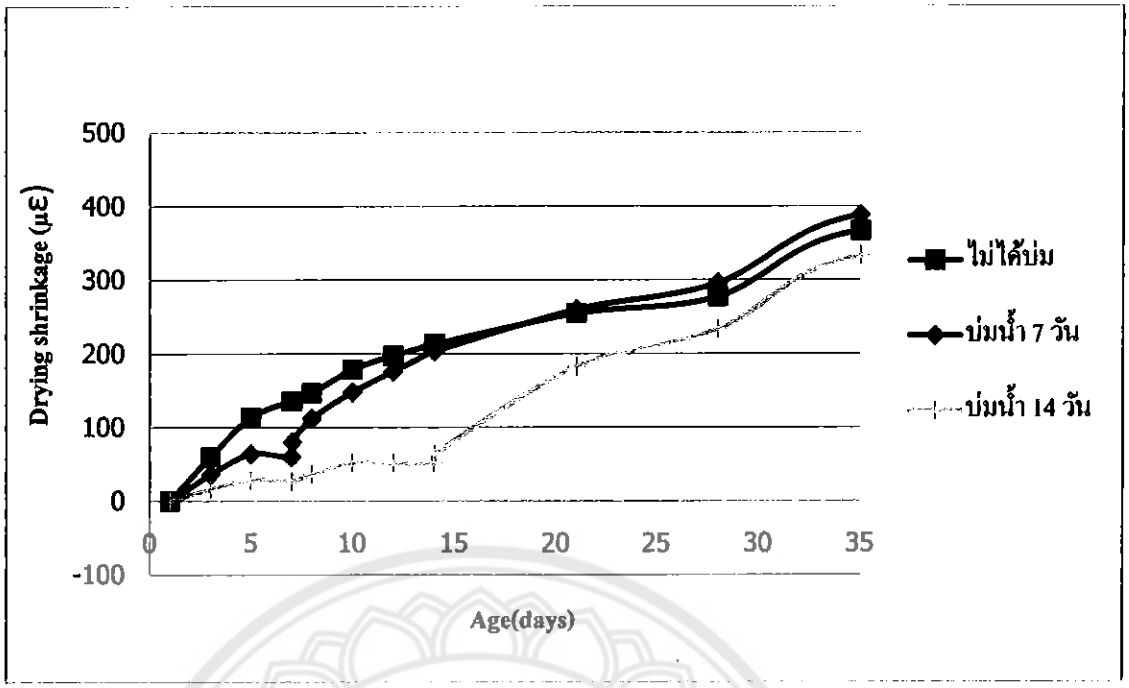


รูปที่ 4.40 ผลของวิธีการบ่มต่อค่าการสูญเสียความชื้นของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา 30%

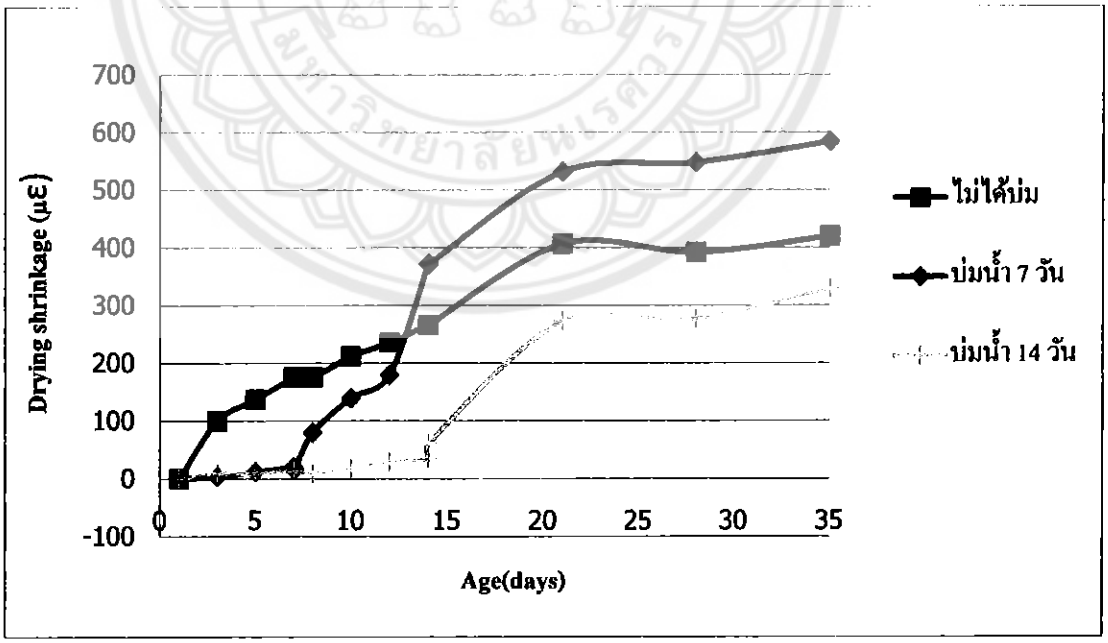


รูปที่ 4.41 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มต่อค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตร เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

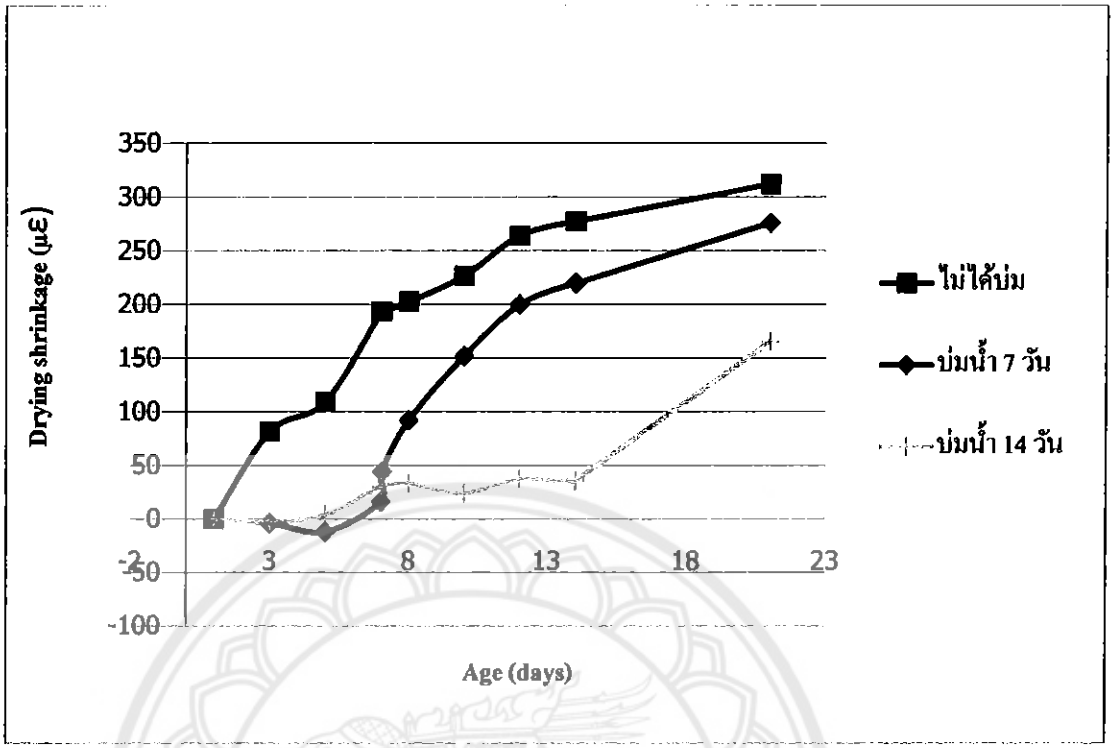
จากรูป 4.42 รูปที่ 4.43 และรูปที่ 4.44 ระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต คอนกรีตระยะเวลาในการบ่มที่นานกว่าจะช่วยลดการแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวแบบแห้งได้ดี และช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ทำให้โครงสร้างของเนื้อซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้น คอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน คอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำ 7 วันหลังจากการบ่มคอนกรีตเกิดการหดตัวมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้บ่ม อาจเป็นเพราะว่า น้ำในช่องว่าง คะปิลลารี่ มากน้ำอิสระในคอนกรีตมาก หลังจากเอาออกจะการบ่มน้ำก็ระเหยออกจากก้อนคอนกรีตได้สะดวก จึงส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งสูงขึ้น



รูปที่ 4.42 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม ต่อค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 50%



รูปที่ 4.43 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มต่อค่าการหดตัวของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยด้วยผงหินปูน 10 %

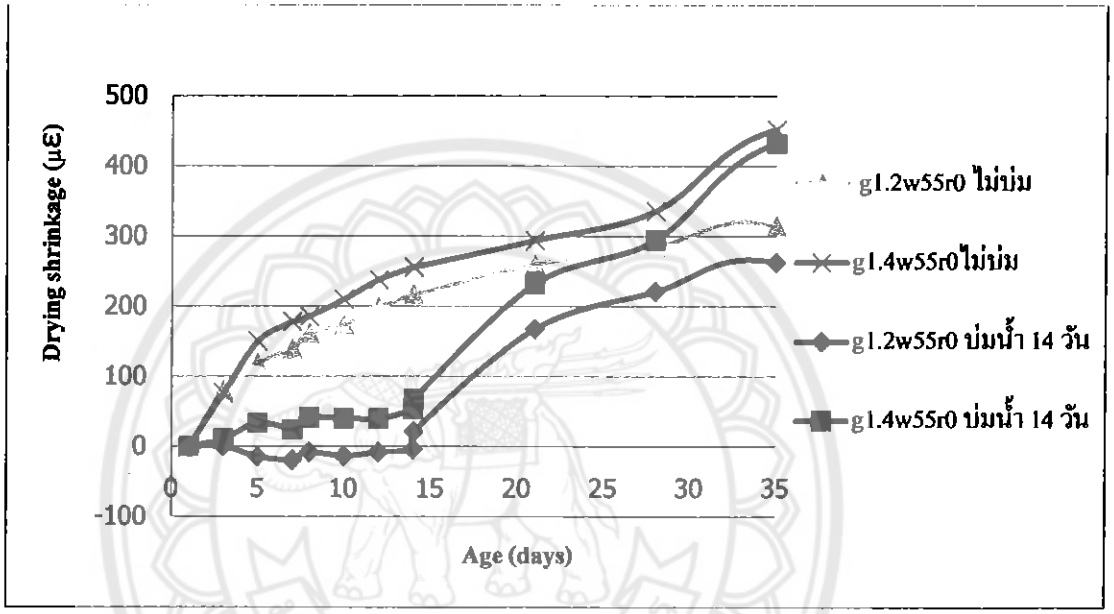


รูปที่ 4.44 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มต่อค่าการหดตัวของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 แทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา 30%

4.2.2 ผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องผลต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

1) ผลของปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม

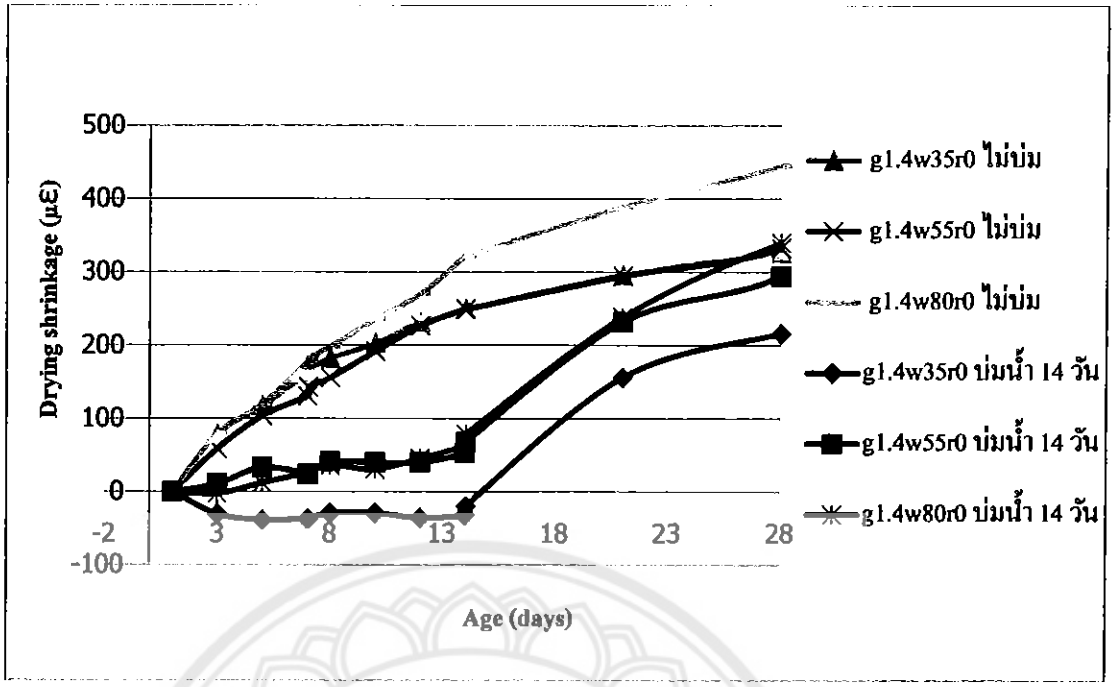
จากรูป 4.45 ผลของปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวมของคอนกรีตจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม 1.4 จะหดตัวแบบแห้งสูงกว่า ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม 1.2 เนื่องมาจากการหดตัวของคอนกรีตนั้นเกิดที่เพสต์



รูปที่ 4.45 ผลของอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น1.2 และ1.4 ต่อการหดตัวแบบแห้งคอนกรีต และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

2) ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)

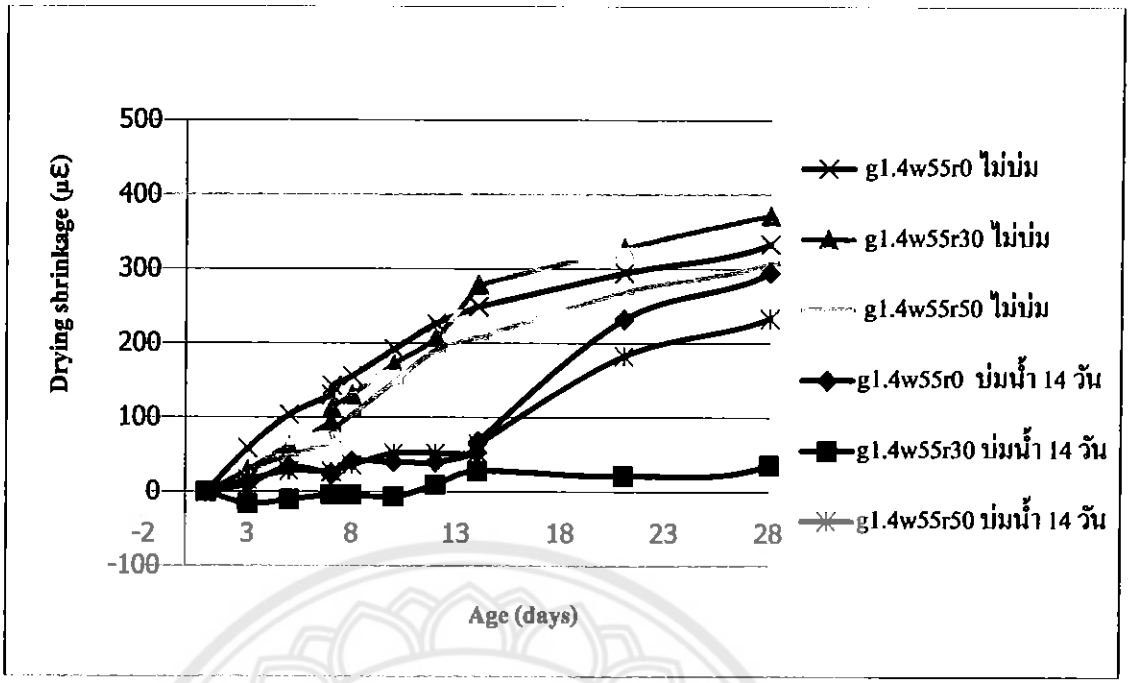
จากรูป 4.46 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน0.80 จะหดตัวแบบแห้งสูงกว่าคอนกรีตอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน0.55 และคอนกรีตอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 ตามลำดับ เนื่องมาจากคอนกรีตอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงจะทำให้มีช่องว่างคะปิลลารี่มาก ปริมาณน้ำอิสระในเนื้อคอนกรีตก็มาก และระเหยออกจากคอนกรีตได้สะดวก จึงทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวแบบแห้ง



รูปที่ 4.46 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35, 0.55 และ 0.80 ต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4

3) ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

จากรูปที่ 4.47 การแทนที่ปูนซีเมนด้วยเถ้าลอยบางส่วนสามารถช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตได้ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมากมีแนวโน้มช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตให้น้อยลง เนื่องจากเถ้าลอยช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีต



รูปที่ 4.47 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

4) ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน

จากรูป 4.48 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนมีแนวโน้มช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตได้เช่นกันเนื่องจากผงหินปูนมีความละเอียดสูงช่วยลดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต มีผลช่วยในการลดการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตได้

รูปที่ 4.48 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน ต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

5) ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน ร่วมกับเถ้าลอย

จากรูป 4.49 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน มีแนวโน้มช่วยลดการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตได้ดีกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยหินปูน เนื่องมาจากเถ้าลอยและผงหินปูนเป็นวัสดุปอซโซลานที่ช่วยลดการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตได้

รูปที่ 4.49 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ผงหินปูน 10% ร่วมด้วยเถ้าลอย 20% **ต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต** อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวล**รวมที่อัดแน่น** 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

6) ผลของการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา

จากรูปที่ 4.50 การแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตามีผลให้คอนกรีตมีแนวโ**น้มเกิดการหดตัวแบบแห้งมากขึ้น** เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนในตัวสูง และเป็นมวลรวมที่**ดูดซึมน้ำสูง ส่งผลให้เกิดการ**หดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองของการศึกษาผลของวิธีการบ่มคอนกรีต 4 วิธีคือ การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำ การบ่มคอนกรีตด้วยกระสอบ การบ่มคอนกรีตด้วยพลาสติก และการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต รวมไปถึงคอนกรีตที่ไม่ได้บ่มต่อกำลังอัดและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต และยังมีปัจจัยที่ศึกษาเพิ่มเติม คือ อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น , อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน , การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน และการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา ซึ่งสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผล

5.1.1 ผลการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต

1) **วิธีการบ่ม** จากผลการทดสอบกำลังอัด ที่อายุคอนกรีต 28 วัน การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำมีแนวโน้มดีกว่าการบ่มด้วยกระสอบ แต่ในโครงงานนี้มีปัญหาเรื่องความชื้นก้อนตัวอย่างที่ไม่ได้ควบคุมให้เท่ากัน การบ่มด้วยน้ำ และกระสอบ มีประสิทธิภาพมากกว่าการบ่มด้วยพลาสติก และน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต

2) **ระยะเวลาบ่ม** กำลังอัดจะสูงขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น บ่มที่ 7 วัน กำลังอัดน้อยกว่าบ่มที่ 14 วัน และ 28 วัน แต่การบ่มด้วยน้ำ และกระสอบ บางสัดส่วนค่ากำลังอัดที่บ่ม 28 วัน น้อยกว่าบ่ม 14 วัน เพราะว่าก้อนคอนกรีตที่ 28 วัน มีความชื้นในก้อนคอนกรีตอยู่ เนื่องจากครบอายุการบ่มที่ 28 วัน แล้วก็นำก้อนคอนกรีตขึ้นมาทดสอบทันที ส่วนการบ่มที่ 14 วัน ก้อนคอนกรีตมีความชื้นน้อยกว่าก้อนคอนกรีตที่บ่ม 28 วัน เนื่องจากการบ่มคอนกรีตที่ 14 วัน พอครบระยะเวลาบ่มที่ 14 วัน แล้วทิ้งไว้ในอากาศอีก 14 วัน พอถึงอายุที่ 28 วันก็นำมาทดสอบ ผลที่ได้ คือ ค่ากำลังอัดที่บ่ม 28 วัน น้อยกว่าบ่ม 14 วัน ซึ่งมีแนวโน้มเกิดจากความชื้นในก้อนคอนกรีตขณะทำการทดสอบ [20]

3) ปัจจัยเพิ่มเติม

- ผลของอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ)

กำลังอัดคอนกรีต จะต่ำลง ถ้าปริมาณเพสต์เพิ่มขึ้น การทดลอง γ =1.2 ซึ่งรับกำลังอัดได้มากกว่า γ =1.4 อย่างไรก็ตามปริมาณเพสต์ที่เหมาะสม จะขึ้นอยู่กับปริมาณช่องว่างมวลรวมที่ใช้ทดสอบด้วย

- ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)

กำลังอัดของคอนกรีตจะสูงขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง

- ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

กำลังอัดที่อายุ 28 วัน จะลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณปูนลดลง ปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกจึงเกิดน้อย แต่ในระยะยาวมีแนวโน้มที่กำลังจะสูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยกำลังจะค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

- ผลของแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน

การแทนที่การแทนที่ด้วยผงหินปูน 10% เป็นปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนที่ 10% สามารถเติมเต็มช่องว่างในคอนกรีตได้ดี ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นขึ้น การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 10% กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา

- ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร่วมกับผงหินปูน

กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุคอนกรีต 28 วัน การแทนที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 20% ร่วมกับผงหินปูน 10% กำลังอัดของคอนกรีตจะต่ำกว่า คอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนเพียงอย่างเดียวหรือต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอย และผงหินปูน

- ผลของการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา

กำลังอัดของคอนกรีต การแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเถ้าก้นเตา ก่อนการทดสอบกำลังอัดต้องมีการเตรียมก้อนตัวอย่างให้สภาพชื้นที่เหมาะสมเพื่อจะได้กำลังอัดที่สูง [20]

5.1.2 ผลการบ่มต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

1) วิธีการบ่ม จากผลการทดสอบ การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำมีแนวโน้มได้ผลดีกว่าการบ่มด้วยกระสอบ และการบ่มด้วยน้ำ และกระสอบ มีประสิทธิภาพมากกว่าการบ่มด้วยพลาสติก และน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีต

2) ระเวลาบ่ม เมื่อบ่มคอนกรีตนานขึ้นการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตก็จะลดลง การหดตัวจะเพิ่มสูงเรื่อยๆอย่างต่อเนื่องเมื่อสิ้นสุดการบ่ม จะเห็นได้ว่า คอนกรีตที่ได้รับการบ่มเป็นเวลานานกว่าจะลดความเสี่ยงที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตได้

3) ปัจจัยเพิ่มเติม

- ผลของอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ)

การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้ γ =1.4 เกิดการหดตัวมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ γ =1.2 เนื่องจากการหดตัวส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่เพสต์ เมื่อเพสต์มากการหดตัวจึงมากขึ้นตามไปด้วย

- ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)

การเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีแนวโน้มทำให้ค่าการหดตัวทั้งหมดของคอนกรีตสูงขึ้น

- ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

การผสมเถ้าลอยแทนปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยลดค่าการหดตัวของคอนกรีตได้ โดยค่าการหดตัวมีแนวโน้มมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น

- ผลของแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน

การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต มีแนวโน้มลดลง เมื่อการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยด้วยผงหินปูนมากขึ้น การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจะช่วยลดการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตได้

- ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร่วมกับผงหินปูน

การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย 20% ร่วมกับผงหินปูน 10% แทนที่ปูนซีเมนต์ มีแนวโน้มหดตัวน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ผงหินปูน 10% ในการแทนที่ปูนซีเมนต์

- ผลของการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาการหดตัวแบบแห้งมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียด ด้วยเถ้าก้นเตา เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูงจึงทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตเกิดการหดตัวแบบแห้งสูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ก่อนเทคอนกรีตลงแบบหล่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 7.5x7.5x 28.5 เซนติเมตร และรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร แล้วทำการสั่นคอนกรีต ควรใช้ดินน้ำมันอุดรอยต่อ เพื่อป้องกันน้ำออกซึ่งจะทำให้ การวัดค่าการหดตัวและน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าที่ถูกต้องเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

2) การตั้งแบบหล่อคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 7.5x7.5x 28.5 เซนติเมตรให้มีความยาวเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ยังไม่ถูกต้องมากนัก เพราะรูของแบบหล่อคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร เกิดการชะรูด ดังนั้นต้องมีการตรวจสอบทุกครั้งก่อนการตั้งแบบหล่อ

3) การเตรียมก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต สำหรับการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำ และกระสอบ ซึ่งคอนกรีตที่บ่มด้วย 2 วิธีนี้ คอนกรีตมีความชื้นมาก ดังนั้นก่อนทดสอบกำลังอัดควรเตรียมก้อนตัวอย่างโดยควรให้ผิวแห้ง ก่อนจะนำมาทดสอบกำลังอัด ซึ่งความชื้นในคอนกรีตทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง [20]

4) ในการวัดค่าการหดตัวของคอนกรีตในแต่ละครั้งด้วย เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงความยาว ควรใช้สามค่าที่ต่ำที่สุดมาเฉลี่ยหาค่าการหดตัวของคอนกรีต เพื่อความแม่นยำของข้อมูลมากยิ่งขึ้น

5) ในการวัดค่าการหดตัวของคอนกรีตบางครั้งเกิดความผิดพลาดเนื่องจาก เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวหลวม ไม่มั่นคงทำให้ค่าการหดตัวของคอนกรีตเกิดการเปลี่ยนแปลง

6) ในการผสมคอนกรีตแต่ละครั้ง ต้องมีการควบคุมอัตราส่วนผสมอย่างเข้มงวดเนื่องจากหากส่วนผสมที่ใช้ไม่ถูกต้องจะทำให้คอนกรีตที่ได้มีคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปอย่างมาก

7) การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำยาเคมีบ่มคอนกรีตควรฉีดให้ความหนาสม่ำเสมอให้ทั่วก้อนตัวอย่างเพื่อการป้องกันการสูญเสียความชื้นให้มีประสิทธิภาพ

8) การบ่มคอนกรีตด้วยพลาสติก ควรระวังมิให้พลาสติกฉีกขาดหรือรูเล็กๆ เพราะจะทำให้การป้องกันการสูญเสียน้ำไม่ได้ผล หรือประสิทธิภาพการบ่มลดลง

เอกสารอ้างอิง

[1] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ , ความคงทนของคอนกรีต , วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ ,2543

[2] คอนกรีตเทคโนโลยี , บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง (CPAC) , 2537

[3] American Society for Testing and materials, ASTM C618-00: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 310-313.

[4] American Society for Testing and materials, ASTM C311-00: Standard Test Methods for sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 2001,Vol. 04.02

[5] กิติพงษ์ ชูเลิศลบธาตรี,ณัฐวุฒิ จิรกาลโสภาสกุล และปิยวัฒน์ ปานท่าไข่,การศึกษาผลของ เถ้าลอยและขนาดของหิน , 2544

[6] MK. Gopolan, and MN . Haque, 1987 , Effect of curing regime on the properties of fly ash Philadelphia, 191-199.concrete,ACI Materials Journal, Vol.84,p.14-19

[7] ปีติ เสรเมธากุล, บุรฉัตร ฉัตรวีระ, สมนึก ตั้งเติมสิริกุล, "การใช้ประโยชน์จากผงหินปูนร่วมกับวัสดุปอซโซลาน" คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

[8] เศกสรรค์ ชูทับทิม ,ผลกระทบของอายุการบ่มที่มีต่อกำลังอัดของมอร ผสมเถ้าถ่านหิน,2539

[9] ทวิช กล้าแท้ และคมสัน มาลีสี ,อิทธิพลของผงหินปูนปรับปรุงคุณสมบัติที่มีผลต่อกำลังอัดละการหดตัวของคอนกรีต,2540

[10] บุรฉัตร ฉัตรวีระ,คุณสมบัติความต้านทานการรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ,

[11] สุรชาติ ภาคภูมิเกียรติคุณ, คุณสมบัติมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมผงหินปูน,2538

[12] American Society for Testing and materials, ASTM C188-95: Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.01, Philadelphia, 179-180.

[14] American Society for Testing and materials, ASTM C128-97: Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 69-73.

[15] American Society for Testing and materials, ASTM C29/C29-M97a: Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, 2001 Vol. 04.02, Philadelphia, 1-4.

[16] American Society for Testing and materials, ASTM C136-96a: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 78-82.

[17] American Society for Testing and materials, ASTM C33-01: Standard Specification for Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, 1997, Vol. 04.02, Philadelphia, 10-17.

[18] ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ,เถ้าลอยในงานคอนกรีต, 2553

[19] American Society for Testing and materials, ASTM C143 / C143M - 10a Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete

[20] คู่มือการบ่มคอนกรีต สคท. 1202-48,สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ค.ท.),2548

[21] คอนกรีตเทคโนโลยี , ชัชวาล เศรษฐบุตร (CPAC) , 2537

[22] รศ.ดร.สมนึก ตั้งเติมสิริกุล,การออกส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย,2542

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ก1 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ มาตรฐาน ASTM C188 [4]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1.ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าซครั้งแรก, มล.	0.3	0
2.อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก , °c	20	20
3.น้ำหนักซีเมนต์และถาดครั้งแรก,ก.	329.3	268.8
4.ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง, มล.	19.5	20.0
5.อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง, °c	20	20
6.น้ำหนักซีเมนต์และถาดครั้งหลัง,ก	268.8	205.8
7.น้ำหนักซีเมนต์ที่ใช้ , ก. (3) - (6)	60.5	63.0
8.ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่,มล (4) – (1)	19.2	20.0
9.ความถ่วงจำเพาะ , (7) / (8)	3.15	3.15
10.ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย	3.15	

ตารางที่ ก2 การหาค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ มาตรฐาน ASTM C29 [7](ครั้งที่1)

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1.น้ำหนักของกระบอกตวง, กก.	9.41	9.41
2.น้ำหนักของกระบอกตวงกับน้ำ, กก.	18.76	18.76
3.น้ำหนักของน้ำที่เติมในกระบอกตวง, กก. (2-1)	9.35	9.35
4.อุณหภูมิน้ำ,° c	30	30
5.ปริมาตรของกระบอกตวง(จากการคำนวณ), ลิตร	9.39	9.39
6.น้ำหนักของกระบอกตวงกับมวลรวม, กก.	23.71	23.74
7.น้ำหนักของมวลรวมในกระบอกตวง, กก. (6-1)	14.31	14.33
8.หน่วยน้ำหนักของมวลรวม , กก./$ม^3$	1522.40	1525.38
9.หน่วยน้ำหนักของมวลรวมเฉลี่ย , กก./$ม^3$	1523.89	

ตารางที่ ก3 การหาค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ มาตรฐาน ASTM C29 [7](ครั้งที่2)

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1.น้ำหนักของกระบอกตวง, กก.	9.40	9.40
2.น้ำหนักของกระบอกตวงกับน้ำ, กก.	18.74	18.76
3.น้ำหนักของน้ำที่เติมในกระบอกตวง, กก. (2-1)	9.34	9.35
4.อุณหภูมิน้ำ,° c	31	31
5.ปริมาตรของกระบอกตวง(จากการคำนวณ), ลิตร	9.38	9.39
6.น้ำหนักของกระบอกตวงกับมวลรวม, กก.	23.65	23.68
7.น้ำหนักของมวลรวมในกระบอกตวง, กก. (6-1)	14.25	14.28
8.หน่วยน้ำหนักของมวลรวม , กก./ม^3	1518.92	1521.19
9.หน่วยน้ำหนักของมวลรวมเฉลี่ย , กก./ม^3	1520.06	

ตารางที่ ก4 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ มาตรฐาน ASTM C127 [5]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. น้ำหนักของหินในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง, กก.	2.29	3.40
2. น้ำหนักของตะกร้าลวดเหล็กในน้ำ, กก.	2.40	2.50
3. น้ำหนักของตะกร้าลวดเหล็กรวมหินในน้ำ, กก.	3.84	4.60
4. น้ำหนักของหินในน้ำ, กก. (3-2)	1.44	2.10
5. น้ำหนักของหินในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ, กก.	2.28	3.38
6. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ	2.68	2.60
7. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง	2.69	2.61
8. ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.72	2.64
9. ร้อยละของการดูดซึม	0.46	0.53

ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ	2.64
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง	2.65
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.68
ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึม	0.49

ตารางที่ ก5 การหาค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด มาตรฐาน ASTM C29 [7]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1.น้ำหนักของกระบอกตวง, กก.	3.98	3.98
2.น้ำหนักของกระบอกตวงกับน้ำ, กก.	6.88	6.88
3.น้ำหนักของน้ำที่เติมในกระบอกตวง, กก. (2-1)	2.90	2.90
4.อุณหภูมิน้ำ,° c	32	32
5.ปริมาตรของกระบอกตวง(จากการคำนวณ), ลิตร	2.91	2.92
6.น้ำหนักของกระบอกตวงกับมวลรวม, กก.	8.69	8.76
7.น้ำหนักของมวลรวมในกระบอกตวง, กก. (6-1)	4.71	4.78
8.หน่วยน้ำหนักของมวลรวม, ก./ม^3	1617.90	1636.93
9.หน่วยน้ำหนักของมวลรวมเฉลี่ย , ก./ม^3	1627.41	

ตารางที่ ก6 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด มาตรฐาน ASTM C128 [6]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. น้ำหนักของกระบอกตวง, กรัม	130.9	132.1
2. น้ำหนักของทรายอิ่มตัวผิวแห้ง, กรัม	500.0	500.0
3. น้ำหนักของกระบอกตวงที่ใส่น้ำและทราย, กรัม	923.5	925.3
4. น้ำหนักของกระบอกตวงที่ใส่น้ำ, กรัม	621.7	622.9
5. น้ำหนักของทรายแห้งด้วยเตาอบ, กรัม	495.5	495.3
6. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ	2.50	2.51
7. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง	2.52	2.53
8. ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.56	2.57
9. ร้อยละของการดูดซึม	0.91	0.95

ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ	2.50
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง	2.52
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.56
ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึม	0.93

ตารางที่ ก7 หาขนาดคละของมวลรวมหยาบ มาตรฐาน ASTM C 33 [9] (ครั้งที่ 1)
น้ำหนักของหินทั้งหมด 8500 กรัม

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	นน. ตะแกรง (กรัม)	นน. ตะแกรง+หิน(กรัม)	นน.ที่ค้างอยู่บนตะแกรง (กรัม)	นน.ค้างสะสมบนตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ค้างบนตะแกรง
1”	1237	1237	0	0	0.00	0.00
3/4”	1275	1725	450	450	5.29	5.29
1/2”	1304	6732	5428	5878	69.15	74.45
3/8”	1285	3139	1854	7732	90.96	165.41
เบอร์ 4	1214	1963	749	8481	99.78	265.19
ถาด	846	865	19	8500	100.00	365.19
รวม	7161	15661	8500		FM=2.65	

ตารางที่ ก8 หาขนาดคละของมวลรวมหยาบ มาตรฐาน ASTM C 33 [9] (ครั้งที่ 2)
น้ำหนักของหินทั้งหมด 8500 กรัม

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	นน. ตะแกรง (กรัม)	นน. ตะแกรง+หิน(กรัม)	นน.ที่ค้างอยู่บนตะแกรง (กรัม)	นน.ค้างสะสมบนตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ค้างบนตะแกรง
1”	1237	1243	6	6	0.07	0.07
3/4”	1276	1827	551	557	6.55	6.62
1/2”	1301	6531	5230	5787	68.08	74.71
3/8”	1288	3274	1986	7773	91.45	166.15
เบอร์ 4	1210	1919	709	8483	99.79	265.94
ถาด	847	865	18	8500	100.00	365.94
รวม	7159	15659	8500		FM=2.66	

ตารางที่ ก9 หาขนาดคละของมวลรวมละเอียด มาตรฐาน ASTM C 136 [8] (ครั้งที่ 1)

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	น้ำหนักตะแกรง (g)	น้ำหนักตะแกรง+ทราย (g)	น้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรง (กรัม)	น้ำหนักค้างสะสมบนตะแกรง(g)	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	512	517	5	5	1.00	1.00
เบอร์ 8	495	511	16	21	3.20	4.20
เบอร์ 16	445	523	78	99	15.61	19.81
เบอร์ 30	429.0	610	181	280	36.21	56.02
เบอร์ 50	395	557	162	442	32.41	88.44
เบอร์ 100	385	434	49	491	9.80	98.24
ฐาด	312	321	9	500	1.80	100.04
รวม	2973	3473	500		100.04	266.71

ค่าโมดูลัสความละเอียด = 2.67

ตารางที่ ก10 หาขนาดคละของมวลรวมละเอียด มาตรฐาน ASTM C 136 [8] (ครั้งที่ 2)

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	น้ำหนักตะแกรง (g)	น้ำหนักตะแกรง+ทราย (g)	น้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรง (กรัม)	น้ำหนักค้างสะสมบนตะแกรง(g)	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	512	520	8	8	1.60	1.60
เบอร์ 8	495	511	16	24	3.20	4.80
เบอร์ 16	445	516	71	95	14.20	19.00
เบอร์ 30	429	620	191	286	38.21	57.21
เบอร์ 50	395	554	159	445	31.81	89.02
เบอร์ 100	385	430	45	490	9.00	98.02
ถาด	312	322	10	500	2.00	100.02
รวม	2973	3473	500		100.02	268.05

ค่าโมดูลัสความละเอียด = 2.68

ตารางที่ ก11 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย มาตรฐาน ASTM C188 [4]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1.ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าซครั้งแรก, มล.	0.3	0.3
2.อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก , ^{o}c	20	20
3.น้ำหนักเถ้าลอยและถาดครั้งแรก,ก.	405.3	356.4
4.ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง, มล.	23.9	23.2
5.อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง, ^{o}c	20	20
6.น้ำหนักเถ้าลอยและถาดครั้งหลัง,ก	356.4	308.6
7.น้ำหนักเถ้าลอยที่ใช้ , ก. (3) - (6)	48.9	47.8
8.ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่,มล (4) – (1)	23.6	22.9
9.ความถ่วงจำเพาะ , (7) / (8)	2.07	2.08
10.ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย	2.07	

ตารางที่ ก12 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของผงหินปูน

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1.ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งแรก, มล.	0.51	0.3
2.อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก , ^{o}c	20	20
3.น้ำหนักเถ้าลอยและถาดครั้งแรก,ก.	294.4	234
4.ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง, มล.	21.7	21.1
5.อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง, ^{o}c	20	20
6.น้ำหนักเถ้าลอยและถาดครั้งหลัง,ก	234	174.7
7.น้ำหนักเถ้าลอยที่ใช้ , ก. (3) - (6)	60.4	59.3
8.ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่,มล (4) – (1)	21.19	20.8
9.ความถ่วงจำเพาะ , (7) / (8)	2.85	2.85
10.ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย	2.85	

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข

ตารางตัวอย่างวัดค่าการหดตัวแบบแห้ง

ตารางที่ ข1 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.2w55r0 (sp=2%)

Age	บ่มด้วยน้ำ				บ่มด้วยพลาสติก				บ่มด้วยกระสอบ			
	7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน	
	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%
1	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
3	5	-0.351	0	-0.295	64	-0.029	68	-0.058	16	-0.464	-1	0.019
5	-3	-0.370	-15	-0.386	104	0.120	100	0.033	7	-0.542	-24	-0.023
7	-5	-0.405	-20	-0.419	121	0.243	115	0.137	15	-0.548	-15	-0.052
7.04	9	-0.340	-19	-0.419	129	0.441	115	0.137	47	-0.490	-15	-0.052
8	55	0.323	-8	-0.435	153	0.706	132	0.186	99	0.129	-8	-0.075
10	99	0.555	-13	-0.462	176	0.836	149	0.252	145	0.383	-16	-0.094
12	135	0.735	-8	-0.476	205	0.959	165	0.323	181	0.570	-5	-0.123
14	159	0.858	-4	-0.457	228	1.058	185	0.392	204	0.701	0	-0.103
14.04	159	0.858	21	-0.302	228	1.058	203	0.651	204	0.701	17	-0.023
21	219	0.958	168	0.577	291	1.122	269	0.907	272	0.822	187	0.862
28	251	1.065	221	0.806	313	1.199	296	1.037	301	0.934	225	1.089
35	285	1.210	263	1.035	348	1.309	328	1.195	336	1.065	260	1.303
49	127	1.489	113	1.379	177	1.570	169	1.479	203	1.363	124	1.659

ตารางที่ ข2 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.2w55r0 (sp=2%)

Age	ไม่บ่ม		Age	บ่มด้วยน้ำยาเคมี	
	0 วัน			1 วัน	
	DS	WL%		DS	WL%
1	0	0.000	1	0	0.000
3	80	0.796	3	17	0.091
5	119	1.078	5	91	0.248
7	139	1.209	7	140	0.403
7.04	139	1.209	8	161	0.471
8	161	1.280	10	177	0.522
10	173	1.317	12	212	0.595
12	199	1.395	14	235	0.659
14	217	1.459	21	269	0.652
14.04	217	1.459	28	280	0.724
21	260	1.481	35	335	0.787
28	285	1.527	49	189	1.028
35	315	1.583			
49	156	1.811			

ตารางที่ ข3 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w35r0 (sp=2%)

Age	บ่มด้วยน้ำ				บ่มด้วยพลาสติก				บ่มด้วยกระสอบ			
	7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน	
	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%
1	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
3	5	-0.237	-31	-0.230	79	-0.126	75	-0.089	-21	-0.303	-31	-0.291
5	-3	-0.297	-39	-0.322	117	-0.042	113	0.009	-61	-0.363	-47	-0.356
7	-5	-0.354	-37	-0.383	163	0.007	156	0.062	-12	-0.393	-64	-0.387
7.04	9	-0.247	-37	-0.383	167	0.226	156	0.062	24	-0.318	-64	-0.387
8	55	-0.056	-29	-0.385	183	0.298	180	0.083	73	-0.155	-69	-0.412
10	99	0.038	-29	-0.434	203	0.330	184	0.100	132	-0.060	-69	-0.447
12	135	0.173	-36	-0.442	232	0.444	216	0.160	176	0.056	-59	-0.462
14	159	0.207	-32	-0.477	249	0.467	237	0.186	196	0.086	-60	-0.492
14.04	159	0.207	-20	-0.421	249	0.467	232	0.363	196	0.086	-44	-0.452
21	219	0.224	156	-0.088	296	0.465	288	0.386	260	0.107	139	-0.210
28	251	0.251	216	0.000	327	0.482	321	0.416	285	0.136	189	-0.123
35	285	0.347	252	0.141	351	0.557	341	0.523	315	0.212	228	0.005
49	127	0.510	340	0.334	427	0.709	416	0.698	403	0.372	308	0.200

ตารางที่ ข4 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w35r0 (sp=2%)

Age	ไม่บ่ม		Age	บ่มด้วยน้ำยาเคมี	
	0 วัน			1 วัน	
	DS	WL%		DS	WL%
1	0	0.000	1	0	0.000
3	112	0.303	3	129	0.267
5	147	0.472	5	175	0.462
7	192	0.545	7	216	0.528
7.04	192	0.545	8	224	0.546
8	201	0.559	10	231	0.551
10	216	0.565	12	272	0.629
12	248	0.645	14	281	0.638
14	261	0.654	21	316	0.626
14.04	261	0.654	28	331	0.638
21	301	0.643	35	369	0.701
28	377	0.653	49	488	0.835
35	391	0.726			
49	473	0.858			

ตารางที่ ข5 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r0 (sp=2%)

Age	บ่มด้วยน้ำ				บ่มด้วยพลาสติก				บ่มด้วยกระสอบ			
	7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน	
	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%
1	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
3	-25	-0.331	11	-0.355	59	0.056	45	0.029	-65	-0.647	-51	-0.655
5	-47	-0.386	33	-0.400	104	0.182	89	0.130	-43	-0.734	-53	-0.780
7	8	-0.417	24	-0.359	131	0.269	111	0.200	-9	-0.762	-51	-0.825
7.04	25	-0.279	24	-0.359	143	0.495	111	0.200	27	-0.629	-51	-0.825
8	60	0.242	41	-0.357	156	0.670	125	0.228	93	-0.080	-7	-0.818
10	100	0.674	40	-0.377	192	0.938	153	0.320	149	0.315	-1	-0.877
12	121	0.801	40	-0.397	227	1.038	173	0.382	183	0.462	12	-0.904
14	139	0.814	53	-0.409	249	1.027	192	0.401	209	0.499	21	-0.914
14.04	139	0.814	68	-0.335	249	1.027	220	0.655	209	0.499	35	-0.855
21	173	1.009	232	0.680	295	1.149	264	0.996	263	0.693	183	0.166
28	209	1.121	295	0.917	333	1.227	304	1.110	305	0.823	232	0.391
35	285	1.368	432	1.258	447	1.437	439	1.380	439	1.066	436	0.707
49	293	1.612	456	1.574	459	1.627	445	1.619	440	1.346	453	1.046

ตารางที่ ข6 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r0 (sp=2%)

Age	ไม่บ่ม		Age	บ่มด้วยน้ำยาเคมี	
	0 วัน			1 วัน	
	DS	WL%		DS	WL%
1	0	0.000	1	0	0.000
3	76	1.155	3	53	0.664
5	150	1.379	5	111	0.948
7	178	1.465	7	137	1.059
7.04	178	1.465	8	149	1.082
8	186	1.497	10	185	1.233
10	210	1.634	12	197	1.282
12	238	1.674	14	221	1.259
14	256	1.652	21	235	1.338
14.04	256	1.652	28	247	1.391
21	294	1.726	35	403	1.568
28	336	1.757	49	469	1.730
35	452	1.930			
49	468	2.095			

ตารางที่ ข7 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w80r0 (sp=2%)

Age	บ่มด้วยน้ำ				บ่มด้วยพลาสติก				บ่มด้วยกระสอบ			
	7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน	
	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%
1	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
3	-56	-0.104	-3	-0.114	7	-0.003	27	-0.066	-16	-0.503	-15	-0.518
5	-72	-0.151	12	-0.167	15	0.156	29	0.064	-41	-0.518	-39	-0.532
7	25	-0.165	25	-0.174	107	0.310	47	0.196	-8	-0.529	-13	-0.551
7.04	41	-0.011	25	-0.174	69	0.593	47	0.196	11	-0.453	-13	-0.551
8	81	1.462	36	-0.182	199	1.166	57	0.264	55	0.824	-11	-0.571
10	127	1.955	31	-0.228	236	1.581	81	0.396	95	1.592	0	-0.611
12	164	2.105	45	-0.226	271	1.678	109	0.451	133	1.784	16	-0.647
14	200	2.236	64	-0.244	323	1.888	133	0.522	173	1.933	32	-0.620
14.04	200	2.236	79	-0.152	323	1.888	145	0.788	173	1.933	52	-0.537
21	276	2.706	239	2.279	389	2.282	232	1.883	231	2.378	173	1.606
28	348	2.882	340	2.694	445	2.408	269	2.010	292	2.598	237	1.837
35	408	3.246	403	3.097	524	2.843	372	2.629	360	2.890	309	2.412
49	501	3.953	519	3.947	677	3.583	465	3.448	464	3.646	421	3.304

ตารางที่ ข8 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w80r0 (sp=2%)

Age	ไม่บ่ม		Age	บ่มด้วยน้ำยาเคมี	
	0 วัน			1 วัน	
	DS	WL%		DS	WL%
1	0	0.000	1	0	0.000
3	40	2.233	3	48	2.085
5	85	2.619	5	79	2.423
7	127	2.862	7	125	2.687
7.04	127	2.862	8	149	2.788
8	145	2.978	10	176	2.872
10	175	3.071	12	209	2.861
12	196	3.050	14	231	2.869
14	223	3.068	21	283	2.983
14.04	223	3.068	28	307	3.032
21	265	3.174	35	408	3.207
28	319	3.248	49	489	3.734
35	361	3.430			
49	441	3.960			

ตารางที่ ข9 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r30 (sp=2%)

Age	บ่มด้วยน้ำ				บ่มด้วยพลาสติก				บ่มด้วยกระสอบ			
	7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน	
	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%
1	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
3	16	-0.087	-16	-0.196	29	-0.022	120	-0.023	48	-0.630	-41	-0.607
5	132	-0.165	-11	-0.266	63	0.111	141	0.104	42	-0.700	-65	-0.645
7	140	-0.188	-4	-0.315	95	0.235	181	0.222	68	-0.715	-21	-0.661
7.04	164	-0.032	-4	-0.315	113	0.531	181	0.222	96	-0.586	-21	-0.661
8	192	1.042	-7	-0.365	131	0.920	192	0.275	140	0.407	-16	-0.676
10	234	1.246	9	-0.380	172	1.050	224	0.318	186	0.676	3	-0.721
12	272	1.406	28	-0.442	208	1.173	249	0.379	228	0.856	20	-0.752
14	296	1.620	21	-0.445	279	1.297	269	0.453	256	1.055	71	-0.739
14.04	296	1.620	36	-0.354	279	1.297	277	0.699	256	1.055	84	-0.653
21	344	1.898	160	1.228	328	1.529	345	1.284	306	1.345	211	0.789
28	388	2.103	216	1.581	372	1.739	395	1.547	344	1.542	309	1.133
35	422	2.236	261	1.760	409	1.872	432	1.730	390	1.710	356	1.349
49	474	3.007	319	2.612	447	2.676	479	2.582	442	2.573	411	2.240

ตารางที่ ข10 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r30 (sp=2%)

Age	ไม่บ่ม		Age	บ่มด้วยน้ำยาเคมี	
	0 วัน			1 วัน	
	DS	WL%		DS	WL%
1	0	0.000	1	0	0.000
3	69	1.878	3	28	1.635
5	119	2.183	5	88	1.970
7	157	2.351	7	117	2.142
7.04	157	2.351	8	117	2.169
8	167	2.379	10	145	2.164
10	188	2.337	12	175	2.181
12	211	2.368	14	232	2.230
14	233	2.437	21	273	2.304
14.04	233	2.437	28	323	2.385
21	268	2.513	35	396	2.460
28	304	2.604	49	417	3.196
35	333	2.673			
49	397	3.308			

ตารางที่ ข11 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r50 (sp=2%)

Age	บ่มด้วยน้ำ				บ่มด้วยพลาสติก				บ่มด้วยกระสอบ			
	7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน	
	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%
1	0	0	0	0	0	0.000	0	0.000	0	0.00	0	0.000
3	38.6	-0.174	16	-0.204	28	-0.070	47	-0.105	27	-0.64	-21	-0.633
5	49.3	-0.316	28	-0.318	49	0.097	57	0.037	19	-0.71	-12	-0.705
7	56	-0.371	26.66	-0.376	67	0.221	73	0.146	37	-0.73	-15	-0.763
7.04	73.3	-0.268	26.66	-0.376	83	0.477	73	0.146	55	-0.64	-15	-0.763
8	104	0.735	36	-0.422	104	0.813	85	0.175	84	-0.04	-4	-0.793
10	140	1.335	52	-0.454	148	1.274	109	0.236	123	0.80	8	-0.829
12	166.7	1.603	52	-0.489	191	1.534	135	0.319	163	1.12	5	-0.829
14	196	1.846	52	-0.511	208	1.748	149	0.421	200	1.40	9	-0.828
14.04	196	1.846	64	-0.452	208	1.748	160	0.677	200	1.40	27	-0.756
21	254.7	2.098	182.66	1.431	269	1.964	248	1.432	252	1.70	151	0.931
28	292	2.345	233.33	1.830	308	2.198	289	1.762	297	1.94	199	1.334
35	380	2.467	333.33	2.011	400	2.318	371	1.923	389	2.08	300	1.542
49	384	3.123	332	2.774	396	3.026	380	2.720	392	2.85	312	2.450

ตารางที่ ข12 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r50 (sp=2%)

Age	ไม่บ่ม		Age	บ่มด้วยน้ำยาเคมี	
	0 วัน			1 วัน	
	DS	WL%		DS	WL%
1	0	0	1	0	0.000
3	60	2.33	3	-12	2.076
5	113.3	2.785	5	24	2.627
7	136	2.929	7	75	2.820
7.04	136	2.929	8	91	2.826
8	146.7	2.91	10	136	2.848
10	178.7	2.935	12	165	2.893
12	197.3	2.987	14	200	2.963
14	213.3	3.046	21	216	3.022
14.04	213.3	3.046	28	252	3.127
21	254.7	3.095	35	405	3.175
28	277.3	3.2	49	368	3.763
35	366.7	3.242			
49	353.3	3.745			

ตารางที่ ข13 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55LP10 (sp=2%)

Age	บ่มด้วยน้ำ				บ่มด้วยพลาสติก				บ่มด้วยกระสอบ			
	7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน	
	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%
1	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
3	7	-0.253	9	-0.258	153	-0.082	80	-0.126	135	-0.460	23	-0.536
5	12	-0.307	9	-0.313	177	0.004	105	-0.038	193	-0.553	-25	-0.616
7	16	-0.341	15	-0.343	201	0.094	133	0.034	256	-0.620	17	-0.649
7.04	20	-0.286	15	-0.343	213	0.370	133	0.034	275	-0.564	17	-0.649
8	73	0.479	9	-0.344	225	0.697	165	0.063	317	0.055	171	-0.658
10	135	0.972	17	-0.340	263	0.949	195	0.155	379	0.539	188	-0.667
12	171	1.111	29	-0.380	295	1.067	219	0.209	408	0.688	203	-0.680
14	260	1.264	35	-0.392	327	1.170	243	0.271	447	0.841	212	-0.682
14.04	260	1.264	61	-0.300	327	1.170	255	0.572	447	0.841	228	-0.611
21	412	1.751	273	1.230	460	1.573	403	1.353	580	1.335	455	0.870
28	412	2.342	277	2.041	441	2.110	393	2.043	565	1.947	451	1.589
35	448	2.560	329	2.284	475	2.272	432	2.261	600	2.165	524	1.898

ตารางที่ ข14 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55LP10 (sp=2%)

Age	ไม่บ่ม		Age	บ่มด้วยน้ำยาเคมี	
	0 วัน			1 วัน	
	DS	WL%		DS	WL%
1	0	0.000	1	0	0.000
3	100	1.183	3	75	1.274
5	137	1.488	5	128	1.517
7	176	1.606	7	168	1.621
7.04	176	1.606	8	181	1.652
8	176	1.652	10	195	1.748
10	212	1.763	12	225	1.778
12	236	1.795	14	256	1.816
14	267	1.843	21	432	2.073
14.04	267	1.843	28	416	2.541
21	407	2.128	35	381	2.697
28	392	2.586	49		
35	420	2.752			

ตารางที่ ข15 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55BA30 (sp=2%)

Age	บ่มด้วยน้ำ				บ่มด้วยพลาสติก				บ่มด้วยกระสอบ			
	7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน	
	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%
1	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
3	79	-0.305	79	-0.281	113	-0.129	113	-0.089	93.333	-0.622	91	-0.534
5	-9	-0.352	4	-0.329	39	0.084	55	0.146	2.6667	-0.630	20	-0.636
7	17	-0.360	31	-0.343	109	0.280	135	0.347	41.333	-0.672	52	-0.658
7.04	51	-0.010	31	-0.343	132	0.718	135	0.347	72	-0.385	52	-0.658
8	85	1.252	-1	-0.358	147	1.535	135	0.499	122.67	0.915	33	-0.623
10	137	1.793	23	-0.395	167	2.057	159	0.682	158.67	1.614	39	-0.675
12	184	2.141	15	-0.396	213	2.420	193	0.887	204	2.026	43	-0.656
14	203	2.250	36	-0.461	239	2.487	224	0.978	225.33	2.161	56	-0.692
14.04	203	2.250	56	-0.143	239	2.487	215	1.324	225.33	2.161	67	-0.435
21	248	3.127	165	2.793	276	3.224	253	3.069	318.67	3.070	163	2.364

ตารางที่ ข16 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55BA30 (sp=2%)

Age	ไม่บ่ม		Age	บ่มด้วยน้ำยาเคมี	
	0 วัน			1 วัน	
	DS	WL%		DS	WL%
1	0	0.000	1	0	0.000
3	143	1.293	3	123	1.712
5	109	2.166	5	93	2.472
7	193	2.468	7	191	2.794
7.04	193	2.468	8	173	2.984
8	203	2.627	10	235	3.181
10	227	2.830	12	249	3.355
12	264	3.010	14	279	3.375
14	277	3.045	21	307	3.961
14.04	277	3.045	28		
21	312	3.685	35		

ตารางที่ ข17 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r20LP10 (sp=2%)

Age	บ่มด้วยน้ำ				บ่มด้วยพลาสติก				บ่มด้วยกระสอบ			
	7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน		7 วัน		14 วัน	
	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%	DS	WL%
1	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0
3	-19	-0.180	24	-0.194	55	-0.186	11	-0.132	-31	-0.484	-68	-68
5	-11	-0.230	49	-0.253	68	-0.161	27	-0.044	-75	-0.588	-107	-107
7	-11	-0.250	51	-0.286	97	-0.041	40	0.044	-41	-0.607	-68	-68
7.04	5	-0.159	51	-0.286	111	0.320	40	0.044	-19	-0.502	-68	-68
8	44	0.998	39	-0.303	139	0.982	48	0.100	31	0.547	-63	-63
10	85	1.349	61	-0.360	175	1.279	69	0.176	63	0.921	-47	-47
12	123	1.593	75	-0.392	211	1.478	93	0.264	112	1.194	-35	-35
14	152	1.843	69	-0.463	235	1.683	107	0.363	135	1.434	-37	-37
14.04	152	1.843	107	-0.217	235	1.683	131	0.723	135	1.434	-11	-11
21	193	2.249	220	1.678	272	2.051	197	1.738	173	1.871	96	96
28	300	2.829	313	2.486	341	2.611	275	2.496	260	2.478	188	188
35	280	3.012	345	2.752	360	2.809	303	2.735	268	2.700	204	204