การศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ผสมผงจุลินทรีย์โดยวิธีการบ่มไอน้ำแรงดันต่ำ

โดย

พีระพงษ์ เพ็ชรพัน

สนับสนุนงบประมาณโดย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ประจำปีงบประมาณ 2558

A study the mechanical properties of concrete mixed microorganisms. By means of low pressure steam curing.

By

PHIRAPHONG PHATPUN

Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2015

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงบรรลุผลตามวัตถุประสงค์ได้ด้วยดีนั้น ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สำเริง รักซ้อน ที่ให้ความช่วยเหลือคณะผู้จัดทำให้คำปรึกษาแนะนำ ให้ข้อคิดเห็น ช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ดูแลการดำเนินการจัดทำ ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ ของงานวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ สำนักงานวิจัยแห่งชาติที่พิจารณาอนุมัติการจัดทำโครงการวิจัยเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ผสมผงจุลินทรีย์ โดยวิธีการบ่มไอน้ำแรงดันต่ำ และขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินท์ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย และได้รับการอำนวยความสะดวกในด้านสถานที่และอุปกรณ์ในการจัดทำวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา เพื่อน ๆ ของข้าพเจ้า ที่ให้กำลังใจและทำให้โครงการวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

พีระพงษ์ เพ็ชรพันธ์
รัฐศักดิ์ พรหมมาศ
อรรถพล มาลัย
กันยายน 2558

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : A-26/2558
ชื่อโครงการ : การศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ผสมผงจุลินทรีย์ โดยวิธีการบ่มไอน้ำแรงดันต่ำ
ชื่อผู้จัดทำ : นายพีระพงษ์ เพ็ชรพัน
ดร.รัฐศักดิ์ พรหมมาศ
ผศ.อรรถพล มาลัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ โดยวิธีบ่มไอน้ำโดย มีตัวแปรในการทดสอบ คือ ปริมาณผงจุลินทรีย์แทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุ ในการบ่มคอนกรีตแบ่งออกเป็นวิธีบ่มปกติและวิธีบ่มไอน้ำ ทำการทดสอบหาค่ากำลังอัดที่อายุ 3 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน

จากผลการทดสอบ โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm พบว่าค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตทั้ง 2 วิธี เมื่อนำผลการทดสอบคอนกรีตการบ่มแบบปกติและแบบการบ่มไอน้ำมาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยวิธีการบ่มไอน้ำมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าการบ่มแบบปกติ ตามระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต โดยมีค่าเฉลี่ยที่เพิ่มมากขึ้นโดยประมาณ 28-30 เปอร์เซ็นต์ ของค่ากำลังอัดโดยวิธีการบ่มแบบปกติ เมื่อนำใช้ผงจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพเข้าแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับพบว่าคอนกรีตมีการพัฒนาด้านกำลังอัดที่เพิ่มมากขึ้นตามลำดับในอัตราส่วนการแทนที่ ทั้ง 2 แบบวิธีการบ่มคอนกรีต

คำสำคัญ : “คอนกรีต” “อบไอน้ำ” “จุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ”

E-mail Address : AUI_08@live.com
ระยะเวลาโครงการ : 1 ตุลาคม 2557 - 30 กันยายน 2558

Abstract

Code of project : A-26/2558

Project name : A study the mechanical properties of concrete mixed microorganisms. By means of low pressure steam curing.

Researcher name : Mr. Phiraphong Phatpun
Dr. Ratthasak Prommas
Prof. Attapole Malai

This research aims to study the mechanical properties of the concrete mix microorganisms. By curing steam There are variables to test the amount of microbial powder instead of cement. The ratio of 0, 1, 2, 3, 4 and 5 by weight of material. There are ways of curing concrete curing normal and steam curing. Test for compressive strength at age 3 days, 7 days, 14 days and 28 days.

From the test results Using the example cylindrical Diameter 10 cm high 20 cm found the strength to rise. By The incubation period in a concrete way, when the second test concrete curing normal and steam curing compared. It is seen that the compressive strength of concrete by means of steam curing the compressive strength greater than normal incubation. Following a period of curing concrete. The average increase by approximately 28-30 percent of compression by means of conventional breeding. When using powdered bacteria effective to replace cement in the ratio of 0, 1, 2, 3, 4 and 5, respectively, found that the concrete has developed a compressive strength greater, respectively, in proportion to replace the two series. How curing concrete.

Keywords : “Concret” “Steam curing” “Effective Microorganisms”

E-mail Address : AUI_08@live.com

Period of project : 1 October 2014 – 30 September 2015

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญ(ต่อ)	จ
สารบัญ(ต่อ)	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญตาราง(ต่อ)	ซ
สารบัญภาพ	ฌ
สารบัญภาพ(ต่อ)	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์	5
2.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	5
2.3 ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ	7
2.4 แคลเซียมซิลิเกต	7
2.5 แคลเซียมอลูมิเนตและเฟอร์ไรต์	8
2.6 ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ	9
2.7 EM หรือ Effective Microorganisms	10
2.7.1 จุลินทรีย์แบบน้ำ	11
2.7.2 จุลินทรีย์แบบผง	11

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.8 โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์	11
2.9 ระยะเวลาของการบ่ม	12
2.10 การบ่มโดยการป้องกันการสูญเสียน้ำ	14
2.11 แผ่นกันความชื้น	14
2.12 สารบ่มคอนกรีต	14
2.13 การบ่มอุณหภูมิ	15
2.14 การบ่มไอน้ำ	16
2.15 การบ่มและการป้องกันคอนกรีตสด	16
2.16 การทำงานของหม้อไอน้ำ	17
2.17 ลักษณะของบอยเลอร์	17
2.18 การแบ่งประเภทของหม้อไอน้ำ	18
2.19 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ(information)ที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย	21
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	22
3.2 การศึกษาคุณสมบัติกายภาพของวัสดุ	22
3.2.1 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และผงจุลินทรีย์	22
3.2.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวม	24
3.2.3 การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักมวลรวม	25
3.2.4 การหาขนาดคละ และค่า F.M.ของทราย	27
3.3 สร้างอุปกรณ์ต้นแบบถังบ่มไอน้ำ	27
3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างถังบ่มไอน้ำ	27
3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ	28
3.4 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตและการทดสอบคุณสมบัติกำลังอัดของคอนกรีต	28
3.4.1 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยวิธี (ACI)	28
3.4.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	29
3.5 การทดสอบตัวอย่างคอนกรีต	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	**31**
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ	31
4.1.1 การหาค่าความถ่างจำเพาะของปูนซีเมนต์และผงจุลินทรีย์	31
4.1.2 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวม	32
4.1.3 การหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวม	33
4.1.4 การหาขนาดคละและค่า F.M. ของทราย	33
4.2 ผลการทดสอบหาค่าต้านทานกำลังอัดของคอนกรีต	34
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	**68**
5.1 สรุปผลการวิจัย	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
บรรณานุกรม	**70**
ภาคผนวก	**72**
ประวัติผู้จัดทำ	**81**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

1-1 แผนการดำเนินการ 4

2-1 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่น ๆของปูนซีเมนต์ประเภทที่1 ถึง 5 7

4-1 ผลการหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ 32

4-2 ผลการหาค่าความถ่วงจำเพาะของจุลินทรีย์ 32

4-3 ผลการหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลละเอียด 33

4-4 ผลการหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลหยาบ 33

4-5 ผลการหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด 34

4-6 ผลหารหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ 34

4-7 ผลการหาขนาดคละและค่า F.M. ของทราย 34

4-8 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 0% ที่อายุการบ่ม 3 วัน 35

4-9 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 0% ที่อายุการบ่ม 7 วัน 36

4-10 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 0% ที่อายุการบ่ม 14 วัน 37

4-11 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 0% ที่อายุการบ่ม 28 วัน 38

4-12 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 1% ที่อายุการบ่ม 3 วัน 40

4-13 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 1% ที่อายุการบ่ม 7 วัน 41

4-14 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 1% ที่อายุการบ่ม 14 วัน 42

4-15 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 1% ที่อายุการบ่ม 28 วัน 43

4-16 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 2% ที่อายุการบ่ม 3 วัน 45

4-17 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 2% ที่อายุการบ่ม 7 วัน 46

4-18 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 2% ที่อายุการบ่ม 14 วัน 47

4-19 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 2% ที่อายุการบ่ม 28 วัน 48

4-20 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 3% ที่อายุการบ่ม 3 วัน 50

4-21 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 3% ที่อายุการบ่ม 7 วัน 51

4-22 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 3% ที่อายุการบ่ม 14 วัน 52

4-23 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 3% ที่อายุการบ่ม 28 วัน 53

4-24 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 4% ที่อายุการบ่ม 3 วัน 55

4-25 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 4% ที่อายุการบ่ม 7 วัน 56

4-26 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 4% ที่อายุการบ่ม 14 วัน 57

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่

4-27 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 4% ที่อายุการบ่ม 28 วัน 58
4-28 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 5% ที่อายุการบ่ม 3 วัน 60
4-29 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน 61
4-30 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 5% ที่อายุการบ่ม 14 วัน 62
4-31 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 5% ที่อายุการบ่ม 28 วัน 63
4-32 ผลกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยวิธีบ่มปกติ 65
4-33 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยวิธีบ่มไอน้ำ 67

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

1-1 กำลังอัดของคอนกรีตที่ W/C = 0.5 และการบ่มต่างๆ 2

2-1 ภาพถ่าย SEM โครงสร้างของวัสดุผสมเพียโซอิเลกทริกปูนซีเมนต์ 5

2-2 แสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ 9

2-3 ภาพถ่ายขยายโดย SME ของซีเมนต์เพสต์ 13

2-4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ W/C = 0.5 และการบ่มต่างกัน การบ่มปกติ 14

2-5 ขั้นตอนการเกิดผลิตผลของปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ 14

2-6 แสดงลักษณะของบอยเลอร์ 19

3-1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน 22

3-2 แสดงตู้บ่มคอนกรีต 29

3-3 วิธีการทดสอบคอนกรีต 31

4-1 กราฟเปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตบ่มปกติและบ่มไอน้ำที่ผสมผงจุลินทรีย์ 0 % 39

4-2 กราฟเปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตบ่มปกติและบ่มไอน้ำที่ผสมผงจุลินทรีย์ 1 % 44

4-3 กราฟเปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตบ่มปกติและบ่มไอน้ำที่ผสมผงจุลินทรีย์ 2 % 49

4-4 กราฟเปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตบ่มปกติและบ่มไอน้ำที่ผสมผงจุลินทรีย์ 3 % 54

4-5 กราฟเปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตบ่มปกติและบ่มไอน้ำที่ผสมผงจุลินทรีย์ 4 % 59

4-6 กราฟเปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตบ่มปกติและบ่มไอน้ำที่ผสมผงจุลินทรีย์ 5 % 64

4-7 กราฟเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ในอัตราส่วนต่างๆ โดยวิธีบ่มกติ 65

4-8 กราฟเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ในอัตราส่วนต่างๆ โดยวิธีบ่มไอน้ำ 67

ก-1 เครื่องชั่งน้ำหนัก 73

ก-2 แบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอก 73

ก-3 เครื่องบ่มคอนกรีต 74

ก-4 เครื่องอบไล่ความชื้น 74

ก-5 เครื่องมือผสมคอนกรีต 75

ก-6 หม้อต้มกำมะถัน 75

ก-7 เครื่องทดสอบกำลังอัด 76

ก-8 ผสมคอนกรีต 76

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่

ก-9 นำคอนกรีตใส่ใน Mold 77
ก-10 ตัวอย่างการทดสอบก่อนการนำไปบ่ม 77
ก-11 การบ่มตัวอย่างทดสอบ 78
ก-12 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบ 78
ก-13 วัดขนาดตัวอย่างทดสอบ 79
ก-14 เคลือบผิวหน้าตัวอย่างทดสอบด้วยกำมะถัน 79
ก-15 นำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัด 80

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
C_3S	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
C_2S	ไดรแคลเซียมซิลิเกต
C_3A	ไตรแคลเซียมอลูมิเนต
C_4AF	เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรด์
mm	มิลลิเมตร
^oC	องศาเซลเซียส
T	ตัน
ml	มิลลิลิตร
g	กรัม
J	จูล
cm^2	ตารางเมตร
kg	กิโลกรัม
cm	เซนติเมตร
m^3	ลูกบาศก์เมตร
ww	น้ำหนักเฉพาะในกระบอกตวง
γw	หน่วยน้ำหนักของน้ำที่อุณหภูมิขณะนั้น
V	ปริมาตรของกระบอกตวง
γt	หน่วยน้ำหนักของมวลรวม
W	หน่วยน้ำหนักของมวลรวม
Gd	ความถ่วงจำเพาะมวลรวมในสภาพแห้ง
kN	กิโลนิลตัน
ksc	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

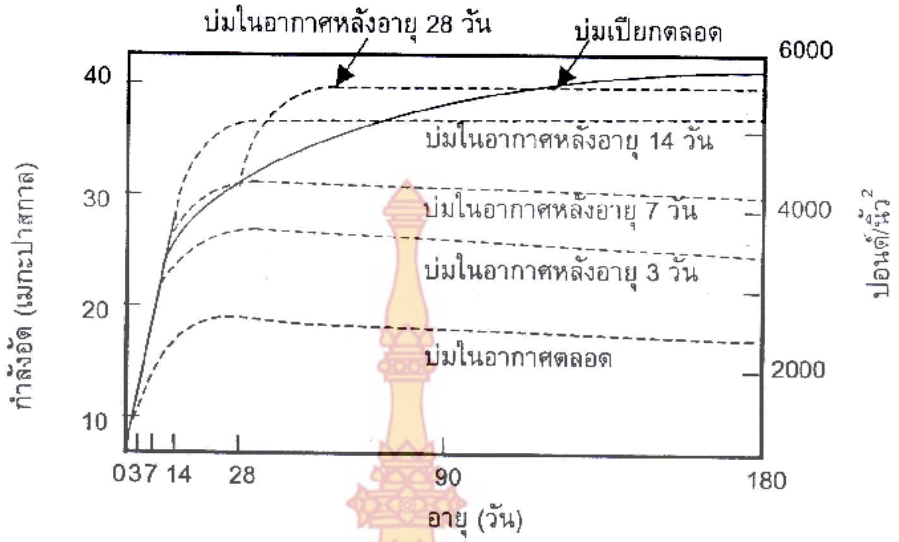
บทที่ 1
บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้คอนกรีตเป็นอย่างมากจากการสร้างอาคาร บ้านเรือน ถนน สะพาน ฯลฯ ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงและประหยัดต้นทุน และมีระยะเวลานานในการผลิตคอนกรีต บทความวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ผสมผงจุลินทรีย์โดยวิธีการบ่มไอน้ำแรงดันต่ำ เพื่อมาพัฒนาทางด้านคุณสมบัติกำลังอัดของคอนกรีต เพื่อศึกษาถึงการบ่มไอน้ำที่มีผลกระทบต่อส่วนผสมของผงจุลินทรีย์ที่ผสมในคอนกรีต เพื่อศึกษาถึงการพัฒนาถึงการบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มไอน้ำ และศึกษาถึงความสำคัญระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากในโลกปัจจุบันนี้ได้มีการผลิตและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากคอนกรีตในการใช้งานมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น อาคารพักอาศัย ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานระบบต่างๆ หรือ ในงานออกแบบประติมากรรมต่างๆมากมาย ซึ่งคอนกรีตเหล่านี้จะมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มกำลังอัดให้มากขึ้น และลดต้นทุนการผลิตให้น้อยลง เพื่อตอบสนองกับความต้องการทางสังคม ในปัจจุบันและอนาคต สมารถทำได้หลากหลายวิธีในการผลิต เช่น การนำเถ้าถ่านหินมาแทนที่ปูนซีเมนต์ การนำเถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ หรือการนำผงจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพแทนที่ปูนซีเมนต์ การพัฒนากำลังอัดโดยวิธีเหล่านี้เป็นการพัฒนาในวัสดุที่ใช้ผสมในคอนกรีตและเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ผลิตมา จะมีระยะเวลาการผลิตนับตั้งแต่ขั้นตอนการผสมหรือหล่อคอนกรีต จะใช้ระยะเวลานานกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากคอนกรีตทั่วไปที่สามารถนำมาใช้งานหรือมีกำลังในการรับน้ำหนัก แต่ความคงทนของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมามีความคงทนน้อย เพราะคอนกรีตต้องการน้ำเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันถ้ามีน้ำในส่วนผสมคอนกรีตมากเกินไป จะทำให้เกิดฟองอากาศในโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์มากทำให้การรับกำลังจะลดลง ในบางงานนั้นมีระยะเวลาจำกัดมีความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้จึงมักจะนำผลิตภัณฑ์จากคอนกรีตมาใช้งานก่อน ก่อนที่คอนกรีตจะสามารถรับกำลังได้ดี หรือไม่มีการบ่มคอนกรีตก่อนนำมาใช้งาน

ระยะเวลาในการบ่ม การบ่มคอนกรีตทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดได้ต่อเนื่อง โครงสร้างของตัวซีเมนต์จะแน่นขึ้นและคอนกรีตจะมีความแข็งแรง ดังรูปที่ 1-1 แสดงถึงกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่มต่างๆการบ่มเปียกมาก การบ่มคอนกรีตมีผลมากในคอนกรีต เช่น คอนกรีตขนาดเล็กเนื่องจากน้ำระเหยออกง่ายนอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน และตะกรันเตาถลุงเหล็กต้องการ การบ่มที่นานกว่าเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้ช้า ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์จะลดลงตามอายุที่เพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีอยู่ต่อไปตราบที่ยิ่งมีน้ำให้ทำปฏิกิริยาอยู่



รูปที่ 1-1 กำลังอัดของคอนกรีตที่ W/C = 0.5 และการบ่มต่างกัน[1]

เวลาสำหรับการบ่มคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการที่สำคัญๆ ได้แก่ ประเภทของปูนซีเมนต์และอุณหภูมิ ปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็วและมีการพัฒนากำลังได้เร็วจะใช้เวลาสำหรับการบ่มน้อยกว่าปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาช้าแต่ในปัจจุบันก็มีการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ มาใช้เพื่อเร่งระยะเวลาในการผลิตหรือเพิ่มการรับกำลังของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากคอนกรีตที่ผสมผงจุลินทรีย์ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ในคอนกรีตหรือการใช้สารผสมเพิ่มชนิดต่าง ๆ เพื่อเพิ่มการรับกำลัง หรือเร่งระยะเวลาการก่อตัวให้ผลิตภัณฑ์นั้น ๆ สามารถรับกำลังอัดได้และนำไปใช้งานได้ในเวลาที่เร็วขึ้น และสามารถเลือกใช้ได้อีกหลายวิธีให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากคอนกรีตที่ผสมผงจุลินทรีย์มีความคงทนถาวรและใช้ระยะเวลาสั้นในการผลิต ผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้จึงนำวิธีการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผลิต คือ การบ่มคอนกรีตโดยใช้ความชื้นและความร้อน มาเร่งทำปฏิกิริยาทางเคมีของคอนกรีตที่ผสมผงจุลินทรีย์

คอนกรีตเกิดการหดตัวแห้ง (drying Shrinkage) และการคืน (Creep) ในคอนกรีตจนทำให้คอนกรีตแตกร้าวและเสียหายได้ เมื่อนำมาใช้งานส่วนของความชื้นและความร้อนที่ได้จากไอน้ำที่กระทำต่อพื้นผิวผลิตภัณฑ์เพื่อให้ความร้อนและความชื้นสามารถแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ กับผลิตภัณฑ์ได้ เพื่อเป็นการพัฒนาให้ดีขึ้นดังนั้นคณะผู้วิจัยมีจุดประสงค์ที่จะทำการศึกษา “การศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ผสมผงจุลินทรีย์โดยวิธีการบ่มไอน้ำแรงดันต่ำ” ทฤษฎีใช้ในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีของคอนกรีตที่ผสมผงจุลินทรีย์โดยวิธีการบ่มไอน้ำ เพื่อสามารถลดระยะเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานผลิตภัณฑ์รวมถึงความคงทนของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากคอนกรีตที่ผสมผงจุลินทรีย์ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในงานทางด้านวิศวกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาถึงการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมผงจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาโดยวิธีการบ่มไอน้ำแรงดันต่ำ

2. เพื่อศึกษาถึงการบ่มไอน้ำ ที่มีผลต่ออัตราส่วนผสมของผงจุลินทรีย์ที่ผสมในคอนกรีตทีอัตราส่วนต่าง ๆ

3. เพื่อศึกษาถึงระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตในด้านการพัฒนากำลังต้านทานแรงของคอนกรีต

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาปริมาณอัตราส่วนของการผสมผงจุลินทรีย์ในคอนกรีตโดยใช้ผงจุลินทรีย์แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละของน้ำหนัก 1% 2% 3% 4% และ 5%

2. เพื่อศึกษากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมผงจุลินทรีย์ในคอนกรีตโดยใช้ผงจุลินทรีย์แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนของน้ำหนัก 1% 2% 3% 4% และ 5% โดยวิธีการบ่มปกติเปรียบเทียบกับวิธีการบ่มไอน้ำแรงดันต่ำ

3. ศึกษาถึงระยะเวลาในการบ่อไอน้ำที่ส่งผลในการพัฒนากำลังอัดคอนกรีต ที่อายุคอนกรีต 3, 7, 14 และ 28 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. หลังจากเสร็จสิ้นโครงการวิจัยนี้ จะนำผลงานวิจัยไปตีพิมพ์เผยแพร่หรือนำเสนอในระดับชาติ (Peer review) อย่างน้อย 1 ฉบับ

2. เป็นแนวทางในการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ในงานโครงสร้างในปัจจุบันเพื่อเป็นแนวทางการนำไปสู่กระบวนอุตสาหกรรมการผลิต

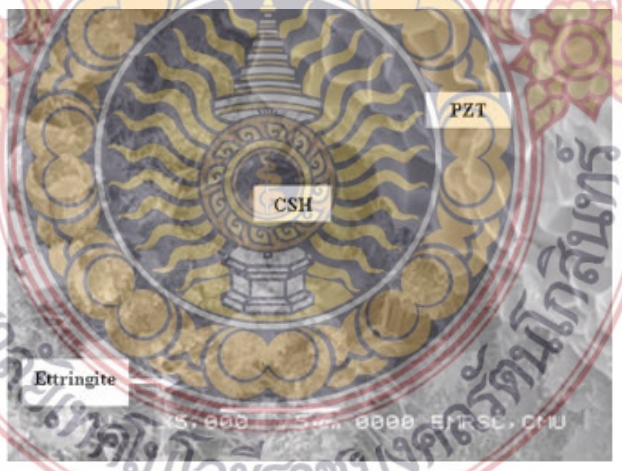
3. เพื่อทราบถึงกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมผงจุลินทรีย์

4. เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ซีเมนต์ หรือ **ปูนซีเมนต์** (cement) เป็นวัสดุผสานสำหรับผลิตคอนกรีต มีส่วนผสมหลัก คือ หินปูนและดินเหนียว และมีผสมอื่นเช่น ซิลิก้า อลูมิน่า สินแร่เหล็ก ยิปซั่ม และสารเพิ่มพิเศษอื่นๆ ปูนซีเมนต์ มีการค้นพบว่ามีการใช้งานในสมัยมาซิโดเนียและโรมัน และได้หายไปจนกระทั่งในยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมได้มีการคิดค้นขึ้นมาจากหลายคน จนกระทั่งผลงานของแอสป์ดินได้มีการจดสิทธิบัตรของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดจากการค้นคว้า ของ โยเซฟ แอสป์ดิน ชาวอังกฤษ ช่วงเวลากว่า 13 ปี พ.ศ. 2354 ถึง พ.ศ. 2367 โดยทดลองเอาหินปูนผสมกับดินเหนียวแล้วไปเผาก่อนนำมาบด เมื่อจะใช้งานก็นำมาผสมทราย กรวดและน้ำ โดยเขาตั้งชื่อว่า ปอตแลนด์ซีเมนต์ เพราะว่าสีเหมือนกับหินที่เกาะปอร์ตแลนด์ ประเทศอังกฤษ [1]

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีต ที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงานที่นำไปใช้ นอกจากนี้ยังมีปูนซีเมนต์อื่นที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เหมาะกับงานที่หลากหลาย โดยเฉพาะด้านความแข็งแรงความทนทาน ความสวยงาม และการ ใช้งานเฉพาะด้าน คุณสมบัติของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่เป็นวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันในขั้นตอนการเผาเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์



รูปที่ 2-1 ภาพถ่าย SEM โครงสร้างของวัสดุผสมเพียโซอิเลกทริกปูนซีเมนต์ [1]

2.1 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์เป็นสิ่งสำคัญที่ควรศึกษาเพื่อให้สามารถเข้าใจถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของปูนซีเมนต์และเลือกใช้ปูนซีเมนต์ได้อย่างถูกต้องเหมาะสมกับงาน

1. ไตรแคลเซี่ยมซิลิเกต (tricalcium silicate) องค์ประกอบทางเคมีคือ $3CaO.SiO_2$ และย่อว่า C_3S

2. ไดรแคลเซียมซิลิเกต (dicalcium silicate) องค์ประกอบทางเคมีคือ $2CaO.SiO_2$ และย่อว่า C_2S

3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (tricalcium aluminate) องค์ประกอบทางเคมีคือ $3CaO.Al_2O_3$ และย่อว่า C_3A

4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (tetracalcium aluminoferrite) องค์ประกอบทางเคมีคือ $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ และย่อว่า C_4AF

2.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (ordinary Portland cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ใช้กันมากในงานคอนกรีต ประมาณได้ว่าร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ที่ผลิตในสหรัฐอเมริกาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไป เช่น เสา คาน ฐานรากของอาคาร ถนน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่รวดเร็วมานักและให้ความร้อนปานกลาง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาคสีเขียว และตราทีพีไอเขียว เป็นต้น

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ชนิดนี้เป็นปูนซีเมนต์ดัดแปลง (modified cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากนัก ความร้อนที่เกิดขึ้นค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้านต่ำ (ประเภทที่ 4) และให้กำลังใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อนและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตได้ปานกลาง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีใช้ค่อนข้างน้อยในประเทศไทยที่มีอยู่ ได้แก่ปูนซีเมนต์ตราพญานาคเจ็ดเศียร

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (rapid hardening Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงเพราะมีปริมาณ C_3S สูง และความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาก เหมาะสำหรับงานที่ต้องการใช้งานเร็ว เช่น งานซ่อมแซม หรืองานที่ต้องการถอดแบบเร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต เสาไฟฟ้าคอนกรีตผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป (precast concrete) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ได้แก่ ตราเอราวัณ ตราสามเพชร และตราพญานาคสีแดง เป็นต้น

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (low heat Portland cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่ำมากเพราะมีปริมาณของ C_3S ต่ำ คือ โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 แต่จะมี C_2S ที่ค่อนข้างสูงคือโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 50 ถึง 60 ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับใช้งานในการก่อสร้างคอนกรีตต่ำ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ไม่มีจำหน่ายในท้องตลาดในประเทศไทยต้องสั่งโดยตรงจากผู้ผลิต

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (sulfate resisting Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ต้านทานซัลเฟตได้สูง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีปริมาณของ C_3A ต่ำมากโดยทั่วไปไม่เกินร้อยละ 5 เพราะ C_3A จะทำให้เกิดการรวมตัวกับซัลเฟตได้ง่าย ดังนี้เมื่อ C_3A มีปริมาณน้อยจึงมีการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยหรือไม่ได้เลย ทำให้การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตลดลง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่สร้างอยู่ในที่มีเกลือหรือสารละลายซัลเฟต เช่น โครงการสร้างในทะเล ริมทะเล ท่าเรือ หรือบริเวณที่มีดินเค็ม ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ได้แก่ตราช้างพื้นสีฟ้าและตราปลาฉลาด เป็นต้น

การศึกษาอิทธิพลของสารประกอบทำให้สามารถปรับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานประเภทต่าง ๆ มาตรฐานการทอสอบวัสดุตาม ASTM C150 ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5 [1]

ส่วนประกอบ	ปูนซีเมนต์				
	1	2	3	4	5
C_3S	49	46	56	25	30
C_2S	25	29	15	50	46
C_3A	12	6	12	5	5
C_4AF	8	12	8	12	13
ความละเอียดของเบลน (ซม^2/กรัม)	3,000	3,000	4,500	3,000	3,000
กำลังอัดที่อายุ 3 วัน (กก/ซม^2)	180	150	310	80	120
ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ 28 วัน (จูล/กรัม)	400	330	430	270	310

หมายเหตุ กำลังอัดวัดจากลูกบาศก์มอร์ต้าร์ขนาด 50 mm

2.3 ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดความร้อน เกิดการก่อตัว และแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกันและกันทำให้ปฏิกิริยาที่ได้มีความผิดแปลกไปบ้างจากปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบบริสุทธิ์แต่ละตัวกับน้ำ นอกจากนี้ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและในสภาพแข็งตัวแล้ว ดังนั้นการศึกษาปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบกับน้ำจึงเป็นเรื่องสำคัญและสามารถนำไปอธิบายปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำได้ดี

2.4 แคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) เป็นสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(calcium silicate hydrate, $3CaO.2SiO_2.3H_2O$, CSH โดยอัตราส่วนของ CaO, SiO_2 และ H_2O เป็นค่าโดยประมาณ) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide, $Ca(OH)_2$, CH) ดังสมการต่อไปนี้

สมการที่ 2-1

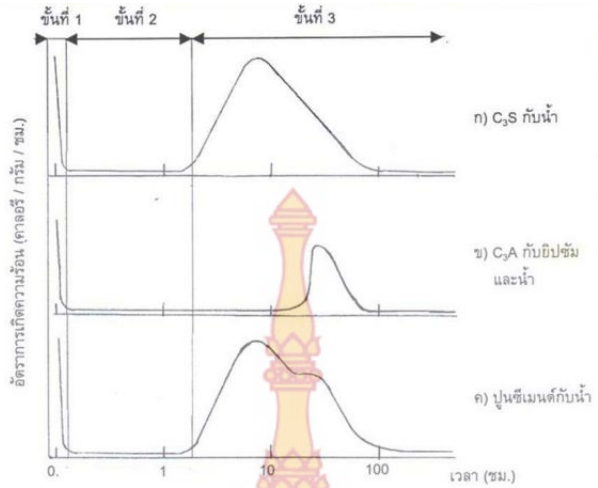
$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (1.1)$$

หรือ $$2C_3S + 6H \longrightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH) \quad (1.2)$$

หรือ $$2C_2S + 4H \longrightarrow C_3S_2H_3 + CH$$

ปฏิกิริยาทางเคมีเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา ถ้ามีการทำปฏิกิริยามากจะมีการคายความร้อนมาก รูปที่ 2-2 แสดงถึงความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่าง C_3S กับน้ำ ขั้นตอนในการทำปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นคือ ขั้นที่ 1 เมื่อผสม C_3S กับน้ำจะเกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นจะลดลงและหยุดในเวลา 15 นาทีแรก ติดตามด้วยขั้นที่ 2 ที่ไม่ค่อยมีปฏิกิริยาเรียกว่าระยะ ดอร์แมนต์ (dormant period) หรือระยะสงบ ระยะนี้เป็นระยะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อยู่ในสภาพพลาสติกเป็นเวลาหลายชั่วโมง ทำให้สามารถเทหรือหล่อคอนกรีตเข้าแบบได้ในช่วงเวลานี้ก่อนที่คอนกรีตจะเริ่มแข็งตัว หลักจากนี้ C_3S จะเริ่มทำปฏิกิริยาอีกครั้งหนึ่งและเข้าสู่ขั้นที่ 3 เป็นการทำปฏิกิริยาช่วงที่ 2 ขั้นที่ 3 นี้จะเริ่มประมาณ 2 ถึง 3 ชั่วโมงหลังจากผสม C_3S กับน้ำซึ่งตรงกับเวลาการก่อตัวระยะต้น ระยะนี้มีการคายความร้อนออกมาอย่างต่อเนื่อง และอัตราการเกิดความร้อนจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดเมื่ออายุได้ 4 ถึง 8 ชั่วโมง และที่จุดนี้เองที่เกิดการก่อตัวสุดท้ายขึ้น หลังจากนี้ซีเมนต์เพสต์จะเริ่มแข็งตัวและสามารถรับกำลังเพิ่มขึ้นตามอายุที่มากขึ้น จากนั้นปฏิกิริยาจะค่อย ๆ ลดลงและเมื่อเวลานานขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นน้อยแต่ยังคงมีต่อไป



รูปที่ 2-2 แสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ [1]

เมื่อผสม C_3S กับน้ำ อิออนของแคลเซียม (Ca^+) และของไฮดรอกไซด์ (OH) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว สารละลายที่ได้มีความเป็นด่างสูงคือมี pH สูงกว่า 12 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) มีมากในระยะแรกและลดลงอย่างรวดเร็วแต่ยังคงมีอยู่ตลอดระยะดอร์แมนต์ การลดลงของปฏิกิริยาสืบเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอิออนของแคลเซียมและไฮดรอกซ์ทำให้สารละลายความเข้มข้นมากขึ้น เมื่อถึงจุดหนึ่งความเข้มข้นของอิออนในสารละลายจะสูงพอทำให้เกิดการตกผลึกของ CH และในเวลาเดียวกัน C_3S จะเริ่มทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่ง ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของ C_3S ทำให้เกิด CSH ล้อมรอบเม็ดปูนหนาแน่นขึ้นและปฏิกิริยาเป็นไปได้ยากขึ้น แต่ยังคงมีต่อไป C_2S ทำปฏิกิริยากับน้ำในทำนองเดียวกันกับ C_3S แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นช้ากว่าเพราะ C_2S ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเท่ากับ C_3S ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่าง C_2S กับน้ำจึงน้อยกว่ากรณีของ C_3S กับน้ำ

2.5 แคลเซียมอลูมิเนตและเฟอร์ไรต์

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต(C_3A)ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วและได้แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (calcium aluminate hydrate, CAH) ดังนั้นสมการที่ 2-1 ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วจึงจำเป็นต้องผสมยิปซัมเพื่อหน่วงปฏิกิริยา เพราะ C_3A จะทำปฏิกิริยากับอิออนของลเฟตได้แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตไฮเดรต (calciumsulfoaluminateydrate,$6CaO.Al_2O_3.3SO_3.32H_2O$,$C_6A\ S\ _3H_{32}$) หรือเรียกกันทั่วไปว่าเอทริงไกต์ (ettringite)

ดังสมการที่ 2-2

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O \qquad (1.3)$$

หรือ $C_3A + 6H \longrightarrow C_3AH_6$

$3CaO.Al_2O_3 + 3(CaOSO_3.2H_2O) + 26H_2O \longrightarrow 6CaO.Al_2O_3.3SO_3.32H_2O$ (1.4)

หรือ $C_3A + 3C\,S\,H_2 + 26H\;C_6A\,S_3H_{32}$

ปฏิกิริยาของแคลเซียมอลูมิเนตกับน้ำเมื่อมียิปซัม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้น เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2-2 ในขั้นที่ 1 ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดเอททริงไกต์มีลักษณะยาวคล้ายเข็มจะเกิดขึ้นเมื่อมีอิออนของซัลเฟตเพียงพอ การเกิดเอททริงไกต์เพิ่มมากขึ้นรอบ C_3A ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ยากขึ้นและปฏิกิริยาดังกล่าวจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขั้นที่ 2 ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นค่อนข้างน้อยและใช้เวลาหลายชั่วโมง เมื่ออิออนของซัลเฟตทำปฏิกิริยาหมดแล้ว C_3A จะทำปฏิกิริยากับเอททริงไกต์และเปลี่ยนเป็นแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตไฮเดรตที่มีซัลเฟตน้อยลง ซึ่งมีชื่อว่าแคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนต (calcium monosulfoaluminate, $3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.\ 12H_2O$, $C_3AC\,S\,H_{12}$ หรือ $C_4A\,S\,H_{12}$) ซึ่งจะตรงกับการเกิดปฏิกิริยาในขั้นที่ 3 ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 12 ถึง 36 ชั่วโมง แคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนตจะสามารถแปลงกลับเป็นเอททริงไกต์เมื่อได้อิออนของซัลเฟตอีกซึ่งเป็นเหตุผลหลักในการเกิดการกัดกร่อนของสารซัลเฟต เพราะเอททริงไกต์มีปริมาตรมากกว่าแคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนตมาก ถ้ามียิปซัมผสมอยู่น้อย C_3A จะยังคงมีอยู่หลักจากที่เอททริงไกต์เปลี่ยนเป็นโมโนซัลเฟตแล้ว กรณีเช่นนี้จะเกิดสารละลายแข็ง (solid solution) ของ $C_4A\,S\,H_{12}$ และ C_4AH_{13}

ปฏิกิริยาของ C_4AF คล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดขึ้นช้ากว่าและมีความร้อนของปฏิกิริยาน้อยกว่า สารประกอบเหล็กออกไซด์ (F) จะทำปฏิกิริยาคล้ายกับอลูมิเนียมออกไซด์ (A) และสามารถแทนที่กันได้ ยิปซัมจะหน่วงปฏิกิริยาของ C_4AF มากกว่าการหน่วงปฏิกิริยาของ C_3A ปฏิกิริยาระหว่าง C_4AF และยิปซัมทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรต์ ($C_6(A,F)S_3H_{32}$) ผลิตผลนี้มีลักษณะเหมือนเข็มคล้าย เอททริงไกต์ และทำนองเดียวกับเอททริงไกต์ ($C_6(A,F)S_3H_{32}$) สามารถทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ที่มีซัลเฟตต่ำ จากประสบการณ์พบว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_4AF มากและ C_3A ต่ำสามารถทนทานต่อการทำลายของซัลเฟตได้ดี แสดงว่าการเปลี่ยนกลับเป็นเอททริงไกต์จากแคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนตที่เกิดจาก C_4AF ไม่เกิดขึ้น

2.6 ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าสารประกอบของปูนซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำมีอิทธิพลต่อกันและกันอาทิ เช่น ทั้ง C_3A และ C_4AF จะแย่งออนของซัลเฟต ขณะที่ C_3A ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่าจะแย่งอิออนของซัลเฟตได้มากกว่า เป็นผลให้ C_4AF ไม่ถูกหน่วงการทำปฏิกิริยามากเท่ากับ C_3A นอกจากนี้ในปูนซีเมนต์ยังมีสารประกอบอื่นปะปนอยู่ซึ่งมีผลต่อปฏิกิริยาได้ เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2-2 ซึ่งในบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ขั้นตอนการเกิดผลผลิตของปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-2 ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่าง

รวดเร็วในช่วงแรกซึ่งเป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยาจะลดลงเนื่องจากการเกิดชั้นเคลือบบางของเอททริงไกต์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของอิออนแคลเซียมและไฮดอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลงและซีเมนต์เพสต์มีสภาพพลาสติกอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูง CH จะตกผลึกแลปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด CSH เพิ่มขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้เอททริงไกต์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเจตและเกิดสารประกอบของ $C_4(AF)H_{13}$ แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไป ทำให้เกิด CSH มากขึ้นและขยายเข้าในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.7 EM หรือ Effective Microorganisms

EM หรือ Effective Microorganisms คือ กลุ่มจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ (EM) จัดอยู่ใน 10 ประเภทหลัก และเกิดมาจากการที่จุลินทรีย์ 80 กว่าชนิดเพาะเลี้ยงผสมผสานกัน โดยมีแบคทีเรียสังเคราะห์แสง, ยีสต์, แบคทีเรียแลคโตบาซิลลัส และแบคทีเกอปรียแอคติโนไมโคซิสเป็นหลักซึ่งปราศจากพิษ ปราศจากโทษและไม่มีผลข้างเคียง สามารถใช้จัดการกับน้ำที่มีมลพิษได้เป็นอย่างดีและใช้เป็นเทคโนโลยีปรับปรุง สภาพแวดล้อมได้อีกด้วย เทคโนโลยีนี้ได้ดำเนินการผลักดันใช้ใน 90 กว่าประเทศและภูมิภาค เช่น ญี่ปุ่น, อเมริกาและบราซิล เป็นต้น ทั้งยังได้น้อมนำให้สื่อที่สนใจของประเทศต่างๆ เรียกชื่อกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพนี้เสียใหม่ว่า “แสงทองแห่งศตวรรษที่ 21”กลุ่มจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพของ EM เกิดขึ้นจากการเกาะตัวของจุลินทรีย์ที่เป็น Photosymthetic Bacteria, Saccharomycetes, Lactobacillus และ Ray Fungi จำนวน 10 ชนิดจาก 80 กว่าชนิดกลายเป็นกลุ่มโครงสร้างจุลินทรีย์ที่แข็งแกร่ง และเปี่ยมด้วยประสิทธิภาพ ซึ่งมันไม่เพียงแต่เอื้อประโยชน์ต่อระบบนิเวศวิทยาทางการเกษตร ประมง ปศุสัตว์ หากแต่ยังช่วยทำให้สิ่งแวดล้อมดีขึ้นด้วย และที่น่าอัศจรรย์ใจกว่า ก็คือ EM กลุ่มจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพนี้ สามารถย่อยสลายคราบสกปรกได้ด้วยกระบวนการทางเคมีที่มนุษย์สร้างขึ้น ช่วยบำบัดคุณภาพน้ำให้สะอาดขึ้น ขจัดกลิ่นเหม็นฉุน ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย กำจัดเชื้อรา และป้องกันไรฝุ่นได้เป็นอย่างดี ปัจจุบัน มีมากมายกว่า 90 กว่าประเทศที่ผลักดันให้ใช้เทคโนโลยีนี้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในญี่ปุ่นและอเมริกา ต่างร่วมกันจรรโลงและสรรสร้างโลกเรานี้ให้เป็นโลกแห่ง EM โลกที่ปราศจากมลพิษ โลกแห่งการหมุนเวียนใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า กล่าวได้ว่าเป็นเทคโนโลยีสีเขียวที่โดดเด่นและเยี่ยมยอดแห่งการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมในศตวรรษที่ 2

ศ.ดร.เทรูโอะ ฮิงะ นักวิทยาศาสตร์ผู้เชี่ยวชาญสาขาพืชสวน มหาวิทยาลัยริวกิว เมืองโอกินาวา ประเทศญี่ปุ่น ได้ศึกษาแนวคิดเรื่อง "ดินมีชีวิต" ของท่านโมกิจิ โอกะดะ (พ.ศ.2425-2498) บิดาแห่งการเกษตรธรรมชาติของโลก จากนั้น ดร.ฮิงะ เริ่มค้นคว้าทดลองตั้งแต่ปี พ.ศ.2510 และค้นพบ E.M. เมื่อปี พ.ศ.2526 ท่าน...อุทิศทุ่มเททำการวิจัยผลว่ากลุ่มจุลินทรีย์นี้ใช้ได้ผลจริง สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้จริง จนคำว่า E.M. กลายเป็นคำที่ติดปากและรู้จักกันอย่างแพร่หลาย จนคน

มากมายเข้าใจว่า E.M. หมายถึงจุลินทรีย์ และเรียกถึงจุลินทรีย์ทั่วไปอย่างสั้นๆว่าอีเอ็ม (E.M.) จุลินทรีย์โดยทั่วไปที่เรานำมาใช้งานกัน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.7.1 จุลินทรีย์แบบน้ำ

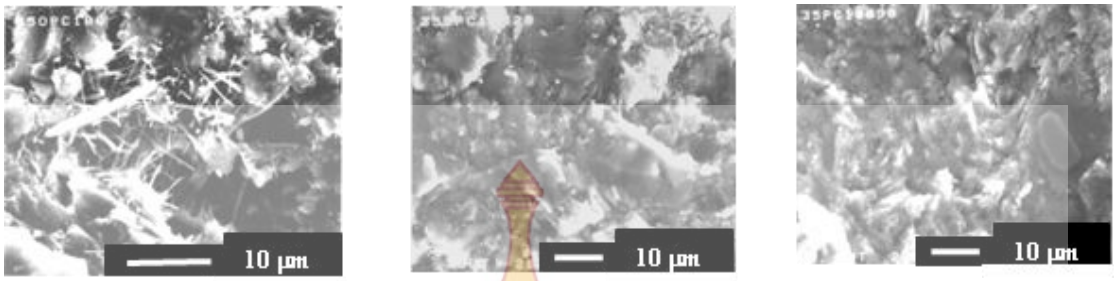
สามารถใช้งานได้ทันที เพราะจุลินทรีย์อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน แต่ในขณะเดียวกัน จุลินทรีย์แบบน้ำที่พร้อมใช้งานนี้ จะมีการขยายตัวและคายแก๊สออกมาตลอดเวลา ทำให้บรรจุภัณฑ์ที่ใช้อาจมีอาการบิดเบี้ยว หรือบวมจนแตกได้ และจุลินทรีย์แบบน้ำส่วนใหญ่มักมีกลิ่นเหม็นจากกากน้ำตาล เนื่องจากมาจากขั้นตอนการขยายเชื้อก่อนนำมาบรรจุ อายุการเก็บรักษาสั้นกว่าแบบผง

2.7.2 จุลินทรีย์แบบผง

พัฒนามาจากแบบน้ำ โดยการทำให้จุลินทรีย์แห้ง และอยู่ในรูปแบบสปอร์ ทำให้ไม่มีกลิ่นเหม็น สะอาด และสะดวกในการใช้งาน ไม่มีการเปลี่ยนสภาพเพราะจุลินทรีย์อยู่ในสภาพแห้งและอายุการเก็บรักษาก็ยาวนานกว่าแบบน้ำ แต่จุลินทรีย์แบบแห้งส่วนใหญ่ จะไม่สามารถนำไปใช้งานได้ทันที เพราะต้องนำไปผสมน้ำแล้วรอให้จุลินทรีย์ในสปอร์เปลี่ยนสภาพก่อน ซึ่งมักเสียเวลาเป็นชั่วโมงก่อนนำไปใช้งานได้ แต่หากใส่จุลินทรีย์แห้งลงไปในน้ำเสียทันทีโดยไม่ผสมน้ำก่อน จุลินทรีย์อาจตายและไม่สามารถใช้งานได้เลย

2.8 โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

ส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน แสดงภาพถ่ายขยายโดย SEM ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ที่อายุ 7 วัน (รูปที่ 2-3) พบว่าโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์มีช่องว่างหรือโพรงมาก พบเอททริงไกต์มีลักษณะเป็นเข็มยาวเกิดขึ้นรอบเม็ดปูนและขยายเข้าไปในช่องว่า ที่อายุ 28 วัน (รูปที่ 2-3) ผลิตผลไฮเดรชันประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต, แคลเซียมไฮดรอกไซด์, แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรด์ และส่วนประกอบย่อยอื่นอีกไม่มาก ขยายเข้าไปในโพรงหรือช่องว่างมากขึ้น ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความแน่นขึ้น โดยเฉพาะที่อายุ 90 วัน (รูปที่ 2-3) ซีเมนต์เพสต์มีโครงสร้างที่แน่นยิ่งขึ้นนอกจากนี้ในตัวของซีเมนต์เพสต์ยังประกอบด้วยเม็ดปูนซีเมนต์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาโพรงคาปิลารี (capillary pore) และโพรงอากาศอีกด้วย



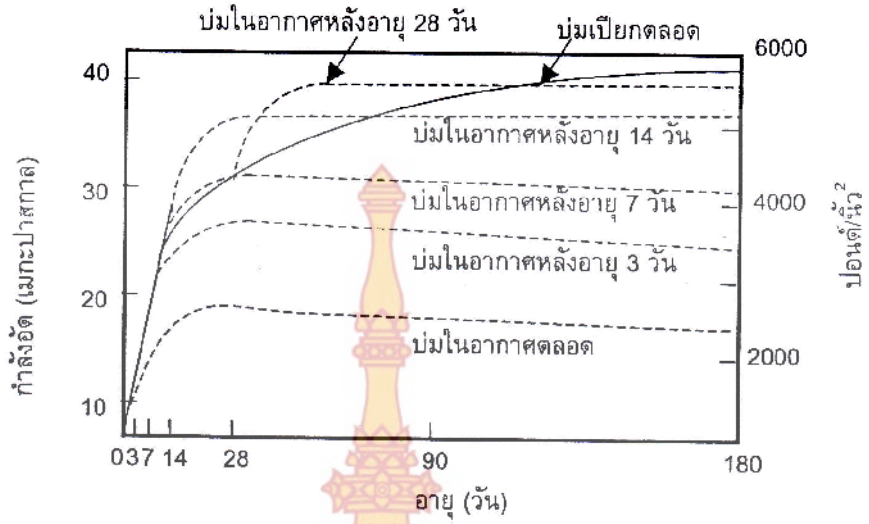
(ก.)อายุ 7 วัน (ข.)อายุ 28 วัน (ค.)อายุ 90 วัน

รูปที่ 2-3 ภาพถ่ายขยายโดย SEM ของซีเมนต์เพสต์ [1]

2.9 ระยะเวลาของการบ่ม

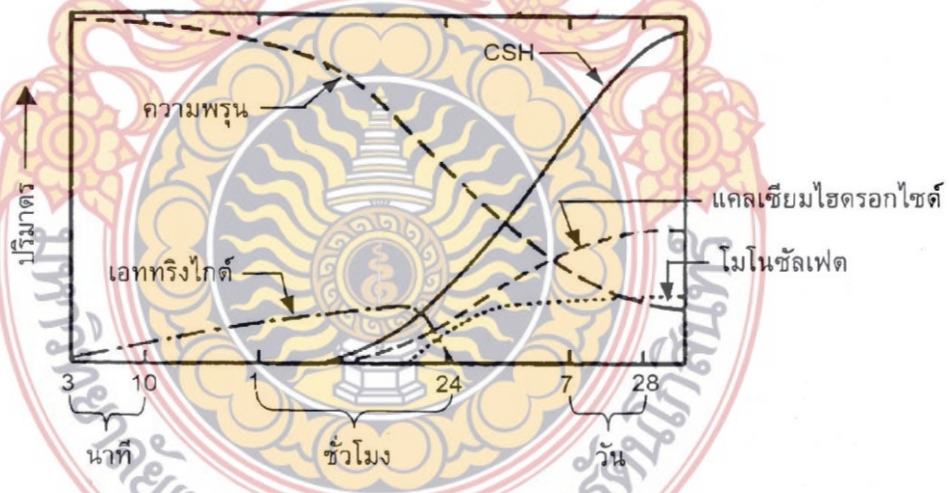
การบ่มทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นได้ต่อเนื่อง โครงสร้างของเนื้อซีเมนต์จะแน่นขึ้นและคอนกรีตจะมีความแข็งแรง รูปที่ 2-4 แสดงถึงกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่มต่างๆ การบ่มเปียกตลอดเวลาให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงสุด ขณะที่การบ่มในอากาศทำให้การเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างช้าและมีค่าต่ำกว่ากรณีที่บ่มเปียกมาก อิทธิพลของการบ่มมีผลมากในคอนกรีตที่มีพื้นที่ผิวมาก เช่น แผ่นพื้น ถนน และคอนกรีตที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากน้ำระเหยออกได้ง่าย นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหินและตะกรันเตาถลุงเหล็ก ต้องการการบ่มที่นานกว่าเนื่องปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้ช้า ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์จะลดลงตามอายุที่เพิ่มขึ้นแต่ยังคงมีอยู่ต่อไปตราบที่ยังมีน้ำให้ทำปฏิกิริยาอยู่ ดังนั้นจึงควรบ่มคอนกรีตให้นานที่สุดเท่าที่จะทำได้

เวลาสำหรับการบ่มคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ ที่สำคัญได้แก่ประเภทของปูนซีเมนต์และอุณหภูมิ ปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็วและมีการพัฒนากำลังได้เร็วจะต้องการเวลาสำหรับการบ่มน้อยกว่าปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาช้า และที่อุณหภูมิต่ำคอนกรีตจะทำปฏิกิริยาได้ช้าและต้องการเวลาบ่มนานขึ้น อุณหภูมิของคอนกรีตที่ต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส พบว่ามีการพัฒนากำลังที่อายุต้นๆ ค่อนข้างต่ำ หากคอนกรีตมีอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส การพัฒนากำลังของคอนกรีตที่อายุต้นมีค่าน้อยมาก และที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส พบว่าคอนกรีตแทบไม่มีการพัฒนากำลังเลย ดังนั้นมาตรฐานสำหรับการบ่มคอนกรีตของสถาบันคอนกรีตอเมริกา ACI 308 จึงระบุว่าเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 10 องศาเซลเซียส ให้มีการบ่มคอนกรีตอย่างน้อย 3 วัน, 7 วัน และ 14วัน เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3, ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 ตามลำดับ สำหรับมาตรฐาน BS 8110 ระบุเวลาในการบ่มขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์และสภาพของอากาศ ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ [8]



รูปที่ 2-4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ W/C = 0.5 และการบ่มต่างกัน การบ่มปกติ [1]

การบ่มปกติสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ การป้องกันการสูญเสียน้ำ และการบ่มเปียกหรือบ่มชื้น การบ่มเปียกที่ดีคือการบ่มในน้ำซึ่งจะให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นโดยเฉพาะที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2-5 เนื่องจากคอนกรีตต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาต่อไป



รูปที่ 2-5 ขั้นตอนการเกิดผลิตผลของปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ [1]

2.10 การบ่มโดยการป้องกันการสูญเสียน้ำ

ในการเทคอนกรีตต้องป้องกันการสูญเสียน้ำของคอนกรีต ซึ่งสามารถทำได้โดยการทำกำบังแดดและกำบังลม มาตรฐาน BS 8110 ระบุว่าถ้ามีการกำบังแดด กำบังลม และความชื้นสัมพัทธ์เกินร้อยละ 80 ก็ไม่จำเป็นต้องมีการบ่มหรือการดูแลเป็นพิเศษ อย่างไรก็ตามการวัดและควบคุมความชื้นในภาคสนามทำได้ยากจึงควรมีการบ่มคอนกรีต การบ่มโดยการป้องกันการสูญเสียน้ำจะใช้วัสดุที่เป็นแผ่นคลุมหรือใช้สารบ่มคอนกรีตพ่นทับหน้าคอนกรีต เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำออกจากคอนกรีต

2.11 แผ่นกันความชื้น

การบ่มโดยป้องกันการสูญเสียความชื้นสามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่นิยมกันคือการใช้แผ่นกันความชื้น เช่น แผ่นพลาสติกประเภทโพลีเอทีลีน (polyethylene) หรือกระดาษกันน้ำ(water proof paper หรือ kraft) คลุมหรือหุ้มโดยวางให้แนบกับผิวของคอนกรีต รอยต่อระหว่างแผ่นจะต้องวางให้สนิทและมีระยะเหลื่อมมากพอเพื่อป้องกันความชื้นหนีออกไป สำหรับคอนกรีตที่ต้องการผิวหน้าที่ดี เช่น พื้นชั้นดาดฟ้าหรือผิวถนน เมื่อตกแต่งผิวหน้าเสร็จและคอนกรีตแข็งตัวพอก็สามารถปูแผ่นกันความชื้นได้แต่ต้องทำด้วยความระมัดระวัง ในระหว่างการบ่มควรตรวจดูความเรียบร้อยของแผ่นกันความชื้น แผ่นกันความชื้นที่เสียหายจะต้องซ่อมแซมหรือปิดทับให้เรียบร้อย นอกจากนี้หากตรวจสอบพบว่าผิวหน้าของคอนกรีตแห้งจะต้องรดน้ำเพิ่ม การใช้แผ่นกันความชื้นจะทำให้ความชื้นภายใต้แผ่นเกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำโดยเฉพาะภายใต้แผ่นพลาสติกที่ย่นซึ่งจะทำให้สีของผิวคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้กับกรณีที่ต้องการโชว์ผิวหน้าคอนกรีต การใช้แผ่นกันความชื้นยังสามารถช่วยป้องกันความเสียหายของคอนกรีตโดยเฉพาะที่ผิวหน้าในระหว่างการก่อสร้างด้วย รายละเอียดข้อกำหนดของแผ่นกันความชื้นมีอยู่ในมาตรฐาน ASTM C171 [7]

2.12 สารบ่มคอนกรีต

สารบ่มคอนกรีต (curing compound) สามารถใช้ในการป้องกันการสูญเสียน้ำของคอนกรีตได้ รายละเอียดข้อกำหนดของสารบ่มคอนกรีตมีอยู่ในมาตรฐาน ASTM C309 การบ่มด้วยวิธีนี้เริ่มต้นด้วยการพ่นสารบ่มคอนกรีตให้เป็นแผ่นบาง ๆ (membrane) คลุมผิวหน้าคอนกรีตไว้ สารที่นิยมใช้จะเป็นสารบ่มคอนกรีตสีขาว เนื่องจากสามารถตรวจสอบความสมบูรณ์ในการเคลือบผิวหน้าคอนกรีตได้ง่ายรวมทั้งสีขาวสามารถสะท้อนแสงและไม่เกิดปัญหาเรื่องการสะสมความร้อน นอกจากนี้ยังมีสารบ่มที่มีลักษณะโปร่งแสงแต่มีสีเพื่อที่จะสามารถตรวจสอบความสมบูรณ์ในการเคลือบ และสีดังกล่าวจะจางหายไปเองเมื่อเวลานานขึ้น

2.13 การบ่มอุณหภูมิ

การพัฒนากำลังของคอนกรีตสามารถเร่งได้โดยใช้ความร้อน การให้ความร้อนต่อคอนกรีตที่นิยมใช้กัน ได้แก่ การบ่มไอน้ำ (Steam Curing) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การบ่มไอน้ำความดันต่ำ (Low Pressure Steam Curing) เป็นการบ่มไอน้ำที่ความดันปกติที่ความร้อนไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส ซึ่งไอน้ำที่ความดันปกตินี้จะชื้นและใช้บ่มคอนกรีตได้เช่นเดียวกับการบ่มปกติ วิธีการนี้นิยมใช้กับการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปเพราะสามารถถอดแบบได้และสามารถเคลื่อนย้ายคอนกรีตได้ในระยะเวลาที่สั้น ทำให้สามารถผลิตคอนกรีตได้รวดเร็วขึ้น การบ่มโดยวิธีนี้จะใช้ห้องบ่มไอน้ำหรืออุโมงค์โดยลำเลียงผลิตภัณฑ์คอนกรีตเข้าไปภายในด้วยสายพาน หรืออาจใช้แผ่นพลาสติกคลุมผลิตภัณฑ์คอนกรีตและป้อนไอน้ำใต้แผ่นพลาสติก การบ่มไอน้ำสามารถใช้ได้กับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การให้ความร้อนแก่คอนกรีตเร็วเกินไปมีผลเสียต่อกำลังของคอนกรีตที่อายุมากขึ้น โดยเฉพาะกับคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงและกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 3 ดั้งนั้นโดยทั่วไปจะบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิปกติประมาณ 3 ถึง 6 ชั่วโมง หลังจากเทคอนกรีตเข้าแบบเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเบื้องต้นก่อนที่จะมีการบ่มไอน้ำ การเพิ่มอุณหภูมิไม่ควรให้เร็วเกินไปเพื่อป้องกันความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วอุณหภูมิที่เพิ่มจะใช้ไม่เกิน 33 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ดั้งนั้นช่วงการเพิ่มอุณหภูมิจะใช้เวลาประมาณ 2 ถึง 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะคงอุณหภูมิที่ต้องการบ่ม ซึ่งช่วงเวลานี้จะขึ้นอยู่กับระดับของอุณหภูมิและกำลังที่ต้องการ หลังจากช่วงอุณหภูมิคงที่ก็จะเข้าสู่ช่วงของการลดอุณหภูมิ ซึ่งอัตราการลดของอุณหภูมิมีผลต่อคอนกรีตไม่มากเท่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิและสามารถใช้อัตราที่เท่ากันได้ โดยทั่วไประยะเวลาของการบ่มไอน้ำจะใช้เวลาทั้งหมดไม่เกิน 18 ชั่วโมง

การเลือกอุณหภูมิสูงสุดขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มของกำลังและกำลังสูงสุดที่ต้องการ อุณหภูมิที่ต่างกันจะมีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันและกำลังของคอนกรีต การใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้การพัฒนากำลังที่อายุต้นเกิดได้รวดเร็วแต่กำลังที่อายุมากขึ้นจะไม่สูงเท่าที่ควรเพราะที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้รวดเร็ว แต่ผลิตผลไฮเดรชันไม่มีเวลาในการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นการจับกันและยึดเป็นโครงสร้างรับแรงได้แต่ไม่สม่ำเสมอ เป็นเหตุให้กำลังระยะต้นสูงขึ้น แต่เมื่อมีอายุมากขึ้นโครงสร้างที่เกิดขึ้นเป็นอุปสรรค์ในการกระจายตัวของผลผลิตไฮเดรชัน ถึงแม้กำลังระยะต้นจะไม่สูงเท่าแต่กำลังที่อายุมากขึ้นจะดีกว่า อุณหภูมิที่เลือกใช้ในการบ่มไอน้ำความดันต่ำอยู่ในช่วง 65 ถึง 80 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากต้องการรั่นระยะในการบ่มคอนกรีตเป็นสำคัญ

2.14 การบ่มไอน้ำ [1]

การเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นสามารถทำได้โดยการบ่มไอน้ำและใช้ความดันเข้าช่วย ซึ่งจะต้องใช้ภาชนะที่แข็งแรงและสามารถปิดได้สนิทเรียกว่าออโตเคลฟ (Autoclave) การบ่มไอน้ำความดันสูง (High Pressure Steam Curing หรือ Autoclave) จะใช้อุณหภูมิประมาณ 160 ถึง 220 องศาเซลเซียสที่ความดันประมาณ 6 ถึง 20 เท่าของบรรยากาศ นิยมใช้กับคอนกรีตสำเร็จรูปและผลิตภัณฑ์คอนกรีตบางชนิด เช่น ผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ใยหิน (Asbestos Cement Product) และอิฐทรายปูนขาว (Sand-Lime Brick) โดยอุณหภูมิที่สูงมากขึ้นจะทำให้ผลิตผลไอเดรชันส่วนมากอยู่ในรูปของผลึกขนาดเล็กมาก (Microcrystalline) เป็นผลให้คุณสมบัติคอนกรีตเปลี่ยนไปในทางที่ดีขึ้นเป็นส่วนใหญ่คือ

ก. กำลังของคอนกรีตที่อายุ 24 ชั่วโมง เทียบเท่ากับกำลังของคอนกรีตที่บ่มโดยวิธีธรรมดาที่ อายุ 28 วัน

ข. มีความคงทนเพิ่มขึ้น โดยทนทานต่อการทำลายของสารซัลเฟตและสารเคมี และยังลดการเกิดรอยคราบเกลือ (Efflorescence)

ค. การหดตัวแห้ง (Drying Shrinkage) และการคืบ (Creep) ลดลงมากและคอนกรีตที่ได้หลังจากการบ่มจะมีความชื้นต่ำ

ส่วนคุณสมบัติของคอนกรีตที่ลดลงมีอยู่บ้าง ได้แก่คอนกรีตจะค่อนข้างเปราะ และการยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับเหล็กเสริมลดลง จึงไม่นิยมใช้กับคอนกรีตเสริมเหล็ก การบ่มไอน้ำความดันสูงจะให้ผลดียิ่งขึ้น ถ้าใส่สารซิลิกาบดละเอียดลงในส่วนผสม เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ซึ่งปริมาณของซิลิกาจะอยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึง 70 ของปูนซีเมนต์ หรือเท่ากับร้อยละ 30 ถึง 40 ของวัสดุประสาน

ขั้นตอนของการบ่มไอน้ำความดันสูงเริ่มจากการบ่มปกติระยะหนึ่งเพื่อให้คอนกรีตมีความแข็งแรงพอสำหรับการทำงาน จากนั้นเพิ่มความร้อนให้กับคอนกรีตอย่างสม่ำเสมอและไม่เร็วเกินไป เช่นเดียวกับการบ่มไอน้ำความดันต่ำ โดยใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมงและคงความร้อนที่อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 5 ถึง 8 ชั่วโมง การลดความร้อนลงจะทำได้เร็วกว่าโดยใช้เวลา 20 ถึง 30 นาที การบ่มไอน้ำความดันสูงสามารถใช้ได้กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่านั้น และจะไม่ใช้กับปูนซีเมนต์อลูมินาและปูนซีเมนต์ทนซัลเฟตเพราะมีผลกระทบทางด้านลบต่อคอนกรีตเนื่องจากการใช้อุณหภูมิที่สูงมาก

2.15 การบ่มและการป้องกันคอนกรีตสด

คอนกรีตต้องการน้ำสำหรับทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ถ้ามีน้ำในส่วนผสมคอนกรีตมากเกินไปจะทำให้เกิดช่องว่างในโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์มากและการรับกำลังจะลดลง ดังนั้นจึงพยายามที่จะใส่น้ำให้พอเพียงกับการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์เท่านั้น ในทางทฤษฎีปริมาณน้ำในอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.42 ก็พอเพียงที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัติส่วนผสม

ต้องการน้ำมากกว่าเพราะมีการสูญเสียน้ำในระหว่างการทำปฏิกิริยา ถ้าผสมน้ำน้อยไป เช่นที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำกว่า 0.45 ถึง 0.50 คอนกรีตจะใช้น้ำจนแห้งเรียกกว่า “การแห้งตัว” (self-desiccation) ต่อจากนั้นคอนกรีตจะไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อีก ยกเว้นว่าจะได้น้ำมาจากภายนอก นอกจากนี้คอนกรีตอาจสูญเสียน้ำจากการระเหยหรือจากการดูดซับน้ำของไม้แบบและพื้นรองคอนกรีต หากมีการสูญเสียน้ำจนทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในคอนกรีตลดลงต่ำกว่าร้อยละ 30 คอนกรีตจะเกิดการแห้งตัว ดังนั้นจึงต้องมีการบ่มคอนกรีตเพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนากำลังของคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างเต็มที่ โดยการป้องกันการสูญเสียน้ำของคอนกรีตในขณะที่เทด้วยการกำบังลมและกำบังแดดและบ่มอย่างต่อเนื่องเมื่อคอนกรีตก่อตัวและแข็งตัวแล้ว นอกจากนี้การบ่มยังสามารถช่วยควบคุมอุณหภูมิของคอนกรีตได้ด้วย **บอยเลอร์** หรือ **หม้อไอน้ำ** (อังกฤษ: boiler) หมายถึง เครื่องกำเนิดไอน้ำชนิดภาชนะปิด ทำด้วยเหล็กกล้าหรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติคล้ายกัน ซึ่งได้รับการออกแบบและสร้างอย่างแข็งแรงถูกต้องตามหลักเกณฑ์ทางวิศวกรรม ภายในภาชนะบรรจุน้ำและไอน้ำ [10]

2.16 การทำงานของหม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำจะได้รับความร้อนจากภายนอก หรือภายในก็ได้ จากนั้นจะส่งผ่านความร้อนต่อไปยังน้ำที่อยู่ภายในหม้อไอน้ำจนกระทั่งน้ำกลายเป็นไอ ส่วนใหญ่แล้วจะมีหน้าที่ในการสร้างไอน้ำเพื่อใช้ส่งผ่านความร้อนไปยังเครื่องจักรทำให้ต้นทุนค่าพลังงานถูกลงกว่าการใช้ไฟฟ้ากับเครื่องจักรบอยเลอร์นั้นปกติไม่ได้หมายถึงเครื่องกำเนิดไอน้ำเพียงอย่างเดียว แต่ยังหมายรวมถึงเครื่องกำเนิดน้ำร้อน (hot water boiler) และเครื่องกำเนิดน้ำมันร้อน (Thermal oil heater) ซึ่งที่กำลังอธิบายอยู่นี้จะหมายถึงการแบ่งชนิดของบอยเลอร์ตามตัวนำความร้อนโดยปกติทั่วๆไป

hot water boiler จะใช้งานช่วงอุณหภูมิไม่สูงมากนักไม่เกิน 120 องศาเซลเซียส ยกเว้นว่าเราจะใช้งานภายใต้ความดัน (under pressure)

steam boiler เป็นที่นิยมใช้งานบ่อย เพราะว่าไอน้ำเป็นตัวนำความร้อนที่ดีที่สุดถ่ายเทได้เร็ว โดยทั่วไปแบ่งได้หลายแบบ เช่น แบ่งตามการออกแบบ (4 Pass-dry back),(3 Pass- dry back), (3-Pass wet back), (2- Pass, reversing flame), Once Through boiler

2.17 ลักษณะของบอยเลอร์

แบ่งตามลักษณะการการถ่ายเทความร้อนแบบท่อไฟ (fire tube boiler) เป็นหม้อน้ำที่มีไฟวิ่งไปตามท่อ และถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำที่ล้อมรอบท่อไฟ แบ่งได้อีกเป็น 4 ประเภท

1. แบบลูกหมู (Cornish or Lancashire boiler) เป็นหม้อน้ำที่มีโครงสร้างง่ายๆ ประกอบด้วย เปลือกหม้อน้ำ และตัวลูกหมู(ท่อไฟใหญ่) แล้วหุ้มด้วยอิฐทนไฟเกือบมิดเปลือกประมาณ 3 ใน 4 ของทั้งหมด ส่วนใหญ่พบในโรงสีข้าว โรงเลื่อย ใช้เชื้อเพลิงแข็ง เช่น แกลบ ฟืน มีข้อดีคือ มีโครงสร้างและระบบการทำงานง่าย ทำความสะอาดง่าย สะดวก และราคาถูก แต่มีข้อเสีย

ตรงที่ต้องใช้เวลาติดเตานานกว่าจะนำเอาไอน้ำไปใช้ได้ เปลืองพื้นที่ ใช้เหล็กหนาทำให้ถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดี และได้ความดันต่ำ

2. แบบหม้อน้ำเรือ

3. แบบหม้อน้ำรถไฟ

4. แบบหม้อน้ำสำเร็จรูป

5. แบบท่อน้ำ (water tube boiler) จะพบเห็นในกรณีที่ไม่สามารถออกแบบเป็นแบบท่อไฟได้ พวกขนาด 100 -300 ตัน หรือแรงดัน 20 บาร์ขึ้นไปช่วงการใช้งานส่วนมากอุณหภูมิไม่เกิน 220 องศาเซลเซียส เพราะแรงดันจะสูงขึ้นมาก เมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เปิดดู Steam table ประกอบความเข้าใจ Thermal oil heater จะใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า Steam boiler โดยทั่วไปใช้ที่อุณหภูมิประมาณ 220 - 300 องศาเซลเซียส มีบางโรงงานใช้เกินกว่านั้น จะต้องออกแบบเครื่องแบบพิเศษให้สามารถรองรับได้ อาจใช้ได้ถึง 350 องศาเซลเซียส

2.18 การแบ่งประเภทของหม้อไอน้ำ

การออกแบบหม้อไอน้ำจึงมีอยู่หลายแบบตามความเหมาะสมของการนำไปใช้งานดังนี้ [10]

1. แบ่งตามลักษณะการวางแนวแกนของเปลือกหม้อไอน้ำ
2. แบ่งตามลักษณะการใช้งาน
3. แบ่งตามตำแหน่งเตา
4. แบ่งตามน้ำหรือแก๊สร้อนที่อยู่ในท่อ
5. หม้อไอน้ำที่สร้างขึ้นมาพิเศษ

รูปที่ 2-6 แสดงลักษณะของบอยเลอร์

2.19 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

Site of Civil Engineer [11] การบ่มคอนกรีตเป็นการควบคุมและป้องกันมิให้น้ำในคอนกรีตระเหยออกจากคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเร็วเกินไป เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญที่สุดสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง ดังนั้น หลังจากที่ผิวหน้าคอนกรีตแข็งตัวแล้ว จะต้องบ่มคอนกรีตให้มีความชื้นอยู่เสมอ เป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน กำลังของคอนกรีตจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตราบเท่าที่ยังมีความชื้นให้ปูนซีเมนต์ได้ทำปฏิกิริยากับน้ำ

รศ.ดร.ชัย จาตุพิทักษ์กุล [1] การบ่มไอน้ำความดันสูง การเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นสามารถทำได้โดยการบ่มไอน้ำและใช้ความดันเข้าช่วย ซึ่งจะต้องใช้ภาชนะที่แข็งแรงและสามารถปิดได้สนิท เรียกว่าออโตเคลฟ (Autoclave) การบ่มไอน้ำความดันสูง (High Pressure Steam Curing หรือ Autoclave) จะใช้อุณหภูมิประมาณ 160 ถึง 220 องศาเซลเซียสที่ความดันประมาณ 6 ถึง 20 เท่าของบรรยากาศ นิยมใช้กับคอนกรีตสำเร็จรูปและผลิตภัณฑ์คอนกรีตบางชนิด เช่น ผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ใยหิน (Asbestos Cement Product) และอิฐทรายปูนขาว (Sand-Lime Brick) โดยอุณหภูมิที่สูงมากขึ้นจะทำให้ผลิตผลไฮเดรชันส่วนมากอยู่ในรูปของผลึกขนาดเล็กมาก (Microcrystalline) เป็นผลให้คุณสมบัติคอนกรีตเปลี่ยนไปในทางที่ดีขึ้นเป็นส่วนใหญ่

วินิต ช่อวิเชียร (คอนกรีตเทคโนโลยี) [12] การบ่มคอนกรีต หรือการบำรุงรักษาคอนกรีตเป็นการคอยควบคุมดูแลให้น้ำได้เข้ามาทำปฏิกิริยาหลังจากที่ คอนกรีตได้สูญเสียน้ำไปแล้วในช่วงเวลาที่ทำงาน เช่น การผสม การลำเลียง การเทลงในแบบ การกระทุ้งเพื่อให้คอนกรีต แน่น การแต่งผิวหน้าให้เรียบ ขั้นตอนเหล่านี้เป็นขั้นตอนที่ทำให้น้ำที่ผสมในคอนกรีตได้ระเหยออกไป ทำให้คอนกรีต ขาดน้ำ เมื่อคอนกรีตเริ่มรวมตัวกันเพื่อจะแข็งตัว ก็จะเกิดการดึงที่ผิวของคอนกรีต ซึ่งจะเกิดรอยแตกร้าว รอยแยกขึ้นที่ผิว หน้าของคอนกรีต ฉะนั้นเมื่อคอนกรีตมีอายุ 24 ชั่วโมงแล้วต้องนำน้ำกลับมาเพื่อให้ประสิทธิภาพและประสิทธิผลของ คอนกรีตแข็งแรง สามารถรับกำลังได้เต็มที่ และลดการแตกร้าวซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งของงานคอนกรีตที่วิศวกรก่อสร้างและ ผู้สนใจควรศึกษาไว้ เพื่อให้ได้ผลงานการก่อสร้างที่ดีต่อไป

สภาวิศวกร (Council of Engineer) [13] การบ่มด้วยการเร่งกำลัง เป็นการบ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำ โดยให้ความชื้น และความร้อน กับคอนกรีตที่หล่อเสร็จใหม่ๆ วิธีนี้จะทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นโดยรวดเร็วช่วยลดการหดตัว และเพิ่มความต้านทานต่อสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต การบ่มคอนกรีตด้วยวิธีนี้สามารถทำได้สองวิธี คือการบ่มด้วยไอน้ำที่มีความดันต่ำ และการบ่มด้วยไอน้ำที่มีความดันสูง การบ่มด้วยการเร่งกำลัง นิยมใช้กันในงานอุตสาหกรรมคอนกรีตสำเร็จรูป

รศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ [14] ซีเมนต์ (Cement) โดยทั่วไปหมายถึงวัสดุประสานซึ่งสามารถยึดวัตถุชิ้นเล็กๆเข้าด้วยกัน คำว่าซีเมนต์นี้ยังกินความถึงสารซีเมนต์หลายประเภท แต่สำหรับงานด้านวิศวกรรมโยธาและการก่อสร้าง ซีเมนต์หมายถึง วัสดุผงละเอียดสีเทาหรือสีเทาเข้ม เมื่อผสมน้ำจะสามารถใช้เป็นวัสดุประสานยึดวัสดุประเภท อิฐ หิน และทราย เข้าด้วยกัน

ASTM.C.150 Standard Specification for Portland Cement [15] วัตถุที่เรียกว่าปูนซีเมนต์หมายถึง สารประกอบอย่างหนึ่งมีลักษณะเป็นผงที่บดละเอียดซึ่งเมื่อได้ผสมกับน้ำตามอัตราส่วนที่พอดีแล้วทิ้งไว้ระยะหนึ่งจะแข็งตัว โดยมนุษย์ในสมัยโบราณได้ค้นพบว่าเมื่อเอาหินบางชนิดมาทำการเผาจนสลายเป็นผงแล้วบดให้ละเอียดแล้วนำมาผสมน้ำทิ้งไว้ชั่วเวลาหนึ่ง ก็จะได้ผลผลิตที่แข็งเป็นก้อน เป็นรูปร่างตามต้องการปูนซีเมนต์ ในปัจจุบันปูนซีเมนต์ทำจากวัตถุดิบที่มีธาตุอลูมินัมหรือซิลิก้า ซึ่งได้แก่ ดินดำ ดินขาว หรือ ศิลาแลง ซึ่งมีธาตุเหล็กมาผสม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

บทที่ 3
ระเบียบวิธีการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงการทดลอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาวิจัยทดลองการนำผงจุลินทรีย์มาผสมในคอนกรีตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านการรับกำลังอัดของคอนกรีตและทำการบ่มคอนกรีตโดยวิธีบ่มไอน้ำ เพื่อให้สามารถลดระยะเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานผลิตภัณฑ์ รวมถึงความคงทนของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากคอนกรีตที่ผสมผงจุลินทรีย์ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในงานด้านวิศวกรรม

รูปที่ 3-1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

1. ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุทั้งหมด

2. ทำการสร้างถังบ่มไอน้ำ

3. ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยวิธี American Concrete Institute (ACI) โดยออกแบบให้คอนกรีตรับกำลังอัดที่ 250 kg/cm^2

4. ทำการผสมคอนกรีตตามที่ออกแบบไว้ และถอดแบบหล่อคอนกรีตที่อายุ 24 ชั่วโมง เพื่อทำการบ่มคอนกรีตโดยวิธีบ่มในน้ำและวิธีไอน้ำ

5. ทำการบ่มคอนกรีตโดยวิธีไอน้ำที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C – 120 $^{\circ}$C

6. ทำการบ่มคอนกรีตโดยวิธีไอน้ำแรงดันต่ำที่อายุ 3, 7, 14, และ 28 วัน แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตออกจากถังอบ ทิ้งไว้ในอุณหภูมิปกติก่อนนำมาทดสอบค่ากำลังอัด

7. ทดสอบตัวอย่างคอนกรีต เมื่อตัวอย่างคอนกรีตครบ 3, 7, 14, และ 28 วัน

3.2 การศึกษาคุณสมบัติกายภาพของวัสดุ

3.2.1 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และผงจุลินทรีย์

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาคอนกรีตที่นำมาใช้ประโยชน์ในส่วนของงานโครงสร้างเป็นหลักจึงใช้ในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ในการทดลองกระบวนการทดลองซีเมนต์ผงที่ต้องการทดสอบหนักประมาณ 200 g.

เครื่องมือทดสอบ

1. ขวดทดลองมาตรฐานเลอแชททีเลียร์ (Standard Le Chatelier Flask) จำนวน 1 ใบ
2. หลอดกรวยสำหรับกรอกซีเมนต์ผงลงในขวดมาตรฐาน จำนวน 1 ใบ
3. เทอร์โมมิเตอร์ (0 – 100 $^{\circ}$C) จำนวน 1 อัน
4. น้ำมันก๊าด (Kerosene) ปริมาตรประมาณ 1,000 ml.
5. บีกเกอร์ขนาด 500 ml. จำนวน 1 ใบ
6. เครื่องชั่งอ่านได้ละเอียดไม่น้อยกว่า 1 g
7. ถาดสำหรับใส่ซีเมนต์ จำนวน 1 ใบ

วิธีทดสอบ

1. จัดเตรียมน้ำในอ่างให้มีอุณหภูมิคงที่ที่ 20 $^{\circ}$C ตามที่กำหนดไว้ พยายามควบคุมอุณหภูมิในอ่างน้ำให้มีอุณหภูมิคงที่ตลอดการทดลอง

2. เทน้ำมันก๊าดลงในขวดทดลองมาตรฐานเลอแชททีเลียร์ จนกระทั่งระดับของน้ำมันก๊าดอยู่ระหว่างขีดบอกปริมาตร 0 และ 1 mm. คอขวดซึ่งอยู่เหนือระดับน้ำมันก๊าดควรเช็ดให้แห้ง

3. จุ่มขวดทดลองในอ่างน้ำในข้อที่ 1 แล้วให้ทิ้งไว้จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำมันก๊าดและน้ำในอ่างเท่ากัน อ่านค่าอุณหภูมิของน้ำและขีดค่าปริมาตรของน้ำมันก๊าดในขวดทดลอง

4. ชั่งน้ำหนักของขวดทดลองและน้ำมันก๊าดครั้งแรก จากนั้นค่อยๆ ใส่ซีเมนต์ลงในขวดทดลอง การใส่ซีเมนต์ควรไม่ให้ซีเมนต์ตกกระจาย และจะต้องระวังไม่ให้ซีเมนต์เกาะติดตามคอขวดทดลองด้วย

5. ให้หยุดใส่ซีเมนต์เมื่อระดับของน้ำมันก๊าดขึ้นมาอยู่ระหว่างช่วงของขีดบอกปริมาตรส่วนบนของขวดทดลอง จากนั้นทำการไล่ฟองอากาศซึ่งอาจเกาะอยู่กับผงซีเมนต์ การไล่ฟองอากาศให้ปิดปากขวดทดลองด้วยจุกแก้ว แล้วเอียงขวดและหมุนช้าๆ จนกระทั่งไม่มีฟองอากาศลอยขึ้นมาอีก

6. จุ่มขวดทดลองในอ่างน้ำอีกครั้งหนึ่ง เช่นเดียวกับข้อที่ 3 ก่อนจะอ่านปริมาตรทุกครั้ง ผู้ทำการทดลองจะต้องแน่ใจว่าอุณหภูมิของน้ำมันก๊าดในขวดทดลองเท่ากับอุณหภูมิของน้ำในอ่างเพื่อที่จะไม่ให้อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดในการอ่านครั้งที่ 1 และ 2 ต่างกันไม่เกินกว่า 0.2 $^{\circ}$C

7. อ่านอุณหภูมิของน้ำและปริมาตรของน้ำมันก๊าดในขวดทดลอง

8. ชั่งน้ำหนักของขวดทดลองและน้ำมันก๊าดครั้งหลัง ผลต่างของน้ำหนักของการชั่งสองครั้งจะเท่ากับน้ำหนักของซีเมนต์ที่ใส่ลงไปในขวดทดลอง

9. ทำการทดลองซ้ำอีกอย่างน้อย 1 ครั้ง จากข้อ 2 ถึงข้อ 8 จนกว่าจะได้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ

การคำนวณ

1. ผลต่างระหว่างปริมาตรที่อ่านได้ของครั้งแรกและครั้งที่สองจะเท่ากับปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่โดยซีเมนต์ที่ใช้

2. ผลต่างของน้ำหนักของขวดทดลองและน้ำมันก๊าดทั้งสองครั้งจะเท่ากับน้ำหนักของซีเมนต์ที่ใส่ลงไปในขวดทดลอง

3. คำนวณหาความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ให้ได้ละเอียดถึงจุดทศนิยม 3 ตำแหน่ง ในการหาค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยให้ปัดเศษด้วยเลขเหลือเพียงทศนิยม 2 ตำแหน่ง

ความถ่วงจำเพาะซีเมนต์

= น้ำหนักซีเมนต์ (g.) / ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่ (mm)

3.2.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวม (Test of Specific Gravity and Absorption of Aggregate)

เครื่องมือทดสอบ

1. เครื่องชั่งที่สามารถชั่งได้ละเอียด 1 g.
2. กระบอกตวง ขนาดความจุ 500 ml.
3. กรวยโลหะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.75 cm. เส้นผ่านศูนย์กลางส่วนล่าง 8.9 cm. ความสูง 7.4 cm. ทำด้วยแผ่นโลหะหนาประมาณ 0.9 mm.
4. เหล็กกระทุ้ง ปลายเรียบเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm. น้ำหนัก 340 g.
5. ตะกร้าลวดเหล็ก
6. เครื่องเป่าผม, ถาดโลหะ, ผ้าแห้ง และตู้อบอุณหภูมิ

วิธีทดสอบ

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมละเอียด

1. นำเอามวลรวมละเอียดจากที่เก็บมาประมาณ 1,000 g. โดยใช้วิธีการของการแบ่งสี่ (Method of Quartering)
2. จากนั้นนำมวลรวมละเอียดมาทำให้แห้งโดยใช้เครื่องเป่าผมเป่ามวลรวมละเอียดให้ทั่ว จนมวลรวมละเอียดนั้นแห้งสม่ำเสมอและอยู่ในสภาวะของการไหลอิสระ (Free Flowing)
3. การทดสอบว่ามวลรวมละเอียดอยู่ในสภาวะของการไหลอิสระทำได้โดยเทมวลรวมละเอียดนั้นลงในกรวยโลหะจนเต็ม แล้วกระทุ้งเบา ๆ ด้วยเหล็กกระทุ้ง เป็นจำนวน 25 ครั้ง จากนั้นยกกรวยขึ้นตรงๆ ในแนวดิ่ง ถ้าหากว่ามวลรวมละเอียดยังมีความชื้นที่ผิว (Surface Moisture) อยู่ มวลรวมละเอียดนั้นจะยังคงรูปร่างเป็นรูปกรวยอยู่
4. ในกรณีที่ยังมีความชื้นที่ผิวอยู่ ให้ใช้เครื่องเป่าผมไล่ความชื้นที่ผิวต่อไปอีก แล้วนำมวลรวมละเอียดไปทดสอบในกรวยโลหะอีกเช่นเดิม ทำเช่นนี้เป็นช่วงๆจนกระทั่งเห็นว่า เมื่อยกกรวยขึ้นแล้วมวลรวมละเอียดยุบตัวลงเล็กน้อย ซึ่งแสดงว่ามวลรวมละเอียดนั้นมีการไหลตัวอิสระ ไม่มีความชื้นที่ผิว เราเรียกว่าอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry)
5. จากนั้นให้เทมวลรวมละเอียดจำนวน 500 g ลงไปในกระบอกตวง แล้วเติมน้ำจนถึงขีดระดับประมาณ 450 ml เขย่ากระบอกตวงเพื่อไล่ฟองอากาศออก เติมน้ำจนถึงระดับ 500 mm ชั่งหาน้ำหนักของกระบอกตวง มวลรวมและน้ำทั้งหมด
6. เทมวลรวมละเอียดออกจากกระบอกตวงใส่ในถาดโลหะ แล้วนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 100-110 $^{\circ}$C จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ (อบประมาณ 24 ชั่วโมง) จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 1–1 ½ ชั่วโมงแล้วชั่งหาน้ำหนักของมวลรวมละเอียดที่แห้งชั่งหาน้ำหนักของกระบอกตวงที่มีน้ำที่ระดับ 500 ml ที่อุณหภูมิประมาณ 23 $^{\circ}$C

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมหยาบ

1. นำมวลรวมหยาบจากที่เก็บมาประมาณเท่าที่ต้องการ โดยวิธีการของการแบ่งสี่ (Method of Quartering) ร่อนเอาส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ทิ้งไป

2. ล้างมวลรวมหยาบด้วยน้ำ เพื่อขจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกที่ติดตามผิวของมวลรวมหยาบนั้น

3. นำเอามวลรวมหยาบแต่ละก้อนมาเช็ดถูด้วยผ้า ให้น้ำที่เกาะตามผิวของมวลรวมหยาบถูกดูด ซับไป โดยที่ผิวของมวลรวมหยาบยังชื้นอยู่ หลีกเลี่ยงอย่าให้มีการระเหยของความชื้นในขณะเช็ดถู มวลรวมหยาบจะอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง

4. ชั่งน้ำหนักของมวลรวมหยาบในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง เทมวลรวมหยาบในสภาวะอิ่มตัวผิวห้างนี้ลงในตะกร้าลวดเหล็กแล้วชั่งหาน้ำหนักในน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 23 $^{\circ}$C

5. จากนั้นนำเอามวลรวมหยาบนั้นไปอบในเตาอบอุณหภูมิประมาณ 100 – 110 $^{\circ}$C จนได้น้ำหนักคงที่แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1-3 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปชั่ง

การคำนวณ

1. Bulk Specific Gravity (สภาพแห้ง) = A / (B-C)
2. Bulk Specific Gravity (อิ่มตัวผิวแห้ง) = B / (B-C)
3. Apparent Specific Gravity (ความถ่วงจำเพาะ) = A / (A-C)
4. Absorption, % (เปอร์เซ็นต์การดูดซึม) = ((B-A)/A) × 100%

3.2.3 การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวม (Test for Unit Weight of Concrete Aggregate)

เครื่องมือทดสอบ

1. เครื่องชั่ง
2. เหล็กกระทุ้ง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 cm. ยาวประมาณ 60 cm. และมีปลายมน
3. กระบอกตวงโลหะรูปทรงกระบอก ซึ่งใช้สำหรับตวงมวลรวม ความจุและขนาดของกระบอกตวงสำหรับมวลรวมแต่ละชนิดที่ต้องการทดสอบ
4. เตาอบ
5. แผ่นกระจก

วิธีทดสอบ

1. นำมวลรวมที่ต้องการทดสอบไปอบในเตาอบให้ได้น้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิ 100 – 110 $^{\circ}$C แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

2. ใส่น้ำที่อุณหภูมิห้องลงในกระบอกตวงให้เต็ม ไล่ฟองอากาศและน้ำที่มีอยู่เกินโดยใช้แผ่นกระจกปิด

3. คำนวณหาน้ำหนักของน้ำในกระบอกตวงโดยการชั่ง

4. วัดอุณหภูมิของน้ำ แล้วคำนวณหาหน่วยน้ำหนักของน้ำ

5. เทมวลรวมลงในกระบอกตวงให้สูงประมาณ 1/3 ของความสูง ใช้มือปาดผิวให้เรียบ แล้วกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งให้ทั่วจำนวน 25 ครั้ง

6. เทมวลรวมเพิ่มลงไปในกระบอกตวงให้ได้ความสูงประมาณ 2/3 ของความสูงใช้มือปาดผิวน้าให้เรียบ แล้วกระทุ้งให้ทั่วอีก 25 ครั้ง

7. เทมวลรวมเพิ่มลงไปในกระบอกตวงอีกจนล้นกระบอกตวง แล้วกระทุ้งให้ทั่วอีก 25 ครั้ง หมายเหตุ : ในการกระทุ้งขั้นแรกพยายามอย่าให้เหล็กกระแทกฐานกระบอกตวงแรงเกินไปและในการกระทุ้งชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ให้ใช้แรงกระทุ้งที่พอเหมาะที่ทำให้เหล็กกระทุ้งถึงชั้นก่อนของมวลรวมเท่านั้น

8. ปาดผิวหน้าของมวลรวมให้เรียบร้อยด้วยมือหรือด้วยเหล็กกระทุ้ง (สำหรับมวลรวมหยาบให้ปาดให้เรียบในลักษณะที่ประมาณว่าส่วนที่โผล่ออกมาของมวลรวมหยาบเท่า ๆ กับช่องว่างที่ผิวหน้าของกระบอกตวง

9. ชั่งหาน้ำหนักของมวลรวมในกระบอกตวง แล้วคำนวณหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวม

การคำนวณ

1. หาปริมาตรความจุของกระบอกตวง (Volume) โดยสมการ $V=ww/\gamma w$

เมื่อ ww = น้ำหนักเฉพาะน้ำหนักในกระบอกตวง (kg)

γw = หน่วยน้ำหนักของน้ำที่อุณหภูมิขณะนั้น (kg/m^3)

V = ปริมาตรของกระบอกตวง (m^3)

2. หาหน่วยน้ำหนักของมวลรวม (Unit Weight of Aggregate)

จากสมการ $\gamma t = W/V$

เมื่อ γt = หน่วยน้ำหนักของมวลรวม (kg/m^3)

W = หน่วยน้ำหนักของมวลรวม (kg.)

V = ปริมาณของมวลรวม (m^3)

3. หาปริมาณช่องว่าง (%) จากสมการ $((Gd \times \gamma w) - \gamma t) \times 100/Gd \times \gamma w)$

เมื่อ Gd = ความถ่วงจำเพาะมวลรวมในสภาพแห้ง

3.2.4 การหาขนาดคละ และ ค่า F.M.ของทราย (Sieve Analysis)

เครื่องมือทดสอบ

1. ตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8″ No.4, No.8, No.16, No.30, No.50, No.100, No.200, Pan.

2. เครื่องร่อนทราย

3. เครื่องชั่งชั่งได้ละเอียดไม่น้อยกว่า 1 g ชั่งได้หนักไม่น้อยกว่า 500 g

วิธีทดสอบและวิธีคำนวณ

1. แบ่งตัวอย่างให้ได้ทรายหนักประมาณ 500 g

2. นำไปอบแห้งอุณหภูมิ 110 $^{\circ}$C

3. ชั่งน้ำหนักทรายหลังจากอบแห้ง แล้วนำไปล้างผ่านตะแกรง No. 200

4. นำส่วนที่ค้างไปอบแห้ง บันทึกน้ำหนักไว้ นำทรายใส่ลงในตะแกรงซึ่งจัดไว้ดังนี้ No.4, No.8, No.16, No.30, No.50, No.100, No.200 และ Pan. ปิดฝาเข้าเครื่องร่อนทราย ร่อนนานไม่น้อยกว่า 10 นาที

5. ชั่งน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงแต่ละเบอร์รวมทั้ง Pan.

6. จัดลำดับน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงจากใหญ่ไปหาเล็ก โดยให้น้ำหนักที่ค้างบน Pan. คือน้ำหนักที่ค้างตะแกรง No.200 และน้ำหนักที่ผ่าน No.200 จากการล้าง คือ น้ำหนักที่ค้างบน Pan.

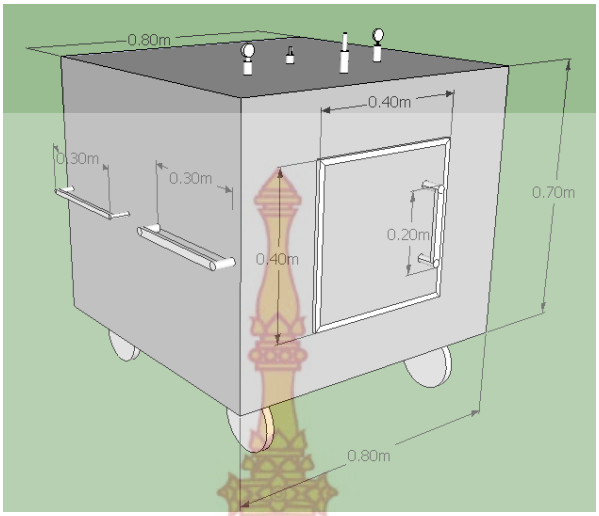
7. คำนวณเปอร์เซ็นต์ค้าง, รวมเปอร์เซ็นต์ค้างและเปอร์เซ็นต์ผ่านของตะแกรงแต่ละเบอร์

8. ค่า Finess Modulus (F.M.) คือ ค่าซึ่งได้จากการรวมของช่องรวมเปอร์เซ็นต์ค้าง ตั้งแต่ No.4 ลงไปถึง No.100 (คิดเฉพาะขนาดตะแกรงที่เป็น 2 เท่า) ได้ค่าเท่าไรหารด้วย 100จะเป็นค่า F.M. ของทราย ส่วนเปอร์เซ็นต์ผ่าน No.200 ก็จะทราบจากค่าเปอร์เซ็นต์ผ่านของตะแกรง No.200

3.3 สร้างอุปกรณ์ต้นแบบถังบ่มไอน้ำ

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างถังบ่มไอน้ำ

1. เหล็กแผ่นขนาด 800x800x10 mm.
2. ฝาเปิดใช้เหล็กแผ่นขนาด 400x400x10 mm.
3. มือจับใช้เหล็กขนาด ¾ นิ้ว
4. บู๊ทเหล็กขนาด 2 นิ้ว
5. ล้อเหล็กชนิดแป้นหมุดและแป้นตาย ขนาด 4 นิ้ว
6. เกจ์วัดแรงดันขนาด 2.5 นิ้ว
7. เกจ์วัดอุณหภูมิและความชื้นขนาด 2 นิ้ว



รูปที่ 3-2 แสดงตู้บ่มคอนกรีต

3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

1. เครื่องทดสอบแรงอัดคอนกรีต ที่มีกำลังอัดตามความเหมาะสมกับสภาพการใช้งาน เพิ่มอัตราการกดได้อย่างสม่ำเสมออยู่ในช่วง 85.8 – 208.2 kg/cm^2/sec ซึ่งอัตราการเพิ่มที่เหมาะสมควรมีค่าเท่ากับ 140 kg/cm^2/sec แท่นที่ใช้กดคอนกรีตตัวอย่างต้องมีฐานเป็นรูปครึ่งทรงกลม ตัวแท่นอัดควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งทดสอบคอนกรีตเล็กน้อย

2. เครื่องชั่ง ชั่งได้ไม่น้อยกว่า 20 kg ความละเอียด 1 g

3.4 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตและการทดสอบคุณสมบัติกำลังอัดของคอนกรีต

3.4.1 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยวิธี American Concrete Institute (ACI)

1. ความถ่วงจำเพาะวัสดุผสมละเอียด	3.15	
2. ความถ่วงจำเพาะวัสดุผสมละเอียด	2.57	
3. ความถ่วงจำเพาะวัสดุผสมหยาบ	2.87	
4. หินมีขนาดโตสุด	25	mm
5. ค่าการดูดซึมของวัสดุผสมละเอียด	4	%
6. หน่วยน้ำหนักวัสดุผสมละเอียด	1,350	kg/m^3
7. ค่าการดูดซึมของวัสดุผสมหยาบ	6	%
8. หน่วยน้ำหนักวัสดุผสมหยาบ	1,680	kg/m^3
9. ค่าโมดูลัสความละเอียดวัสดุผสมละเอียด	2.16	
10. ปริมาณความชื้นของวัสดุผสมละเอียด	1	%
11. ปริมาณความชื้นของวัสดุผสมหยาบ	1	%

12. กำหนดประเภท ค่าการยุบตัว 1 %

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

1. ขนาดโตสุดของหิน 25 mm
2. ปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ 175 l/m
3. คอนกรีตต้องการกำลังอัดเฉลี่ย 250 ksc
4. ได้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.620
5. ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต้องการ 282.26 kg/m^3
6. ปริมาณวัสดุผสมหยาบ 747.32 kg/m^3
7. ปริมาณของวัสดุผสมต่อจำนวนคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตรปริมาณเนื้อแท้ของส่วนผสม

ปริมาณของน้ำ	0.175	m^3
ปริมาณของปูนซีเมนต์	0.090	m^3
ปริมาณวัสดุผสมหยาบ	0.2604	m^3
ปริมาณฟองอากาศ	1	%
รวมปริมาณทั้งหมด(ยกเว้นทราย)	0.535	m^3
ปริมาณทรายที่ต้องการ	0.465	m^3

3.4.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

1. ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่กำลังอัดออกแบบ 250 kg/cm รูปทรงกระบอกขนาด 10 x 20 cm โดยวิธีการบ่มปกติที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน โดยปริมาณอัตราส่วนที่เหมาะสมของการผสมผงจุลินทรีย์ในคอนกรีตโดยใช้ผงจุลินทรีย์แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละของน้ำหนัก 1% , 2% , 3% , 4% และ 5%

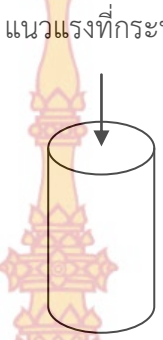
2. ทดสอบกำลังของคอนกรีตที่กำลังอัดออกแบบ 250 kg/cm รูปทรง ทรงกระบอกขนาด10 x 20 cm โดยวิธีการบ่มไอน้ำแรงดันต่ำ ที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}C$ – 120 $^{\circ}C$ โดยใช้ผงจุลินทรีย์แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละของน้ำหนัก 1% , 2% , 3%, 4% และ 5%

3.5 วิธีการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต

1. ทำความสะอาดพื้นผิวของแท่นกดเครื่องทดสอบ
2. วางแท่งตัวอย่างทดสอบ โดยวางให้ตรงแนวศูนย์กลางของแท่น กดแท่นบนและแท่นล่าง
3. ทำการเดินเครื่องทดสอบ โดยเพิ่มแรงกดอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งอัตราการเพิ่มแรงที่เหมาะสมควรมีค่าเท่ากับ 140 $kg/cm^2/sec$ ไม่ควรปรับอัตราการเพิ่มแรงกดในระหว่างที่แท่งตัวอย่างถึงบริเวณใกล้เคียงจุดครากถึงจุดวิบัติ

4. ทำการกดจนกระทั่งแท่งคอนกรีตตัวอย่างวิบัติ พร้อมบันทึกค่าแรงสูงสุดไว้

5. เตรียมตัวอย่างการทดสอบโดยวิธีการบ่มปกติและการบ่มแรงดันไอน้ำที่ระยะเวลา 15 ชั่วโมง อย่างละ 3 ตัวอย่างซึ่งค่า % flow ที่ได้ทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยการทดสอบกำลังอัดลูกปูนขนาด 10×20 cm โดยให้กำลังทางด้านที่ผิวเรียบ 1 ด้าน



รูปที่ 3-3 วิธีการทดสอบคอนกรีต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

4.1.1 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และผงจุลินทรีย์

ตารางที่ 4-1 ผลการหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์

Test No.	1	2
Before gasoline level (ml)	0.60	0.70
Before gasoline temperature (°c)	33.00	33.00
Wt.Cement and the before tray (g)	266.15	266.15
Wt.Cement and after tray (g)	206.80	208.63
Wt.Cement (g)	59.35	57.52
Levels of gasoline after (ml)	19.50	18.90
After gasoline temperature (°c)	33.00	33.00
Instead Volume (ml)	18.90	18.20
Specific Gravity	3.14	3.16
Average Specific Gravity	3.15	

ตารางที่ 4-2 ผลการหาค่าความถ่วงจำเพาะของผงจุลินทรีย์

Test No.	1	2
Before gasoline level (ml)	0.70	0.60
Before gasoline temperature (°c)	20.00	20.00
Wt.powder microbes and the before tray (g)	356.00	359.00
Wt.powder microbes and after tray (g)	323.00	325.00
Wt.powder microbes (g)	33.00	34.00
Levels of gasoline after (ml)	18.90	19.00
After gasoline temperature (°c)	21.00	21.00
Instead Volume (ml)	18.70	18.40
Specific Gravity	1.81	1.84
Average Specific Gravity	1.83	

4.1.2 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวม

ตารางที่ 4-3 ผลการหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมละเอียด

Determnation No.	1	2
Wt.Sand (Sat.Surf.Dry) (B),(gm)	500.00	498.00
Wt.Flask+Sand(Sat.Surf.Dry)+Water (C),(gm)	971.00	968.00
Temperature °c	29.00	29.00
Wt.Dry Sand (A),(gm)	486.00	487.00
Wt.Flask+Water(D),(gm)	663.00	657.00
Bulk Specific Gravity ,A/(B+D-C)	2.53	2.60
Bulk Specific Gravity,(Sat.Surf.Dry),B/(B+D-C)	2.60	2.66
Apparent Specific Gravity , A/(D+A-C)	2.88	2.26
Percent Absorption(%),((B-A)/A)×100	1.37	1.41
Average Apparent Specific Gravity	2.57	
Average Percent Absorption	1.39	

ตารางที่ 4-4 ผลการหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมหยาบ

Tesred No.	1	2
Wt.Sat.Surf.Dry Coarse Aggregte (B),(gm)	1000.00	999.00
Wt.Dry Coarse Aggregate (A),(gm)	996.60	997.00
Wt.Sat.Coarse Aggregate in water (C),(gm)	645.00	654.00
Bulk Specific Gravity (Oven dry basic) A/(B-C)	2.81	2.89
Bulk Specific Gravity (Sat.Surf.dry basic) B/(B-C)	2.82	2.90
Apparent Specific Gravity A/(A-C)	2.83	2.91
Percent Absorption ((B-A)/A)*100%	0.34	0.20
Average Apparent Specific Gravity	2.87	
Average Percent Absorption	0.27	

4.1.3 การหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวม

ตารางที่ 4-5 ผลการหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด

Sample No.	Type of Sample	Wt. Container (kg)	Wt.AGG+ Container (kg)	Wt. AGG. (kg)	Volume Container (m^3)	Average Wt.AGG (kg/m^3)	Unit Weight (kg/m^3)	Percent Void (%)
1	ทราย	7.36	9.88	2.52	0.00157	1,605.10	1,609.27	40.72
2		7.36	9.87	2.51	0.00157	1,601.27	1,605.44	40.86
3		7.36	9.88	2.53	0.00157	1,608.28	1,612.46	40.60
Average						1,604.88	1,609.06	40.72

ตารางที่ 4-6 ผลการหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ

Sample No.	Type of Sample	Wt. Container (kg)	Wt.AGG+ Container (kg)	Wt. AGG. (kg)	Volume Container (m^3)	Average Wt.AGG (kg/m^3)	Unit Weight (kg/m^3)	Percent Void (%)
1	หิน	2.75	7.00	4.25	0.0027	1,574.07	1,578.17	42.71
2		2.70	6.97	4.27	0.0027	1,581.48	1,582.59	42.44
3		2.76	7.02	4.26	0.0027	1,577.78	1,581.88	42.57
Average						1,577.78	1,581.9	42.57

4.1.4 การหาขนาดคละและค่า Fineness Modulus (F.M.) ของทราย

ตารางที่ 4-7 ผลการหาขนาดคละของทราย

Sieve No.	Wt. Sample (gm)	Percent Sample on sieve	Percent Retained
4	5.250	1.050	1.050
8	23.870	4.774	5.824
16	67.990	13.598	19.422
30	150.560	30.112	49.534
50	187.780	37.556	87.090
100	54.060	10.812	97.902
200	6.990	1.398	-
Pan	3.500	0.700	-
SUM	500.000	100.000	260.822

Fineness Modulus = 2.61

4.2 การทดสอบหาค่าต้านทานกำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 4-8 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 0% ที่อายุ 3 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.00	10.07	20.00	20.00	3.601	60	6,116.21	76.79
		10.10		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.07	10.06	20.00	20.03	3.670	65	6,625.89	83.35
		10.10		20.00					
		10.00		20.10					
	3	10.10	10.12	20.00	20.00	3.593	65	6,625.89	82.37
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.10	10.07	20.00	20.00	3.554	62	6,320.08	79.35
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.00	10.10	19.90	19.97	3.652	67	6,829.77	85.18
		10.10		20.00					
		10.20		20.00					
Steam curing	1	10.00	10.07	20.00	20.00	3.601	78	7,951.07	99.82
		10.10		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.07	10.06	20.00	20.03	3.670	85	8,664.63	109.00
		10.10		20.00					
		10.00		20.10					
	3	10.10	10.12	20.00	20.00	3.593	84	8,562.69	106.44
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.10	10.07	20.00	20.00	3.554	80	8,154.94	102.38
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.00	10.10	19.90	19.97	3.652	87	8,868.50	110.61
		10.10		20.00					
		10.20		20.00					

ตารางที่ 4-9 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 0% ที่อายุ 7 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

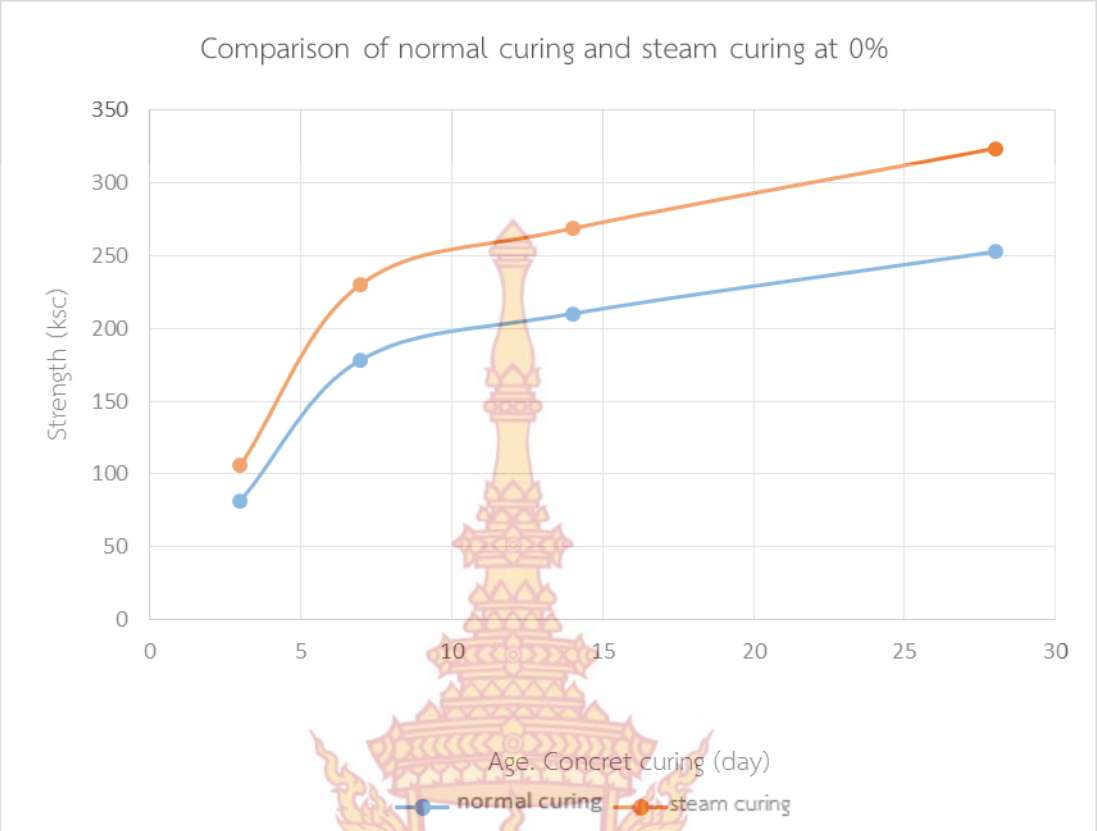
Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.06	10.03	20.00	20.00	3.690	135	13,761.47	174.15
		10.00		20.00					
		10.02		20.00					
	2	10.05	10.10	20.00	20.03	3.730	140	14,271.15	177.99
		10.15		20.00					
		10.10		20.10					
	3	10.05	10.04	20.00	20.00	3.363	140	14,271.15	180.00
		10.08		20.00					
		10.00		20.00					
	4	10.06	10.06	20.00	20.00	3.710	138	14,067.28	176.96
		10.07		20.00					
		10.04		20.00					
	5	10.00	10.06	19.90	19.97	3.680	135	13,761.47	172.89
		10.09		20.00					
		10.10		20.00					
Steam curing	1	10.01	10.02	20.00	20.03	3.690	175	17,838.94	226.05
		10.00		20.00					
		10.05		20.10					
	2	10.05	10.02	20.00	20.00	3.730	182	18,552.50	235.25
		10.00		20.00					
		10.00		20.00					
	3	10.05	10.05	20.00	20.00	3.563	183	18,654.43	234.98
		10.10		20.00					
		10.00		20.00					
	4	10.08	10.11	19.90	19.97	3.710	180	18,348.62	228.39
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	5	9.90	10.00	20.00	20.00	3.680	175	17,838.94	226.96
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					

ตารางที่ 4-10 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 0% ที่อายุ 14 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.06	10.02	20.00	20.00	3.680	160	16,309.89	206.68
		10.00		20.00					
		10.00		20.00					
	2	10.06	10.03	20.00	20.00	3.600	160	16,309.89	206.40
		10.02		20.00					
		10.00		20.00					
	3	10.00	10.04	19.90	19.97	3.700	155	15,800.20	199.42
		10.10		20.00					
		10.02		20.00					
	4	10.06	10.09	20.00	20.03	3.680	165	16,819.57	210.33
		10.20		20.00					
		10.00		20.10					
	5	10.06	10.04	20.00	20.00	3.730	170	17,329.26	218.87
		10.05		20.00					
		10.00		20.00					
Steam curing	1	10.00	10.00	20.00	20.00	3.680	205	20,897.04	265.87
		9.90		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.08	10.01	20.00	20.00	3.600	207	21,100.92	267.92
		10.15		20.00					
		9.80		20.00					
	3	10.07	10.07	19.90	19.97	3.700	205	20,897.04	262.01
		10.15		20.00					
		10.00		20.00					
	4	10.20	10.08	20.00	20.03	3.680	212	21,610.60	270.42
		10.15		20.00					
		9.90		20.10					
	5	10.20	10.12	20.00	20.00	3.730	218	22,222.22	276.24
		10.10		20.00					
		10.05		20.00					

ตารางที่ 4-11 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 0% ที่อายุ 28 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.00	10.07	20.00	20.03	3.690	198	20,183.49	253.40
		10.10		20.00					
		10.10		20.10					
	2	10.07	10.06	20.00	20.00	3.730	195	19,877.68	250.05
		10.10		20.00					
		10.00		20.00					
	3	10.10	10.12	20.00	20.00	3.363	190	19,367.99	240.76
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.10	10.07	20.00	20.00	3.710	201	20,489.30	257.24
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.00	10.10	19.90	19.97	3.680	190	19,367.99	241.56
		10.10		20.00					
		10.20		20.00					
Steam curing	1	10.00	10.05	20.00	20.00	3.690	257	26,197.76	330.00
		10.05		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.05	10.00	20.00	20.00	3.72	252	25,688.07	326.82
		10.15		20.00					
		9.80		20.00					
	3	10.07	10.01	19.90	19.97	3.689	248	25,280.33	321.20
		10.05		20.00					
		9.90		20.00					
	4	10.20	10.15	20.00	20.03	3.676	260	26,503.57	327.30
		10.15		20.00					
		10.10		20.10					
	5	10.10	10.09	20.00	20.00	3.548	245	24,974.52	312.10
		10.07		20.00					
		10.10		20.00					



รูปที่ 4-1 กราฟเปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตบ่มปกติและบ่มไอน้ำที่ผสมผงจุลินทรีย์ 0%

กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 0% ที่ อายุการบ่ม 28 วัน การบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มปกติมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 252.64 ksc และการบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มไอน้ำมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 323.48 ksc โดยวิธีการบ่มไอน้ำนั้นมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่าการบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มปกติอยู่ที่ 70.84 ksc คิดเป็นร้อยละเท่ากับ 28.04

ตารางที่ 4-12 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 1% ที่อายุ 3 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.00	10.07	20.00	20.00	3.601	65	6,625.89	83.19
		10.10		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.07	10.06	20.00	20.03	3.670	62	6,320.08	79.50
		10.10		20.00					
		10.00		20.10					
	3	10.10	10.12	20.00	20.00	3.593	67	6,829.77	84.90
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.10	10.07	20.00	20.00	3.554	67	6,829.77	85.75
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.00	10.10	20.00	20.03	3.652	68	6,931.70	86.45
		10.10		20.00					
		10.20		20.10					
Steam curing	1	10.00	10.07	20.00	20.00	3.601	84	8,562.69	107.50
		10.10		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.07	10.06	20.00	20.03	3.670	81	8,256.88	103.87
		10.10		20.00					
		10.00		20.10					
	3	10.10	10.12	20.00	20.00	3.593	87	8,868.50	110.24
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.10	10.07	20.00	20.00	3.554	87	8,868.50	111.34
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.00	10.10	20.00	20.03	3.652	88	8,970.44	111.88
		10.10		20.00					
		10.20		20.10					

ตารางที่ 4-13 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 1% ที่อายุ 7 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

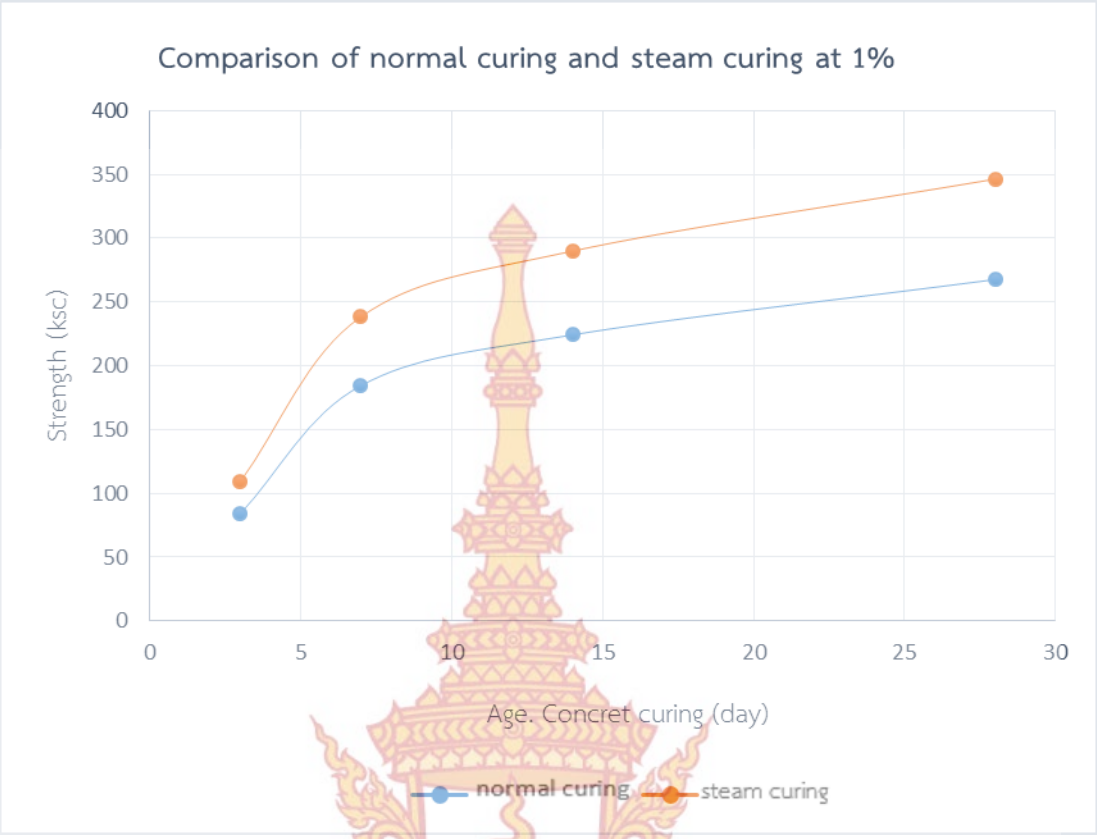
Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.06	10.02	20.00	20.00	3.690	143	14,576.96	184.72
		10.00		20.00					
		10.00		20.00					
	2	10.06	10.03	20.00	20.00	3.730	140	14,271.15	180.60
		10.02		20.00					
		10.00		20.00					
	3	10.00	10.04	20.00	20.03	3.363	145	14,780.84	186.56
		10.10		20.00					
		10.02		20.10					
	4	10.06	10.09	20.00	20.00	3.710	143	14,576.96	182.28
		10.20		20.00					
		10.00		20.00					
	5	10.06	10.04	20.00	20.03	3.680	146	14,882.77	187.97
		10.05		20.00					
		10.00		20.10					
Steam curing	1	10.00	10.05	20.00	20.00	3.690	185	18,858.31	237.55
		10.05		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.05	10.00	20.00	20.00	3.730	182	18,552.50	236.04
		10.15		20.00					
		9.80		20.00					
	3	10.07	10.01	20.00	20.03	3.363	188	19,164.12	243.49
		10.05		20.00					
		9.90		20.10					
	4	10.20	10.15	20.00	20.00	3.710	186	18,960.24	234.15
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.10	10.09	20.00	20.00	3.680	189	19,266.06	240.76
		10.07		20.00					
		10.10		20.00					

ตารางที่ 4-14 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 1% ที่อายุ 14 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.06	10.02	20.00	20.03	3.680	172	17,533.13	222.18
		10.00		20.00					
		10.00		20.10					
	2	10.06	10.05	20.00	20.00	3.600	178	18,144.75	228.56
		10.04		20.00					
		10.05		20.00					
	3	10.06	10.09	20.00	20.00	3.700	170	17,329.26	216.70
		10.05		20.00					
		10.15		20.00					
	4	10.06	10.07	20.00	20.00	3.680	175	17,838.94	223.81
		10.08		20.00					
		10.07		20.00					
	5	10.10	10.05	20.00	20.03	3.730	179	18,246.69	229.84
		10.05		20.00					
		10.00		20.10					
Steam curing	1	10.00	10.03	20.00	20.00	3.680	223	22,731.91	287.29
		10.05		20.00					
		10.05		20.00					
	2	10.05	10.02	20.00	20.03	3.600	231	23,547.40	298.59
		10.10		20.00					
		9.90		20.10					
	3	10.05	10.05	20.00	20.00	3.700	221	22,528.03	283.77
		10.10		20.00					
		10.00		20.00					
	4	10.15	10.09	20.00	20.00	3.680	227	23,139.65	289.17
		10.02		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.00	10.08	20.00	20.00	3.730	228	23,241.59	290.83
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					

ตารางที่ 4-15 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 1% ที่อายุ 28 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.06	10.03	20.00	20.00	3.702	214	21,814.48	276.06
		10.00		20.00					
		10.02		20.00					
	2	10.05	10.10	20.00	20.03	3.680	211	21,508.66	268.26
		10.15		20.00					
		10.10		20.10					
	3	10.05	10.04	20.00	20.00	3.600	204	20,795.11	262.29
		10.08		20.00					
		10.00		20.00					
	4	10.06	10.06	20.00	20.00	3.700	206	20,998.98	264.16
		10.07		20.00					
		10.04		20.00					
	5	10.00	10.06	20.00	20.00	3.680	209	21,304.79	267.65
		10.09		20.00					
		10.10		20.00					
Steam curing	1	10.10	10.07	20.00	20.03	3.680	278	28,338.43	355.78
		10.00		20.00					
		10.10		20.10					
	2	10.05	10.07	20.00	20.00	3.600	274	27,930.68	350.66
		10.15		20.00					
		10.00		20.00					
	3	10.10	10.08	20.00	20.03	3.700	265	27,013.25	338.02
		10.05		20.00					
		10.10		20.10					
	4	10.10	10.07	20.00	20.00	3.680	267	27,217.13	341.70
		10.05		20.00					
		10.05		20.00					
	5	10.12	10.06	20.00	20.00	3.678	270	27,522.94	345.77
		10.07		20.00					
		10.00		20.00					



รูปที่ 4-2 กราฟเปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตบ่มปกติและบ่มไอน้ำที่ผสมผงจุลินทรีย์ 1%

กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 1% ที่ อายุการบ่ม 28 วัน การบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มปกติมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 267.68 ksc และการบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มไอน้ำมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 346.39 ksc โดยวิธีการบ่มไอน้ำนั้นมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่าการบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มปกติอยู่ที่ 78.71 ksc คิดเป็นร้อยละเท่ากับ 29.04

ตารางที่ 4-16 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 2% ที่อายุ 3 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.00	10.07	20.00	20.00	3.601	72	7,339.45	92.14
		10.10		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.07	10.06	20.00	20.03	3.670	73	7,441.39	93.61
		10.10		20.00					
		10.00		20.10					
	3	10.10	10.12	20.00	20.00	3.593	70	7,135.58	88.70
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.10	10.07	20.00	20.00	3.554	71	7,237.51	90.86
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.00	10.10	19.90	19.97	3.652	71	7,237.51	90.27
		10.10		20.00					
		10.20		20.00					
Steam curing	1	10.00	10.07	20.00	20.00	3.601	93	9,480.12	119.02
		10.10		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.07	10.06	20.00	20.03	3.670	95	9,684.00	121.82
		10.10		20.00					
		10.00		20.10					
	3	10.10	10.12	20.00	20.00	3.593	91	9,276.25	115.31
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.10	10.07	20.00	20.00	3.554	92	9,378.19	117.74
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.00	10.10	19.90	19.97	3.652	92	9,378.19	116.96
		10.10		20.00					
		10.20		20.00					

ตารางที่ 4-17 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 2% ที่อายุ 7 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

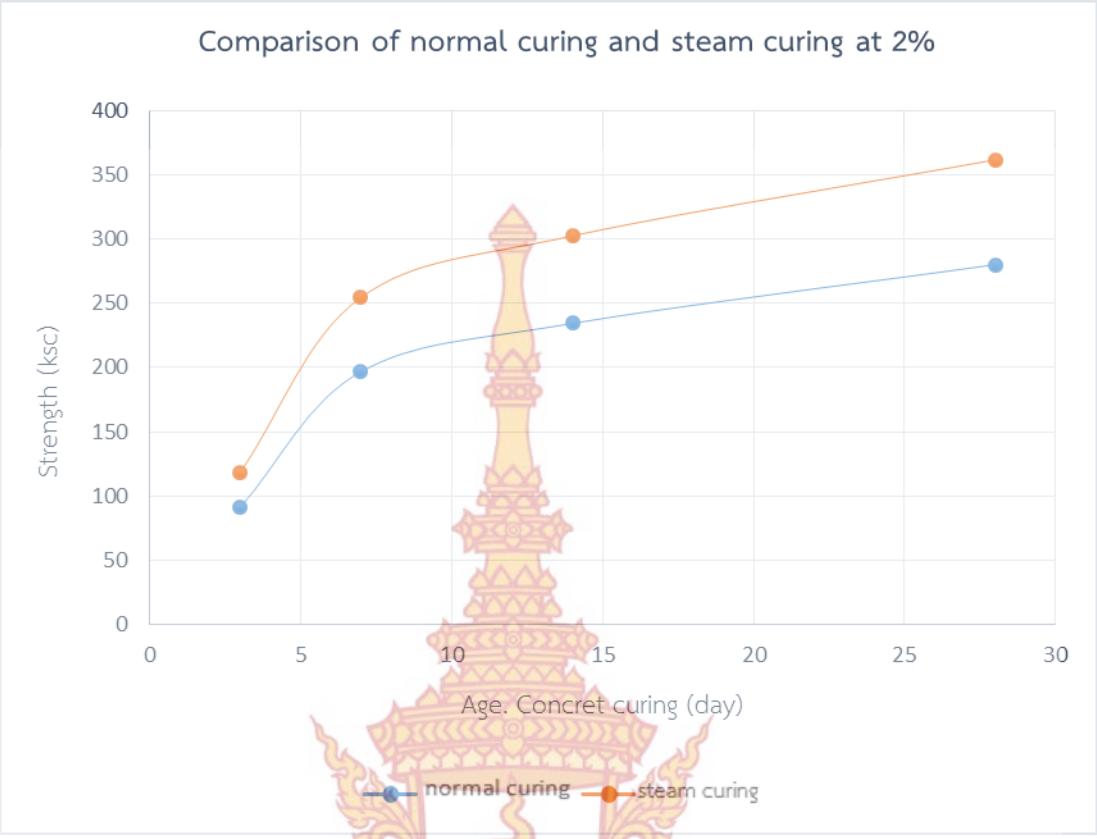
Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.06	10.03	20.00	20.00	3.690	155	15,800.20	199.95
		10.00		20.00					
		10.02		20.00					
	2	10.05	10.10	20.00	20.03	3.730	152	15,494.39	193.25
		10.15		20.00					
		10.10		20.10					
	3	10.05	10.04	20.00	20.00	3.363	152	15,494.39	195.43
		10.08		20.00					
		10.00		20.00					
	4	10.06	10.06	20.00	20.00	3.710	150	15,290.52	192.35
		10.07		20.00					
		10.04		20.00					
	5	10.00	10.06	19.90	19.97	3.680	158	16,106.01	202.34
		10.09		20.00					
		10.10		20.00					
Steam curing	1	10.10	10.07	20.00	20.00	3.690	201	20,489.30	257.24
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.05	10.07	20.00	20.03	3.730	197	20,081.55	252.12
		10.15		20.00					
		10.00		20.10					
	3	10.10	10.08	20.00	20.00	3.363	198	20,183.49	252.56
		10.05		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.10	10.07	20.00	20.00	3.710	195	19,877.68	249.56
		10.05		20.00					
		10.05		20.00					
	5	10.12	10.06	19.90	19.97	3.680	204	20,795.11	261.25
		10.07		20.00					
		10.00		20.00					

ตารางที่ 4-18 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 2% ที่อายุ 14 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.06	10.02	20.00	20.00	3.680	182	18,552.50	235.10
		10.00		20.00					
		10.00		20.00					
	2	10.06	10.03	20.00	20.03	3.600	185	18,858.31	238.65
		10.02		20.00					
		10.00		20.10					
	3	10.00	10.04	20.00	20.00	3.700	178	18,144.75	229.01
		10.10		20.00					
		10.02		20.00					
	4	10.06	10.09	20.00	20.00	3.680	179	18,246.69	228.17
		10.20		20.00					
		10.00		20.00					
	5	10.06	10.04	19.90	19.97	3.730	187	19,062.18	240.75
		10.05		20.00					
		10.00		20.00					
Steam curing	1	10.00	10.05	20.00	20.00	3.680	236	24,057.08	303.03
		10.05		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.05	10.00	20.00	20.03	3.600	240	24,464.83	311.26
		10.15		20.00					
		9.80		20.10					
	3	10.07	10.01	20.00	20.00	3.700	231	23,547.40	299.19
		10.05		20.00					
		9.90		20.00					
	4	10.20	10.15	20.00	20.00	3.680	230	23,445.46	289.54
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.10	10.09	19.90	19.97	3.730	243	24,770.64	309.55
		10.07		20.00					
		10.10		20.00					

ตารางที่ 4-19 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 2% ที่อายุ 28 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.06	10.02	20.00	20.00	3.621	215	21,916.41	277.72
		10.00		20.00					
		10.00		20.00					
	2	10.06	10.05	20.00	20.03	3.601	217	22,120.29	278.64
		10.04		20.00					
		10.05		20.10					
	3	10.06	10.09	20.00	20.00	3.670	215	21,916.41	274.06
		10.05		20.00					
		10.15		20.00					
	4	10.06	10.07	20.00	20.00	3.593	220	22,426.10	281.37
		10.08		20.00					
		10.07		20.00					
	5	10.10	10.05	19.90	19.97	3.554	225	22,935.78	288.91
		10.05		20.00					
		10.00		20.00					
Steam curing	1	10.00	10.08	20.00	20.00	3.652	278	28,338.43	354.61
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.00	10.03	20.00	20.03	3.601	282	28,746.18	363.30
		10.05		20.00					
		10.05		20.10					
	3	10.15	10.09	20.00	20.00	3.670	279	28,440.37	355.41
		10.02		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.05	10.05	20.00	20.00	3.601	285	29,051.99	365.95
		10.10		20.00					
		10.00		20.00					
	5	10.05	10.05	19.90	19.97	3.670	288	29,357.80	369.80
		10.10		20.00					
		10.00		20.00					



รูปที่ 4-3 กราฟเปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตบ่มปกติและบ่มไอน้ำที่ผสมผงจุลินทรีย์ 2%

กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 2% ที่ อายุการบ่ม 28 วัน การบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มปกติมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 280.14 ksc และการบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มไอน้ำมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 361.81 ksc โดยวิธีการบ่มไอน้ำนั้นมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่าการบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มปกติอยู่ที่ 81.67 ksc คิดเป็นร้อยละเท่ากับ 29.15

ตารางที่ 4-20 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 3% ที่อายุ 3 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.00	10.07	20.00	20.00	3.601	72	7,339.45	92.14
		10.10		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.07	10.06	20.00	20.03	3.670	70	7,135.58	89.76
		10.10		20.00					
		10.00		20.10					
	3	10.10	10.12	20.00	20.00	3.593	74	7,543.32	93.77
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.10	10.07	20.00	20.00	3.554	73	7,441.39	93.42
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.00	10.10	20.00	20.03	3.652	72	7,339.45	91.54
		10.10		20.00					
		10.20		20.10					
Steam curing	1	10.00	10.07	20.00	20.00	3.601	93	9,480.12	119.02
		10.10		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.07	10.06	20.00	20.03	3.670	91	9,276.25	116.69
		10.10		20.00					
		10.00		20.10					
	3	10.10	10.12	20.00	20.00	3.593	96	9,785.93	121.65
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.10	10.07	20.00	20.00	3.554	94	9,582.06	120.30
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.00	10.10	20.00	20.03	3.652	93	9,480.12	118.24
		10.10		20.00					
		10.20		20.10					

ตารางที่ 4-21 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 3% ที่อายุ 7 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

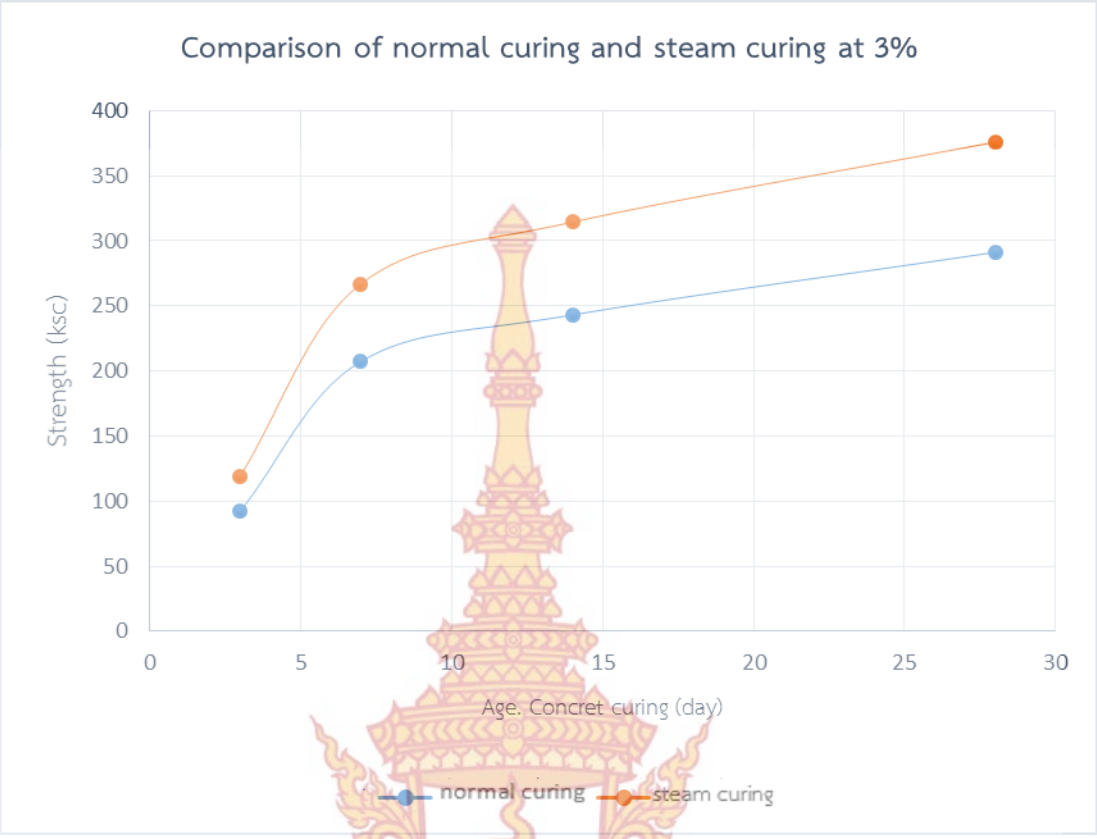
Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.06	10.02	20.00	20.00	3.690	165	16,819.57	213.14
		10.00		20.00					
		10.00		20.00					
	2	10.06	10.03	20.00	20.00	3.730	160	16,309.89	206.40
		10.02		20.00					
		10.00		20.00					
	3	10.00	10.04	20.00	20.03	3.363	159	16,207.95	204.57
		10.10		20.00					
		10.02		20.10					
	4	10.06	10.09	20.00	20.00	3.710	160	16,309.89	203.95
		10.20		20.00					
		10.00		20.00					
	5	10.06	10.04	20.00	20.03	3.680	162	16,513.76	208.57
		10.05		20.00					
		10.00		20.10					
Steam curing	1	10.00	10.08	20.00	20.00	3.690	214	21,814.48	272.97
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.00	10.03	20.00	20.00	3.730	208	21,202.85	267.97
		10.05		20.00					
		10.05		20.00					
	3	10.15	10.09	20.00	20.03	3.363	206	20,998.98	262.42
		10.02		20.00					
		10.10		20.10					
	4	10.05	10.05	20.00	20.00	3.710	205	20,897.04	263.23
		10.10		20.00					
		10.00		20.00					
	5	10.05	10.05	20.00	20.03	3.680	209	21,304.79	268.36
		10.10		20.00					
		10.00		20.10					

ตารางที่ 4-22 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 3% ที่อายุ 14 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.06	10.03	20.00	20.00	3.680	191	19,469.93	246.39
		10.00		20.00					
		10.02		20.00					
	2	10.05	10.10	20.00	20.00	3.600	190	19,367.99	241.56
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	3	10.05	10.04	20.00	20.00	3.700	186	18,960.24	239.15
		10.08		20.00					
		10.00		20.00					
	4	10.06	10.06	20.00	20.03	3.680	193	19,673.80	247.49
		10.07		20.00					
		10.04		20.10					
	5	10.00	10.06	20.00	20.00	3.730	188	19,164.12	240.76
		10.09		20.00					
		10.10		20.00					
Steam curing	1	10.10	10.07	20.00	20.03	3.680	247	25,178.39	316.11
		10.00		20.00					
		10.10		20.10					
	2	10.05	10.07	20.00	20.00	3.600	246	25,076.45	314.83
		10.15		20.00					
		10.00		20.00					
	3	10.10	10.08	20.00	20.00	3.700	242	24,668.71	308.69
		10.05		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.10	10.07	20.00	20.03	3.680	250	25,484.20	319.95
		10.05		20.00					
		10.05		20.10					
	5	10.12	10.06	20.00	20.00	3.730	244	24,872.58	312.47
		10.07		20.00					
		10.00		20.00					

ตารางที่ 4-23 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 3% ที่อายุ 28 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.06	10.02	20.00	20.03	3.680	231	23,547.40	298.39
		10.00		20.00					
		10.00		20.10					
	2	10.06	10.05	20.00	20.00	3.730	226	23,037.72	290.19
		10.04		20.00					
		10.05		20.00					
	3	10.06	10.09	20.00	20.03	3.680	224	22,833.84	285.54
		10.05		20.00					
		10.15		20.10					
	4	10.06	10.07	20.00	20.00	3.600	224	22,833.84	286.48
		10.08		20.00					
		10.07		20.00					
	5	10.10	10.05	20.00	20.00	3.700	230	23,445.46	295.33
		10.05		20.00					
		10.00		20.00					
Steam curing	1	10.05	10.05	20.00	20.03	3.680	299	30,479.10	383.93
		10.10		20.00					
		10.00		20.10					
	2	10.00	10.09	20.00	20.00	3.730	293	29,867.48	373.24
		10.12		20.00					
		10.15		20.00					
	3	10.00	10.05	20.00	20.03	3.680	290	29,561.67	372.37
		10.00		20.00					
		10.15		20.10					
	4	10.05	10.10	20.00	20.00	3.600	291	29,663.61	369.96
		10.10		20.00					
		10.15		20.00					
	5	10.10	10.09	20.00	20.00	3.700	298	30,377.17	379.87
		10.06		20.00					
		10.10		20.00					



รูปที่ 4-4 กราฟเปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตบ่มปกติและบ่มไอน้ำที่ผสมผงจุลินทรีย์ 3%

กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 3% ที่ อายุการบ่ม 28 วัน การบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มปกติมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 291.19 ksc และการบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มไอน้ำมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 375.87 ksc โดยวิธีการบ่มไอน้ำนั้นมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่าการบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มปกติอยู่ที่ 84.68 ksc คิดเป็นร้อยละเท่ากับ 29.08

ตารางที่ 4-24 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 4% ที่อายุ 3 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.00	10.07	19.90	19.97	3.6	74	7,543.32	94.70
		10.10		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.07	10.06	20.00	20.00	3.670	77	7,849.13	98.74
		10.10		20.00					
		10.00		20.00					
	3	10.10	10.12	20.00	20.03	3.59	76	7,747.20	96.30
		10.15		20.00					
		10.10		20.10					
	4	10.10	10.07	20.00	20.00	3.55	75	7,645.26	95.98
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.00	10.10	20.00	20.00	3.65	75	7,645.26	95.35
		10.10		20.00					
		10.20		20.00					
Steam curing	1	10.00	10.07	20.00	20.00	3.6	96	9,785.93	122.86
		10.10		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.07	10.06	20.00	20.03	3.670	100	10,193.68	128.23
		10.10		20.00					
		10.00		20.10					
	3	10.10	10.12	20.00	20.00	3.59	98	9,989.81	124.18
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.10	10.07	20.00	20.00	3.55	96	9,785.93	122.86
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.00	10.10	20.00	20.03	3.65	97	9,887.87	123.32
		10.10		20.00					
		10.20		20.10					

ตารางที่ 4-25 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 4% ที่อายุ 7 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

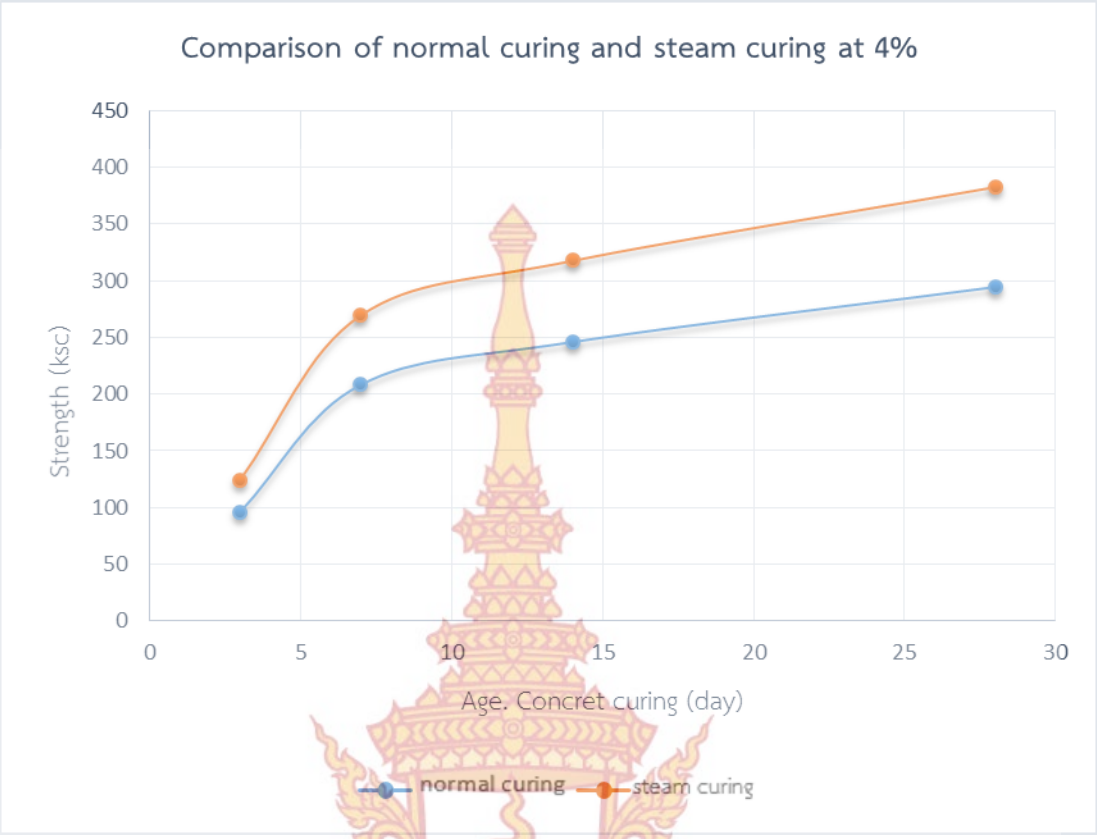
Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.06	10.02	20.00	20.00	3.690	160	16,309.89	206.68
		10.00		20.00					
		10.00		20.00					
	2	10.06	10.05	20.00	20.03	3.730	164	16,717.64	210.58
		10.04		20.00					
		10.05		20.10					
	3	10.06	10.09	20.00	20.00	3.363	162	16,513.76	206.50
		10.05		20.00					
		10.15		20.00					
	4	10.06	10.07	20.00	20.00	3.710	162	16,513.76	207.19
		10.08		20.00					
		10.07		20.00					
	5	10.10	10.05	20.00	20.00	3.680	165	16,819.57	211.87
		10.05		20.00					
		10.00		20.00					
Steam curing	1	10.00	10.05	20.00	20.03	3.690	205	20,897.04	263.23
		10.05		20.00					
		10.10		20.10					
	2	10.05	10.00	20.00	20.00	3.730	213	21,712.54	276.24
		10.15		20.00					
		9.80		20.00					
	3	10.07	10.01	19.90	19.97	3.363	210	21,406.73	271.99
		10.05		20.00					
		9.90		20.00					
	4	10.20	10.15	20.00	20.00	3.710	210	21,406.73	264.36
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.10	10.09	20.00	20.00	3.680	214	21,814.48	272.61
		10.07		20.00					
		10.10		20.00					

ตารางที่ 4-26 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 4% ที่อายุ 14 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.06	10.02	20.00	20.00	3.680	192	19,571.87	248.01
		10.00		20.00					
		10.00		20.00					
	2	10.06	10.03	20.00	20.03	3.600	193	19,673.80	248.97
		10.02		20.00					
		10.00		20.10					
	3	10.00	10.04	20.00	20.00	3.700	191	19,469.93	245.74
		10.10		20.00					
		10.02		20.00					
	4	10.06	10.09	20.00	20.00	3.680	190	19,367.99	242.20
		10.20		20.00					
		10.00		20.00					
	5	10.06	10.04	20.00	20.00	3.730	191	19,469.93	245.90
		10.05		20.00					
		10.00		20.00					
Steam curing	1	10.00	10.08	20.00	20.03	3.680	249	25,382.26	317.61
		10.15		20.00					
		10.10		20.10					
	2	10.00	10.03	20.00	20.00	3.600	246	25,076.45	316.92
		10.05		20.00					
		10.05		20.00					
	3	10.15	10.09	20.00	20.00	3.700	248	25,280.33	315.92
		10.02		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.05	10.05	19.90	19.97	3.680	247	25,178.39	317.16
		10.10		20.00					
		10.00		20.00					
	5	10.05	10.05	20.00	20.00	3.730	250	25,484.20	321.01
		10.10		20.00					
		10.00		20.00					

ตารางที่ 4-27 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 4% ที่อายุ 28 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.06	10.03	20.00	20.00	3.363	230	23,445.46	296.70
		10.00		20.00					
		10.02		20.00					
	2	10.05	10.10	20.00	20.00	3.690	229	23,343.53	291.14
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	3	10.05	10.04	20.00	20.00	3.730	230	23,445.46	295.72
		10.08		20.00					
		10.00		20.00					
	4	10.06	10.06	20.00	20.03	3.363	228	23,241.59	292.37
		10.07		20.00					
		10.04		20.10					
	5	10.00	10.06	20.00	20.00	3.710	232	23,649.34	297.11
		10.09		20.00					
		10.10		20.00					
Steam curing	1	10.01	10.02	20.00	20.00	3.690	300	30,581.04	387.52
		10.00		20.00					
		10.05		20.00					
	2	10.05	10.02	20.00	20.00	3.730	296	30,173.29	382.61
		10.00		20.00					
		10.00		20.00					
	3	10.05	10.05	20.00	20.03	3.363	296	30,173.29	380.07
		10.10		20.00					
		10.00		20.10					
	4	10.08	10.11	20.00	20.00	3.710	296	30,173.29	375.58
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	5	9.90	10.00	19.90	19.97	3.680	299	30,479.10	387.77
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					



รูปที่ 4-5 กราฟเปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตบ่มปกติและบ่มไอน้ำที่ผสมผงจุลินทรีย์ 4%

กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 4% ที่ อายุการบ่ม 28 วัน การบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มปกติมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 294.61 ksc และการบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มไอน้ำมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 382.71 ksc โดยวิธีการบ่มไอน้ำนั้นมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่าการบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มปกติอยู่ที่ 88.10 ksc คิดเป็นร้อยละเท่ากับ 29.90

ตารางที่ 4-28 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 5% ที่อายุ 3 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.00	10.07	20.00	20.00	3.601	79	8,053.01	101.10
		10.10		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.07	10.06	20.00	20.03	3.670	78	7,951.07	100.02
		10.10		20.00					
		10.00		20.10					
	3	10.10	10.12	20.00	20.00	3.593	77	7,849.13	97.57
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.10	10.07	20.00	20.00	3.554	78	7,951.07	99.82
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.00	10.10	19.90	19.97	3.652	76	7,747.20	96.62
		10.10		20.00					
		10.20		20.00					
Steam curing	1	10.00	10.07	20.00	20.00	3.601	102	10,397.55	130.54
		10.10		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.07	10.06	20.00	20.03	3.670	100	10,193.68	128.23
		10.10		20.00					
		10.00		20.10					
	3	10.10	10.12	20.00	20.00	3.593	101	10,295.62	127.98
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.10	10.07	20.00	20.00	3.554	101	10,295.62	129.26
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.00	10.10	19.90	19.97	3.652	99	10,091.74	125.86
		10.10		20.00					
		10.20		20.00					

ตารางที่ 4-29 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 5% ที่อายุ 7 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

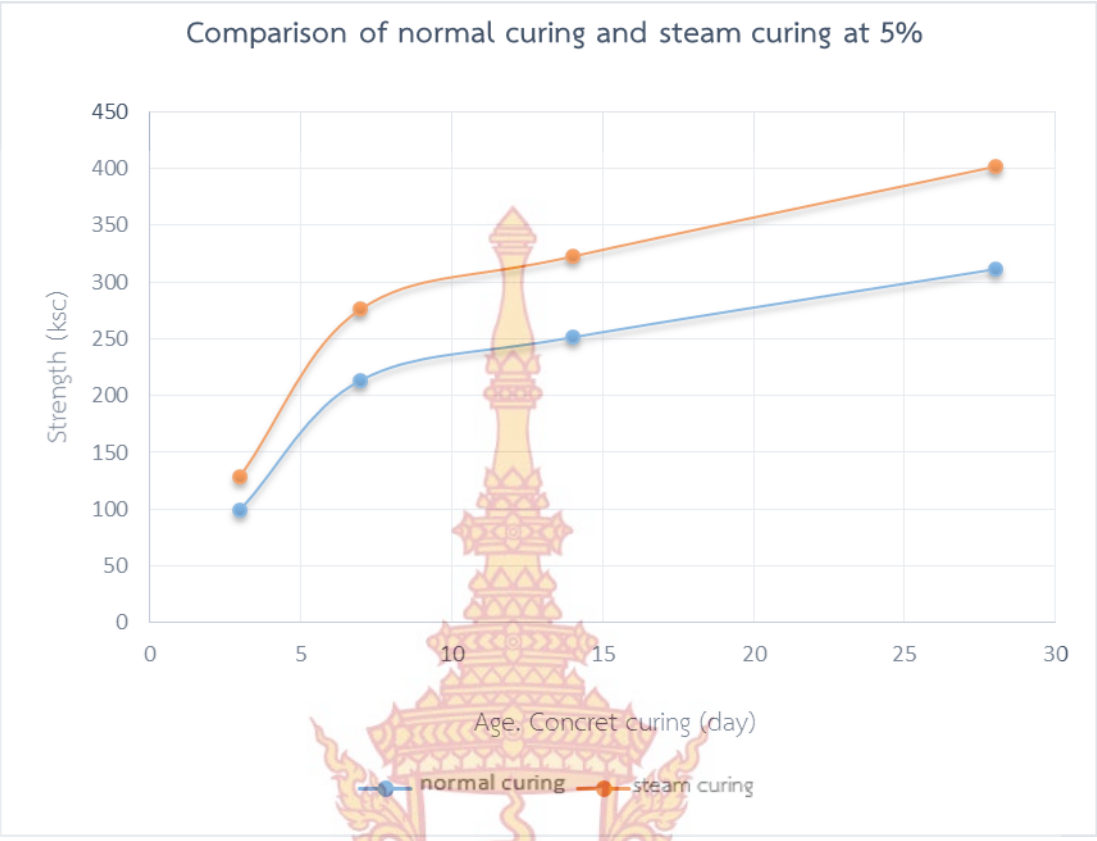
Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.06	10.03	20.00	20.00	3.690	165	16,819.57	212.85
		10.00		20.00					
		10.02		20.00					
	2	10.05	10.10	20.00	20.03	3.730	167	17,023.45	212.32
		10.15		20.00					
		10.10		20.10					
	3	10.05	10.04	20.00	20.00	3.363	166	16,921.51	213.43
		10.08		20.00					
		10.00		20.00					
	4	10.06	10.06	20.00	20.00	3.710	166	16,921.51	212.87
		10.07		20.00					
		10.04		20.00					
	5	10.00	10.06	19.90	19.97	3.680	168	17,125.38	215.15
		10.09		20.00					
		10.10		20.00					
Steam curing	1	10.10	10.09	20.00	20.00	3.690	215	21,916.41	273.88
		10.07		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.00	10.05	20.00	20.03	3.730	216	22,018.35	277.35
		10.05		20.00					
		10.10		20.10					
	3	10.05	10.00	20.00	20.00	3.363	215	21,916.41	278.83
		10.15		20.00					
		9.80		20.00					
	4	10.07	10.01	20.00	20.00	3.710	214	21,814.48	277.17
		10.05		20.00					
		9.90		20.00					
	5	10.20	10.15	19.90	19.97	3.680	218	22,222.22	274.43
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					

ตารางที่ 4-30 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 5% ที่อายุ 14 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.06	10.02	20.00	20.00	3.680	197	20,081.55	254.47
		10.00		20.00					
		10.00		20.00					
	2	10.06	10.03	20.00	20.03	3.600	196	19,979.61	252.84
		10.02		20.00					
		10.00		20.10					
	3	10.00	10.04	20.00	20.00	3.700	194	19,775.74	249.60
		10.10		20.00					
		10.02		20.00					
	4	10.06	10.09	20.00	20.00	3.680	196	19,979.61	249.84
		10.20		20.00					
		10.00		20.00					
	5	10.06	10.04	19.90	19.97	3.730	193	19,673.80	248.48
		10.05		20.00					
		10.00		20.00					
Steam curing	1	10.05	10.05	20.00	20.00	3.680	255	25,993.88	327.43
		10.10		20.00					
		10.00		20.00					
	2	10.00	10.09	20.00	20.03	3.600	255	25,993.88	324.84
		10.12		20.00					
		10.15		20.10					
	3	10.00	10.05	20.00	20.00	3.700	252	25,688.07	323.58
		10.00		20.00					
		10.15		20.00					
	4	10.05	10.10	20.00	20.00	3.680	254	25,891.95	322.92
		10.10		20.00					
		10.15		20.00					
	5	10.20	10.15	19.90	19.97	3.730	250	25,484.20	314.71
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					

ตารางที่ 4-31 ผลกำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 5% ที่อายุ 28 วันโดยวิธีการบ่มปกติและบ่มไอน้ำ

Type	Sample	Diameter (cm)		Height (cm)		Weight	Ultimate Compressive Strength		Strength
		value	Average	value	Average	(kg)	(kN)	(kg)	(ksc)
Normal curing	1	10.00	10.02	20.00	20.00	3.680	244	24,872.58	315.39
		10.00		20.00					
		10.05		20.00					
	2	10.07	10.02	20.00	20.03	3.600	239	24,362.90	308.52
		10.00		20.00					
		10.00		20.10					
	3	10.05	10.03	20.00	20.00	3.700	235	23,955.15	302.75
		10.05		20.00					
		10.00		20.00					
	4	10.10	10.07	20.00	20.00	3.680	245	24,974.52	313.55
		10.00		20.00					
		10.10		20.00					
	5	10.00	10.10	19.90	19.97	3.730	248	25,280.33	315.30
		10.10		20.00					
		10.20		20.00					
Steam curing	1	10.00	10.08	20.00	20.00	3.690	315	32,110.09	401.80
		10.15		20.00					
		10.10		20.00					
	2	10.00	10.03	20.00	20.03	3.730	311	31,702.34	400.66
		10.05		20.00					
		10.05		20.10					
	3	10.15	10.09	20.00	20.00	3.363	305	31,090.72	388.53
		10.02		20.00					
		10.10		20.00					
	4	10.05	10.05	20.00	20.00	3.710	318	32,415.90	408.32
		10.10		20.00					
		10.00		20.00					
	5	10.05	10.05	19.90	19.97	3.680	320	32,619.78	410.89
		10.10		20.00					
		10.00		20.00					

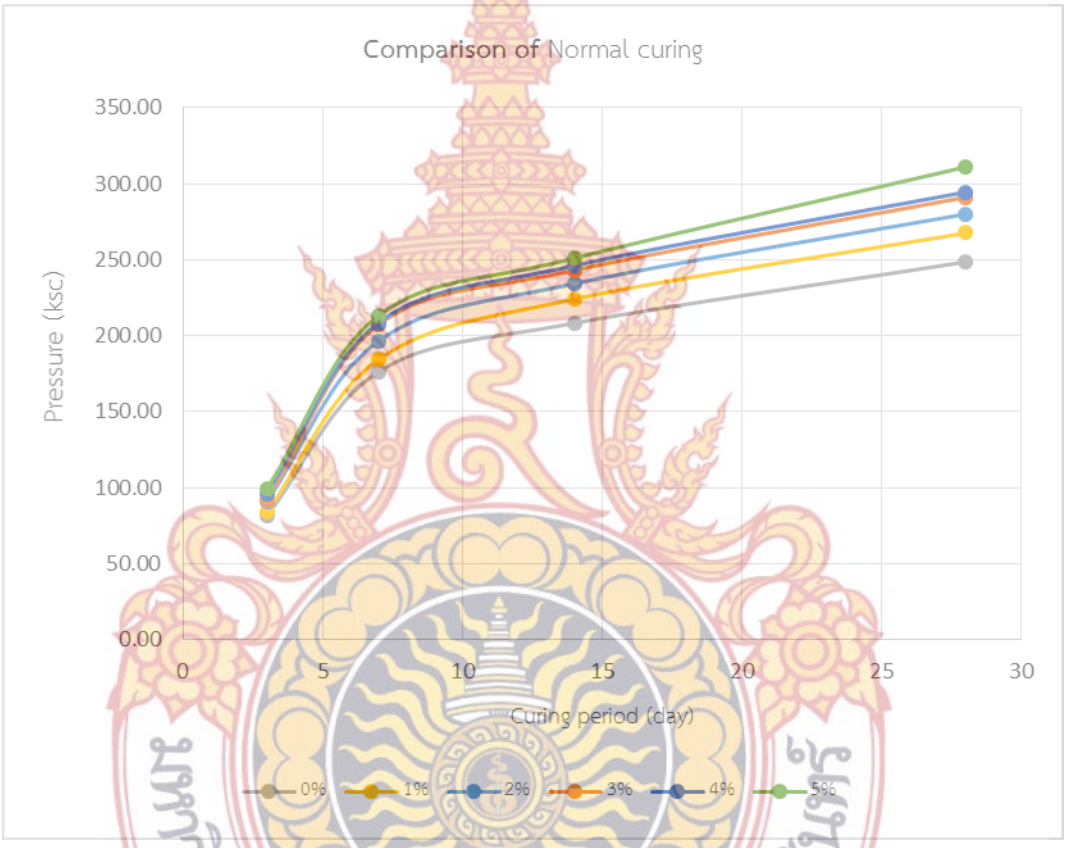


รูปที่ 4-6 กราฟเปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตบ่มปกติและบ่มไอน้ำที่ผสมผงจุลินทรีย์ 5%

กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ 5% ที่ อายุการบ่ม 28 วัน การบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มปกติมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 311.10 ksc และการบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มไอน้ำมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 402.04 ksc โดยวิธีการบ่มไอน้ำนั้นมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่าการบ่มคอนกรีตโดยวิธีการบ่มปกติอยู่ที่ 90.94 ksc คิดเป็นร้อยละเท่ากับ 29.23

ตารางที่ 4-32 ผลกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ในอัตราส่วนต่างๆ โดยวิธีบ่มปกติ

Day / %	0%	1%	2%	3%	4%	5%
3	81.41	83.96	91.12	92.13	96.22	99.03
7	176.40	184.43	196.66	207.33	208.56	213.32
14	208.34	224.22	234.34	243.07	246.16	251.05
28	248.60	267.68	280.14	291.19	294.61	311.10



รูปที่ 4-7 กราฟเปรียบเทียบกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ในอัตราส่วนต่างๆ โดยวิธีบ่มปกติ

เปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์โดยวิธีบ่มปกติอัตราส่วน 0% กับอัตราส่วน 1% 2% 3% 4% และ 5% ที่อายุบ่ม 28 วัน อัตราส่วน 0% ได้ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 248.60 ksc.

ในอัตราส่วน 1% ได้ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 267.68 ksc. มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่า 0% อยู่ที่ 19.08 ksc. คิดเป็นร้อยละ 7.67

ในอัตราส่วน 2% ได้ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 280.14 ksc. มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่า 0% อยู่ที่ 31.54 ksc. คิดเป็นร้อยละ 12.69

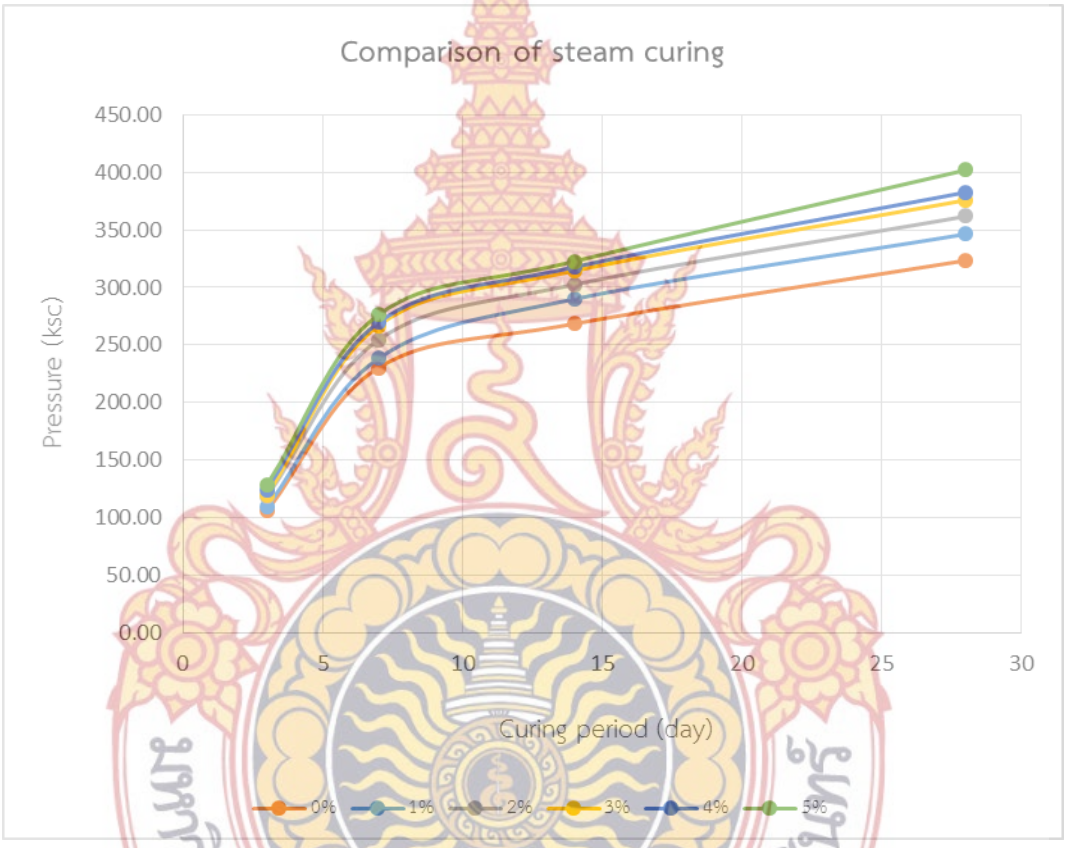
ในอัตราส่วน 3% ได้ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 291.19 ksc. มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่า 0% อยู่ที่ 42.59 ksc. คิดเป็นร้อยละ 17.13

ในอัตราส่วน 4% ได้ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 294.61 ksc. มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่า 0% อยู่ที่ 46.01 ksc. คิดเป็นร้อยละ 18.50

ในอัตราส่วน 5% ได้ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 311.10 ksc. มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่า 0% อยู่ที่ 62.50 ksc. คิดเป็นร้อยละ 25

ตารางที่ 4-33 ผลกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ในอัตราส่วนต่างๆ โดยวิธีบ่มไอน้ำ

Day / %	0%	1%	2%	3%	4%	5%
3	105.65	108.97	118.17	119.18	124.29	128.38
7	230.33	238.40	254.54	266.99	269.68	276.33
14	268.49	289.93	302.51	314.41	317.72	322.70
28	323.48	346.39	361.81	375.87	382.71	402.04



รูปที่ 4-8 กราฟเปรียบเทียบกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ในอัตราส่วนต่างๆ โดยวิธีบ่มไอน้ำ

เปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์โดยวิธีบ่มไอน้ำอัตราส่วน 0% กับอัตราส่วน 1% 2% 3% 4% และ 5% ที่อายุบ่ม 28 วัน อัตราส่วน 0% ได้ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 323.48 ksc.

ในอัตราส่วน 1% ได้ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 346.39 ksc. มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่า 0% อยู่ที่ 22.91 ksc. คิดเป็นร้อยละ 7.08

ในอัตราส่วน 2% ได้ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 361.81 ksc. มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่า 0% อยู่ที่ 38.33 ksc. คิดเป็นร้อยละ 11.85

ในอัตราส่วน 3% ได้ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 375.87 ksc. มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่า 0% อยู่ที่ 52.39 ksc. คิดเป็นร้อยละ 16.19

ในอัตราส่วน 4% ได้ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 352.71 ksc. มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่า 0% อยู่ที่ 59.23 ksc. คิดเป็นร้อยละ 18.31

ในอัตราส่วน 5% ได้ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 402.04 ksc มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่า 0% อยู่ที่ 78.56 ksc. คิดเป็นร้อยละ 24.29

บทที่ 5
สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สรุปกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ โดยวิธีการบ่มปกติ และบ่มไอน้ำ กำลังอัดเฉลี่ยที่ 28 วัน

จากการศึกษากำลังอัดของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 ของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ออกแบบ สามารถเรียงลำดับของกำลังต้านทานกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ได้ดังนี้

5.1.1.1 คอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่ออกแบบมีค่ารับกำลังอัดเฉลี่ยที่ 28 วัน ของการบ่มปกติเท่ากับ 248.60 ksc. และการบ่มไอน้ำเท่ากับ 323.48 ksc. กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของการบ่มปกติคิดเป็นร้อยละ 28.04

5.1.1.2 คอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่ออกแบบมีค่ารับกำลังอัดเฉลี่ยที่ 28 วัน ของการบ่มปกติเท่ากับ 267.68 ksc. และการบ่มไอน้ำเท่ากับ 346.39 ksc. กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของการบ่มปกติคิดเป็นร้อยละ 29.40

5.1.1.3 คอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่ออกแบบมีค่ารับกำลังอัดเฉลี่ยที่ 28 วัน ของการบ่มปกติเท่ากับ 280.14 ksc. และการบ่มไอน้ำเท่ากับ 361.81 ksc. กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของการบ่มปกติคิดเป็นร้อยละ 29.15

5.1.1.4 คอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่ออกแบบมีค่ารับกำลังอัดเฉลี่ยที่ 28 วัน ของการบ่มปกติเท่ากับ 291.19 ksc. และการบ่มไอน้ำเท่ากับ 375.87 ksc. กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของการบ่มปกติคิดเป็นร้อยละ 29.08

5.1.1.5 คอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่ออกแบบมีค่ารับกำลังอัดเฉลี่ยที่ 28 วัน ของการบ่มปกติเท่ากับ 294.61 ksc. และการบ่มไอน้ำเท่ากับ 382.71 ksc. กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของการบ่มปกติคิดเป็นร้อยละ 29.90

5.1.1.6 คอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่ออกแบบมีค่ารับกำลังอัดเฉลี่ยที่ 28 วัน ของการบ่มปกติเท่ากับ 311.10 ksc. และการบ่มไอน้ำเท่ากับ 402.04 ksc. กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของการบ่มปกติคิดเป็นร้อยละ 29.23

5.1.2 สรุปผลการเปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์โดยวิธีบ่มไอน้ำ ในอัตราส่วนต่างๆ ดังนี้

5.1.2.1 ในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงจุลินทรีย์ที่ 0% ได้กำลังอัดเฉลี่ยที่ 28 วัน เท่ากับ 323.48 ksc.

5.1.2.2 ในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงจุลินทรีย์ที่ 1%ได้กำลังอัดเฉลี่ยที่ 28วัน เท่ากับ 346.39 ksc. เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการแทนที่ผงจุลินทรีย์ที่ 0% จะมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่าอยู่ที่ 22.91 ksc. หรือคร้อยละ 7.08

5.1.2.3 ในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงจุลินทรีย์ที่ 2%ได้กำลังอัดเฉลี่ยที่ 28วัน เท่ากับ 361.81 ksc. เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการแทนที่ผงจุลินทรีย์ที่ 0% จะมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่าอยู่ที่ 38.33 ksc. หรือร้อยละ 11.85

5.1.2.4 ในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงจุลินทรีย์ที่ 3%ได้กำลังอัดเฉลี่ยที่ 28วัน เท่ากับ 375.87 ksc. เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการแทนที่ผงจุลินทรีย์ที่ 0% จะมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่าอยู่ที่ 52.39 ksc. หรือร้อยละ 16.19

5.1.2.5 ในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงจุลินทรีย์ที่ 4%ได้กำลังอัดเฉลี่ยที่ 28วัน เท่ากับ 352.71 ksc. เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการแทนที่ผงจุลินทรีย์ที่ 0% จะมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่าอยู่ที่ 59.23 ksc. หรือร้อยละ 18.31

5.1.2.6 ในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงจุลินทรีย์ที่ 5%ได้กำลังอัดเฉลี่ยที่ 28วัน เท่ากับ 402.04 ksc. เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการแทนที่ผงจุลินทรีย์ที่ 0% จะมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่าอยู่ที่ 78.56 ksc. หรือร้อยละ 24.29

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตในการวิจัยครั้งนี้ ได้ใช้เครื่องกดที่เป็นระบบเข็ม จึงอาจทำให้มีการผิดพลาดจากสายตาทำให้การอ่านค่ากำลังต้านทานแรงอัด ของคอนกรีตผิดพลาดบ้างเล็กน้อย ควรใช้เครื่องมือที่มีตัวเลขดิจิตอลในการอ่านค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตมากกว่า จะทำให้ไม่เกิดการผิดพลาดจากการอ่านค่า

5.2.2 ในการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตในการวิจัยครั้งนี้ ควรมีการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น ได้แก่ การศึกษากำลังต้านทานแรงดัด การศึกษากำลังต้านทานแรงดึง เป็นต้น เพื่อนำไป เปรียบเทียบ ทดสอบและมีการพัฒนาขึ้น เพื่อประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจในงานวิจัยในครั้งนี้

5.2.3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตผสมผงจุลินทรีย์ ให้ถึง 90 วัน

บรรณานุกรม

[1] ชัย จาตุพิทักษ์กุล 2547. **ปูนซีเมนต์ปอร์ตโซลาน และ คอนกรีต** สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ท.ค.) สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, พิมพ์ครั้งที่ 1 , ตุลาคม 2547

[2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุสาหกรรม, มอก. 15-2532 : **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.** เล่ม 1 ข้อกำหนดคุณภาพ,พิมพ์เพิ่มเติมครั้งที่ 4 กระทรวงอุสาหกรรม,กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2539

[3] ธีรวัฒน์ สินศิริ ชัย จาตุพิทักษ์กุล และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. **ผลกระทบของเถ้าถ่านหินต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของเพสต์**. เอกสารประกอบการสัมมนาวิชาการเรื่องการนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในงานคอนกรีต ครั้งที่ 2, พ.ศ. 2547, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี

[4] อุดมวิทย์ กาญจนวรงค์, จิรวัฒน์ สถิตย์วัฒน์, สมยศ เพ็ชรประเสริฐ. **คอนกรีตเทคโนโลยีและการทดสอบคอนกรีตแบบทำลายและไม่ทำลาย**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

[5] American Society for Testing and Materials. **ASTM C150-00: Standard Specification for Portland Cement.** Annual Book of ASTM Standard, 2001, Vol. 04.01, Philadelphia, 109-138

[6] Mindess, S. and Young, J.F. **Concrete New Jersey.** Prentice-Hall,1981

[7] American Society for Testing and Materials. **ASTM C171-97: Standard Specification for Materials for Curing Concrete.** Annual Book of ASTM Standard, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 104-105

[8] American Concrete Institute. **ACI 308-92 (Reapproved 1997) Standard Practice for Curing Concrete, ACI Manual of Concrete Practice.** Part 2, Michigan, 2000.

[9] American Society for Testing and Materials. **ASTM C171-97: Standard Specification for Materials for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete.** Annual Book of ASTM Standard, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 188-190

[10] การควบคุมและการบำรุงรักษาหม้อไอน้ำ. **ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์,** มจธ.

[11] Site of Civil Engineer. **การบ่มคอนกรีตเป็นการควบคุมและป้องกัน,** มิให้น้ำในคอนกรีตระเหยออกจากคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเร็วเกินไป

[12] วินิต ช่อวิเชียร. (**คอนกรีตเทคโนโลยี**), การบ่มคอนกรีต หรือการบำรุงรักษาคอนกรีตเป็นการคอยควบคุมดูแลให้น้ำได้เข้ามาทำปฏิกิริยาหลังจากที่ คอนกรีตได้สูญเสียน้ำไปแล้วในช่วงเวลาที่ทำงาน

[13] สภาวิศวกร (Council of Engineer). **การบ่มด้วยการเร่งกำลัง,** เป็นการบ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำโดยให้ความชื้น และความร้อน กับคอนกรีตที่หล่อเสร็จใหม่ๆ

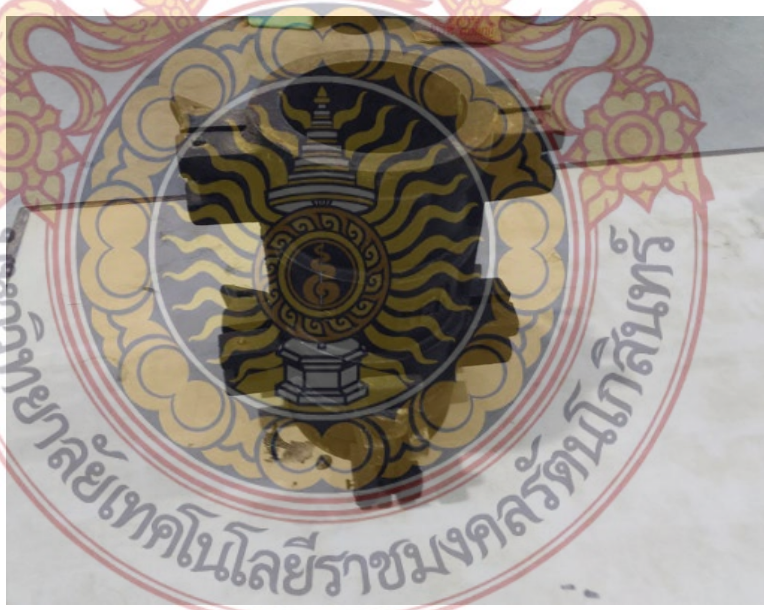
[14] รศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ. **ซีเมนต์ (Cement),** โดยทั่วไปหมายถึงวัสดุประสานซึ่งสามารถยึดวัตถุชิ้นเล็กๆ เข้าด้วยกันคำว่าซีเมนต์นี้ยังกินความถึงสารซีเมนต์หลายประเภท

[15] *ASTM.C.150* Standard Specification for Portland Cement

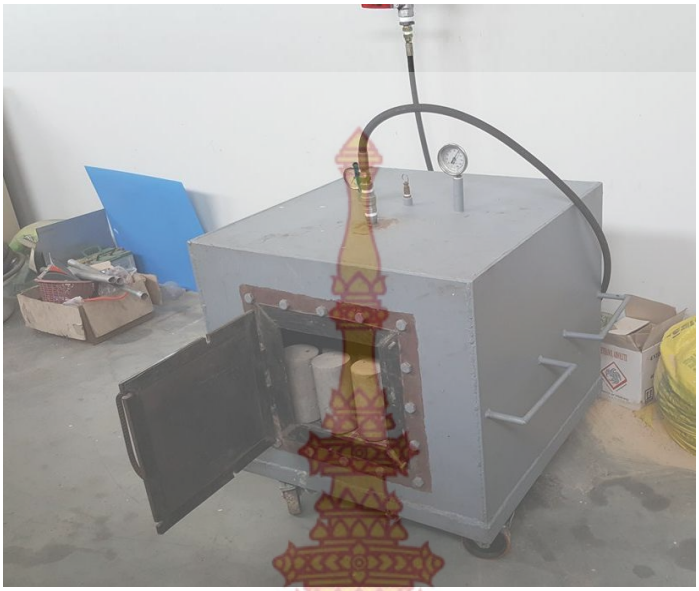
ภาคผนวก

ขั้นตอนการปฏิบัติ

ภาพที่ ก-1 เครื่องชั่งน้ำหนัก



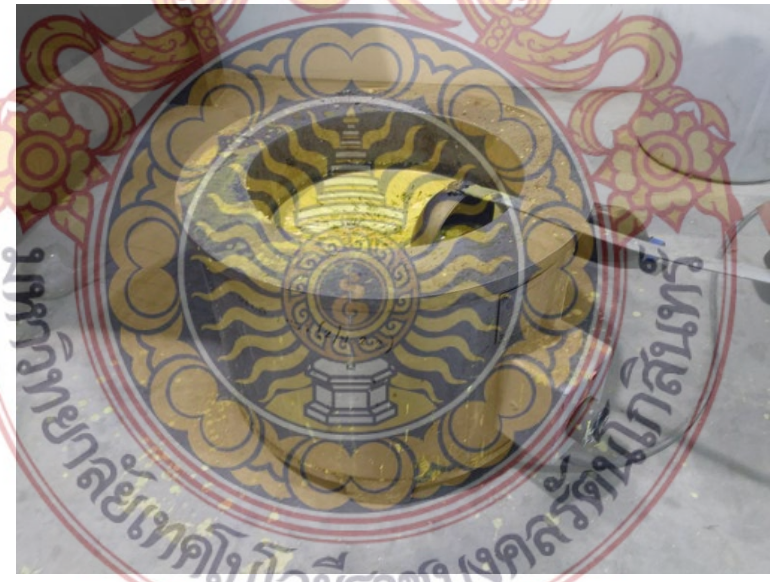
ภาพที่ ก-2 แบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม



ภาพที่ ก-3 เครื่องบ่มคอนกรีต

ภาพที่ ก-4 เครื่องอบไล่ความชื้น

ภาพที่ ก-5 เครื่องมือผสมคอนกรีต



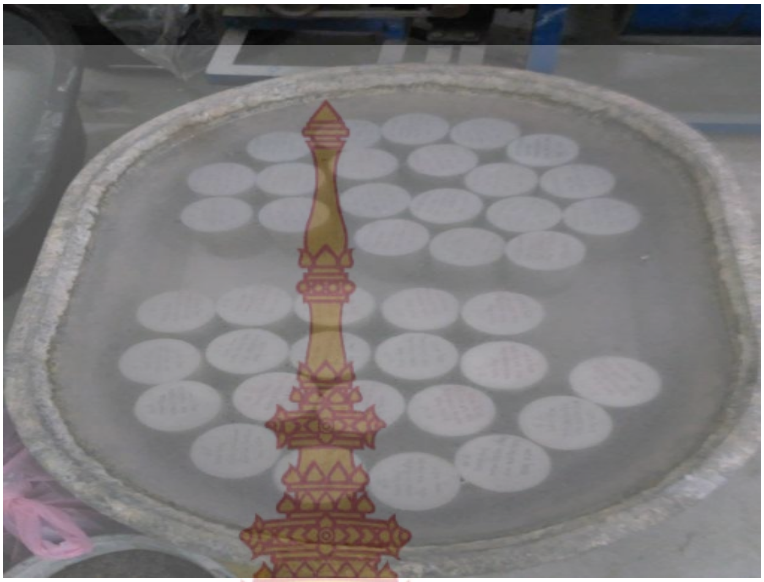
ภาพที่ ก-6 หม้อต้มกำมะถัน

ภาพที่ ก-7 เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength test)

ภาพที่ ก-8 ผสมคอนกรีต

ภาพที่ ก-9 นำคอนกรีตใส่ในโมล

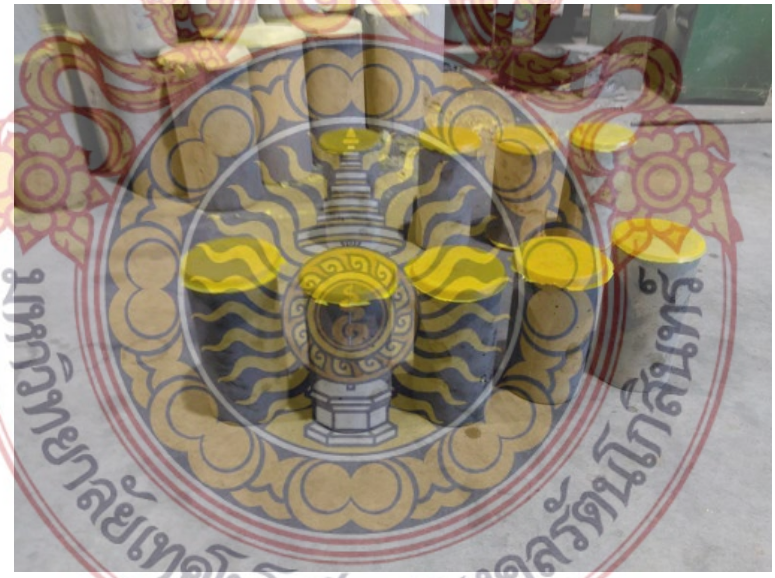
ภาพที่ ก-10 ตัวอย่างการทดสอบก่อนการนำไปบ่ม



ภาพที่ ก-11 การบ่มตัวอย่างทดสอบ

ภาพที่ ก-12 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบ

ภาพที่ ก-13 วัดขนาดตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ ก-14 เคลือบผิวหน้าตัวอย่างทดสอบด้วยกำมะถัน

ภาพที่ ก-15 นำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อสกุล นายพีระพงษ์ เพ็ชรพัน

2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ กระทรวงศึกษาธิการ เลขที่ 96 หมู่ 3 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170 โทรศัพท์ 0 2889 4585-7 โทรสาร 0 2889 4585-7 ต่อ 2651 โทรศัพท์มือถือ 081-544-9760 E-mail : aui_08@live.com

4. ประวัติการศึกษา

ปวส. (ช่างก่อสร้าง)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตศาลายา
ปริญญาตรี วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ปริญญาโท วศ.ม. (วิศวกรรมโยธาและการบริหารการก่อสร้าง)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

- สาขาวิศวกรรมโยธา
- สาขาวิศวกรรมและการบริหารงานก่อสร้าง
- สาขาด้านคอนกรีตเทคโนโลยี

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

1. พีระพงษ์ เพ็ชรพัน; **การศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าภายในโครงการก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น เขตภาคตะวันตก.** งานประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19 วันที่ 14-16 พฤษภาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

2. พีระพงษ์ เพ็ชรพัน, สุทธิชัย ตันเจริญ; **การศึกษาการพัฒนากาลังอัดของคอนกรีตโดยวิธีการบ่มแรงดันไอน้ำต่ำที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับการบ่มแบบปกติ.** งานประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ ๑๐ วันที่ ๒๐-๒๒ ตุลาคม ๒๕๕๗ ณ โรงแรม ดุสิต ไอแลนด์ รีสอร์ท จังหวัดเชียงราย

3. พีระพงษ์ เพ็ชรพัน, ณัฐกาญจน์ ศรีนิลทิน; **การผลิตกระดาษจากเยื่อทะลายเปล่าปาล์มเพื่อนำไปสู่อุตสาหกรรมการผลิตในครัวเรือน.** งานประชุมวิชาการครั้งที่ ๓ ความหลากหลายทางชีวภาพ วัฒนธรรมและภูมิปัญญาท้องถิ่น : บูรณาการความรู้สู่การพัฒนาที่ยั่งยืน ระหว่างวันที่ ๘-๙ ธันวาคม ๒๕๕๗ ณ ศูนย์ศิลปวัฒนธรรมกาญจนา จังหวัดอุบลราชธานี