



## รายงานการวิจัย

อิทธิพลของเปลือกหอยนางรมบดที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังอัด  
และการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์

**Influence of Ground Oyster Shell on Compressive Strength  
and Autogenous Shrinkage of Cement Pastes**

ทวิช กล้าแท้

Tawich Klathae

นภดล ศรีภักดี

Napadon Sornpakdee

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2559

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนเงินงบประมาณ โครงการวิจัย ประเภทเงินงบประมาณ  
แผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๕ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และ  
ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการในการทดลองวิจัย

ทวิช กล้าแท้

นภดล ศรีภักดี



## อิทธิพลของเปลือกหอยนางรมบดที่มีผลกระทบบต่อค่ากำลังอัด และการหดตัวแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์

ทวิช กล้าแท้<sup>1</sup> และนภดล ศรีภักดี<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของผงเปลือกหอยนางรมบดที่มีผลกระทบบต่อค่ากำลังอัดและการหดตัวแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.30, 0.35 และ 0.40 โดยในการทดสอบได้เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุ 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน รวมถึงการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีเนียสเป็นเวลา 13 สัปดาห์ ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม (C100) และมีการลดลงของค่ากำลังอัดเมื่อทำการเพิ่มขึ้นของผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ตามลำดับ ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ส่วนการหดตัวแบบอโตจีเนียส พบว่าซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนร้อยละการแทนที่ 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

คำสำคัญ :เปลือกหอยนางรมบด, เปลือกหอยชนิดต่างๆ, กำลังอัด, โครงสร้างขนาดเล็ก, ซีเมนต์เพสต์ผสม

## **Influence of Ground Oyster Shell on Compressive Strength and Autogenous Shrinkage of Cement Pastes**

**Tawich Klathae<sup>1</sup> and Napadon Sornpakdee<sup>1</sup>**

### **Abstract**

This research aims to study the properties of crushed oyster shell powder (OSP) on compressive strength and autogenous shrinkage of cement paste. The cement was replaced with OSP at 0%, 10%, 20%, 30% and 40% by the weight of the binder has its proportion of water to binder ratio (W/B) controlled at 0.30, 0.35 and 0.40. In the experiment, the compressive strength of the cement paste at the curing age 7, 14, 28, 56 and 90 days were compared. This includes trial on autogenous shrinkage for 13 weeks. The result shows that for the compressive strength of the cement paste, which replaced the cement with OSP at the proportion of 10%, 20%, 30% and 40%, by the weight of the binder having lower compressive strength than the controlled cement paste (C100). There is a decrease in compressive strengths upon increased addition of OSP respectively for every proportion of water to binder ratio (W/B). For autogenous shrinkage, it appears that the cement paste, whose cement component was replaced by OSP, will have an increased value when for the increase in replacement proportion at 10%, 20%, 30% and 40% respectively, for every proportion of water to binder ratio (W/B).

keywords: Ground Oyster Shell, Seashell Wastes, Compressive Strength, Microstructure, Blended Cement Paste

---

<sup>1</sup>College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya.

## สารบัญ

## หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญภาพ .....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่สำคัญ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ปริมาณผลผลิตหอยสองฝา.....	4
2.2 การศึกษาลักษณะทั่วไปของเปลือกหอย .....	5
2.3 ชนิดของเปลือกหอยสองฝาที่ศึกษา.....	5
2.4 หอยนางรม .....	7
2.5 การเพาะเลี้ยงหอยนางรมในจังหวัดสุราษฎร์ธานี .....	11
2.6 ปูนซีเมนต์ .....	14
2.7 สารประกอบรองของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ให้ผลกระทบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์	15
2.8 การก่อตัวและปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์ .....	16
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	32

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

## บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย .....	35
3.3 กำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย .....	40
3.4 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ .....	41

## บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุ.....	43
4.2 องค์ประกอบทางเคมี.....	44
4.3 การศึกษาลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาค.....	45
4.4 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบความเป็นผลึก .....	46
4.5 ระยะเวลาการก่อตัว.....	47
4.6 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	50
4.7 อิทธิพลของผงเปลือกหอยนางรมบด Grushed Oyster shell Powder (OSP) ที่มีผลต่อ ค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์.....	51
4.8 อิทธิพลของผงเปลือกหอยนางรมบด Grushed Oyster shell Powder (OSP) ที่มีผลต่อ ค่าการหดตัวแบบอโตจีเนียส ของซีเมนต์เพสต์.....	57

## บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย .....	60
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	61

บรรณานุกรม..... 62

ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56 และ

90 วัน โดยทำการทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30..... 66



สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน โดยทำการทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35.....	72
ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน โดยทำการทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40.....	78
ภาคผนวก ง. ผลการทดสอบค่าการหดตัวแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่ม 1-90 วัน โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30 .....	84
ภาคผนวก จ. ผลการทดสอบค่าการหดตัวแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่ม 1-90 วัน โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35 .....	90
ภาคผนวก ฉ. ผลการทดสอบค่าการหดตัวแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่ม 1-90 วัน โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40.....	96
ภาคผนวก ช. ภาพขั้นตอนการทำวิจัย.....	102



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ปริมาณผลผลิตหอยน้ำเค็มทั้งหมด จำแนกเป็นรายชนิด ปี พุทธศักราช 2552-255 .....	64
2-2 แสดงอำเภอที่มีการเลี้ยงหอยในจังหวัดสุราษฎร์ธานี .....	12
2-3 อุณหภูมิที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารต่างๆ ในซีเมนต์เพสต์.....	21
3-1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	40
3-2 แสดงอัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ผสมผงเปลือกหอยนางรมแทนที่ปูนซีเมนต์ .....	40
3-3 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้ในการทดสอบ.....	41
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงเปลือกหอย นางรม (OSP).....	43
4-2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงเปลือกหอยนางรมบด..	44
4-3 แสดงอัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ผสมผงเปลือกหอยนางรมแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 .....	47
4-4 อัตราส่วนผสมและจำนวนของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้ในการทดสอบ .....	50
4-5 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย ผงเปลือกหอยนางรม กับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30 .....	52
4-6 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย ผงเปลือกหอยนางรม กับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35 .....	54
4-7 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย ผงเปลือกหอยนางรม กับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40 .....	56
4-8 แสดงการเปรียบเทียบค่าการหดตัวแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรม (OSP) กับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุ ประสานเพียงอย่างเดียว ( C100 ).....	59







สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ-4 ผลการทดสอบการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 30 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35.....	94
จ-5 ผลการทดสอบการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 40 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35.....	95
ฉ-1 ผลการทดสอบการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (C100) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40 .....	97
ฉ-2 ผลการทดสอบการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 10 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40.....	98
ฉ-3 ผลการทดสอบการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 20 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40.....	99
ฉ-4 ผลการทดสอบการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 30 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40.....	100
ฉ-5 ผลการทดสอบการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 40 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40.....	101



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 ลักษณะทางกายภาพของหอยนางรม.....	9
2-2 พื้นที่การเพาะเลี้ยงหอยนางรมในจังหวัดสุราษฎร์ธานี.....	12
2-3 เนื้อที่เพาะเลี้ยงหอยนางรมของจังหวัดสุราษฎร์ธานี .....	13
2-4 แผนภูมิการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ .....	18
2-5 ผลกระทบของ w/c ต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์.....	19
2-6 แบบจำลองโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์.....	22
2-7 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์.....	23
2-8 โครงสร้างโพรง.....	24
2-9 ขนาดโพรง .....	24
2-10 ปริมาตรของส่วนประกอบซีเมนต์เพสต์.....	24
2-11 ขนาดของช่องแฉ่งและโพรงในซีเมนต์เพสต์ .....	25
3-1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 .....	33
3-2 ผงเปลือกหอยนางรมบด.....	34
3-3 ขวดทดลองมารฐานเลอชาเตอลิแอร์ (Le Chatelier Flask) .....	35
3-4 แสดงเครื่องผสมซีเมนต์เพสต์ .....	36
3-5 แสดงเครื่องทดสอบระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลาย.....	37
3-6 แสดงแบบหล่อขึ้นซีเมนต์เพสต์ ขนาด 50x50x50 มม.....	38
3-7 แสดงการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์.....	38
3-8 แสดงแบบหล่อขึ้นซีเมนต์เพสต์ ขนาด 25x25x28.5 มม.....	39
3-9 เครื่องทดสอบค่าการยึด-หดตัว.....	39
3-10 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	42
4-1 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุ .....	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-2 แสดงผลการวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอกซเรย์ .....	46
4-3 แสดงระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย ของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) ซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอย นางรมบด (OSP) โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30 .....	48
4-4 แสดงระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย ของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) ซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอย นางรมบด (OSP) โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35 .....	48
4-5 แสดงระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย ของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) ซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอย นางรมบด (OSP) โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40 .....	49
4-6 แสดงกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ผสมเปลือกหอยนางรมบด (OSP) เปรียบเทียบที่ปริมาณ ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ของวัสดุผง โดย $w/b = 0.30$ .....	51
4-7 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน โดยควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30 .....	51
4-8 แสดงกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ผสมผงเปลือกหอยนางรมบดเปรียบเทียบที่ปริมาณ ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ของวัสดุผง โดย $w/b = 0.35$ .....	53
4-9 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน โดยควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35 .....	53
4-10 แสดงกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ผสมผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) เปรียบเทียบที่ปริมาณ ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ของวัสดุผง โดย $w/b = 0.40$ .....	55
4-11 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน โดยควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40 .....	55



## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-12 แสดงค่าการหดตัวแบบอโตจิเนียของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย ผงเปลือกหอยนางรม เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน เพียงอย่างเดียว โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30 .....	57
4-13 แสดงค่าการหดตัวแบบอโตจิเนียของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย ผงเปลือกหอยนางรมบด เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน เพียงอย่าง เดียว โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35 .....	58
4-14 แสดงค่าการหดตัวแบบอโตจิเนียของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย ผงเปลือกหอยนางรมบด เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน เพียงอย่างเดียว โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40 .....	58





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและความเป็นมา

กระบวนการผลิตปูนเม็ด (Clinker) สำหรับปูนซีเมนต์ในเตาเผาแบบหมุน จะใช้อุณหภูมิประมาณ 1450 °C เป็นเวลา 30-60 นาที (บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรมจำกัด, 2548; ชัชวาล, 2542) เป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูงและใช้เวลานาน ในการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน จะเกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ประมาณ 1 ตัน (Fairbairn E.M.R., 2010) ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก ทำให้อุณหภูมิโดยรวมของโลกเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตทั่วโลก เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ โดยได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการใส่ส่วนผสมทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อเป็นการประหยัดปูนซีเมนต์และเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตในด้านคุณสมบัติต่างๆ ส่วนผสมทดแทนโดยส่วนใหญ่เป็นสิ่งเหลือใช้หรือเป็นขยะจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นสิ่งเหลือใช้กลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีคุณค่า

ในปีพุทธศักราช 2556 ปริมาณขยะมูลฝอยที่เก็บได้ในกรุงเทพมหานคร ประมาณ 3.6 ล้านตัน ทั้งขยะที่มีองค์ประกอบทางกายภาพที่มีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ และขยะที่ย่อยสลายได้ซึ่งเหมาะสมแก่การทำปุ๋ย ในส่วนของปริมาณขยะจากกระดุกและเปลือกหอยมีปริมาณร้อยละ 1.6 ของปริมาณขยะทั้งหมด คิดเป็นปริมาณขยะจากกระดุกและเปลือกหอยประมาณ 57,600 ตัน (ศูนย์ข้อมูลกรุงเทพมหานคร, 2557) เนื่องจากขยะประเภทนี้ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยการเผาไหม้ จึงทำการกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบเท่านั้น ดังนั้นจึงควรหาวิธีในการนำเปลือกหอยกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ จึงดีกว่าวิธีฝังกลบเพียงอย่างเดียว อีกทั้งปัจจุบันการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำตามชายฝั่งทะเลขยายตัวอย่างมากในภาคใต้ ทำให้มีอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเลและชุมชนรอบข้างขยายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งจากการแปรรูปหอยนางรม สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จำกัด ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา (รัตนกร ขวงสวัสดิ์, 2011)

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอผลการศึกษาของซีเมนต์เพสต์ผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียด เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์โดยมุ่งเน้นในการศึกษาและวิเคราะห์ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลเชื่อมโยงกับการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของเปลือกหอยนางรมบดละเอียด ซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติ

และไม่ต้องผ่านกระบวนการเผา โดยนำผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา จึงไม่เพียงลดต้นทุนของราคาวัสดุเท่านั้น แต่ยังสามารถช่วยลดขยะในชุมชน และลดการใช้พลังงานในการผลิตลงได้อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอยนางรมบด

1.2.2 เพื่อศึกษาความเหมาะสมในด้านปริมาณและความเป็นไปได้การใช้เปลือกหอยนางรมบดในการทดแทนปูนซีเมนต์

1.2.3 เพื่อศึกษาผลเชิงจุลภาคของซีเมนต์เพสต์โดยการแทนที่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเปลือกหอยนางรมบดเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม

1.2.4 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์เพสต์ผสมเปลือกหอยนางรมบด ในการทดแทนปูนซีเมนต์เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม

1.2.5 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลของซีเมนต์เพสต์โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเปลือกหอยนางรมบดเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตดังต่อไปนี้

1.3.1 แหล่งที่มาของวัตถุดิบ จำแนกได้ดังนี้

1.3.1.1 ผงเปลือกหอยนางรม ผงเปลือกหอยนางรมบดที่ใช้ในงานวิจัย มีสิบรอนซ์เทาเหมือนปูนซีเมนต์ ผลิตโดย บริษัท สยามเวิร์ม ออแกนิก วิสาหกิจ เพื่อสังคม จำกัด

1.3.1.2 วัสดุประสานที่ใช้ กำหนดใช้ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภทที่ 1

1.3.2. การทดสอบคุณสมบัติของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดและปูนซีเมนต์ การทดสอบสมบัติต่างๆ เป็นไปตามวัตถุประสงค์ ในข้อ 1.2 ประกอบด้วย

1.3.2.1 ทดสอบเชิงจุลภาค

- การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRF (X-Ray Fluorescence )

- การวิเคราะห์หาองค์ประกอบความเป็นผลึกด้วยเครื่อง XRD (X-ray

Diffractionmeter) ของวัสดุ

- การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM (Scanning Electron Microscope) ของวัสดุ

#### 1.3.2.2 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

- ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)
- Laser, Particle Size Analyzer
- ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)
- การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition )

#### 1.3.2.3 ทดสอบสมบัติทางกล

- การหดตัวแบบออโตจีเนียส (Autogenous Shrinkage)
- กำลังอัด (Compressive Strength)

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

#### 1.4.1 ด้านวิชาการ

- 14.1.1 องค์ความรู้ใหม่ในด้านการศึกษาถึงสมบัติของของเปลือกหอยนางรมบด ในการนำมาใช้ในงานคอนกรีต
- 14.1.2 กรอบการนำเปลือกหอยนางรมบดไปใช้งานตามหลักวิศวกรรม

#### 1.4.2 ด้านเศรษฐกิจ

- 14.2.1 เป็นแนวทางในการสร้างวัสดุทดแทนเพื่อการนำไปใช้งานที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับวัสดุเดิมและเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มแก่วัตถุดิบที่มีมูลค่าต่ำและมีอยู่ในปริมาณสำรองจำนวนมากในปัจจุบัน
- 14.2.2 ได้แนวทางสร้างงานและอาชีพและลดต้นทุนการผลิตวัสดุผสมลง

#### 1.4.3 ด้านสังคม

- 14.3.1 ส่งเสริมการประหยัดพลังงานในรูปแบบการใช้ของเปลือกหอยนางรมบดทดแทนปูนซีเมนต์ ซึ่งจะส่งผลให้ลดพลังงานในการเผาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง
- 14.3.2 เป็นแนวทางการใช้วัสดุทดแทนเพื่อการอนุรักษ์สภาพแวดล้อม และธรรมชาติลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าสู่บรรยากาศให้น้อยลง
- 4.3.3 เป็นการสร้างจิตสำนึกในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์สูงสุด

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่สำคัญและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปริมาณผลผลิตหอยสองฝาและลักษณะทั่วไปของเปลือกหอย

##### 2.1.1 ปริมาณผลผลิตหอยสองฝา

หอยสองฝา (Bivalves) เป็นสัตว์เศรษฐกิจที่มีการเพาะเลี้ยงจำนวนมากมายทั่วโลก มีมูลค่าการค้าปีหนึ่ง ๆ กว่าพันล้านดอลลาร์สหรัฐฯ ซึ่งเกือบร้อยละ 80 ของผลผลิตหอยสองฝาของโลกมาจากการเพาะเลี้ยง โดยผลผลิตหอยสองฝาทั้งหมดแต่ละปีมีประมาณ 11 ล้านตัน สายพันธุ์ของหอยสองฝาที่นิยมเพาะเลี้ยงกันมากที่สุดในโลก ได้แก่ หอยนางรม ปริมาณผลผลิตหอยนางรมคิดเป็นร้อยละ 35 ของหอยสองฝาทั้งหมด ส่วนสายพันธุ์ที่นิยมมากรองลงมา คือ กระจุกหอยลายหอยแครง และหอยกาบ คิดเป็นร้อยละ 33 ของผลผลิตหอยสองฝาทั้งหมด ส่วนอันดับที่สาม ได้แก่ หอยแมลงภู่ มีสัดส่วนร้อยละ 16 (รพีพร สุทาธรรม, 2544)

ตารางที่ 2-1 ปริมาณผลผลิตหอยน้ำเค็มทั้งหมด จำแนกเป็นรายชนิด ปี พุทธศักราช 2552-2556

ปริมาณ : 1,000 ตัน

ปีพุทธศักราช (ชนิดหอย)	2552	2553	2554	2555	2556
หอยแครง (Blood Cockle)	83.4	42.4	53.1	68.5	72.9
หอยแมลงภู่ (Green mussel)	193.6	123.9	125.6	103.2	127.9
หอยนางรม (Oyster)	26.2	10.8	8.4	16.1	17.6
หอยลาย (Short necked clam)	17.8	20.8	12.6	8.7	12.4
หอยอื่นๆ (Other shellfishes)	3.2	3.4	3.9	3.2	5.8
รวมหอย	324.6	201.3	203.6	199.4	236.6

ที่มา:กรมประมง, 2557.

สำหรับสถิติผลผลิตสัตว์น้ำประเภทหอยทะเลของไทย ดังตารางที่ 2-1 ในการสำรวจเฉพาะกลุ่มหอยเศรษฐกิจ ไม่รวมปลาหมึก เป็นปริมาณผลผลิตจากฟาร์มเลี้ยงหอยในแนวพื้นที่ชายฝั่งทะเลของ ไทย ได้แก่ หอยนางรม หอยแครง หอยแมลงภู่ หอยกะพง หอยมุก ผลผลิตหอยแมลงภู่จากปึกโป๊ะ และชนิดที่เก็บรวบรวมจากธรรมชาติ ได้แก่ หอยลาย หอยเชลล์ เป็นต้นและจากข้อมูลดังกล่าว

พบว่าชนิดของหอยที่เป็นผลผลิตของประเทศไทยมี 4 ชนิด ที่เป็นที่นิยมเลี้ยงหรือจับกันมากที่สุด ได้แก่ หอยนางรม หอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยลาย

## 2.2 การศึกษาลักษณะทั่วไปของเปลือกหอย

หอยเป็นสัตว์ที่อยู่ในไฟลัมมอลลัสกา ซึ่งเป็นตระกูลของสัตว์ที่มีจำนวนมากเป็นอันดับสอง รองจากแมลง ปกติแล้วสัตว์ในไฟลัมมอลลัสกา นี้ ประกอบด้วยหอย ปลาหมึก และลึนทะเล เป็นต้น สัตว์ที่อยู่ในไฟลัมนี้มีประมาณ 100,000 ชนิด โดยหอยที่มีสองฝาจะมีลำตัวอ่อนนุ่มและเป็นเมือกลื่น เนื่องจากมีลำตัวอ่อนนุ่มจึงจำเป็นต้องมีเปลือกแข็งห่อหุ้มลำตัวไว้อีกชั้นหนึ่ง ดังนั้นหอยโดยทั่วไป จึงมีเปลือกแข็งหุ้ม โดยเปลือกหอยจะประกอบด้วยชั้นของเปลือก 3 ชั้นดังนี้

1. เพอริโอสตราคัม (Periostracum) เป็นชั้นนอกสุด เป็นแผ่นบางมีสี ส่วนประกอบทางเคมีเป็นสารโปรตีนที่แข็งเหมือนโปรตีนของเขาสัตว์ มีชื่อเฉพาะว่า คอนคิโอลิน (Conchiolin)

2. ปริสเมติก (Prismatic) เป็นชั้นกลางที่หนาและแข็งแรงที่สุด มีความหนามากกว่าชั้นอื่น ส่วนประกอบทางเคมีเป็นผลึกทรงสูงของแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) อยู่อัดตัวกันแน่น และเรียงตั้งฉากกับชั้นแรก ทั้งนี้ยังพบผลึกของแคลไซต์และอะราโกไนท์ในชั้นนี้

3. เนครีอัส (Nacreous) เป็นชั้นในสุด เป็นผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอะราโกไนต์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนบางและมันวาวเรียงซ้อน ๆ กัน เรียกว่า ชั้นมุกเพราะเป็นบริเวณที่มีการสร้างมุกโดยทั่วไปส่วนประกอบหลักของเปลือกหอย ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ซึ่งส่วนใหญ่มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 โดยที่แคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยมีโครงสร้างผลึก แบ่งเป็น 3 แบบ ดังนี้

1. แคลไซต์ (Calcite) มีลักษณะของโครงสร้างผลึกเป็นรูปทรงลูกบาศก์ที่มีหน้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนหกหน้าหรือที่เรียกว่า รอมโบฮีดรอน (Rhombohedral) มีความถ่วงจำเพาะ 2.71 มีความแข็งปานกลาง

2. อะราโกไนท์ (Aragonite) มีลักษณะผลึกเป็นแท่งปริซึมหรือแท่งพีรามิดคู่ เรียกว่าออทโทโรมบิก (Orthorhombic) ซึ่งมักจะเกิดการรวมตัวกันมีรูปร่างคล้ายดอกกุหลาบ มีความถ่วงจำเพาะ 2.93 และมีความแข็งมากกว่าแคลไซต์ เมื่อได้รับความร้อนจะเปลี่ยนเป็นแคลไซต์

3. วาเทอไรท์ (Vaterite) มีลักษณะผลึกทรงกลม

## 2.3 ชนิดของเปลือกหอยสองฝา

เปลือกหอยที่เป็นที่นิยมเลี้ยงหรือจับกันมากที่สุดในประเทศไทย ได้แก่ หอยลาย หอยแมลงภู่ หอยนางรม และหอยแครง (กรมประมง, 2551) โดยมีรายละเอียดดังนี้



1) หอยลาย มีชื่อสามัญว่า “หอยลาย” ชื่อสามัญภาษาอังกฤษว่า “Undulated Surf Clam or Short Necked Clam” ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า “Paphia undulata” หอยสองฝาที่พบมากบริเวณแถบชายฝั่งทะเลที่เป็นโคลนน้ำลึกไม่เกิน 8 เมตร โดยหอยลายจะขุดรูอยู่ใต้พื้นผิวดินลึก ประมาณ 20 เซนติเมตร ปริมาณเปลือกของหอยลายจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเนื้อหอย ซึ่งมีเปลือกประมาณร้อยละ 70 - 75 โดยน้ำหนัก โดยลักษณะของเปลือกจะหนา รูปร่างแบนรี มีวดลายสีน้ำตาลเข้มตัดกันเป็นแนวเฉียง พื้นสีเหลืองอมน้ำตาลหรือบางตัวมีสีน้ำตาลเทาอมดำ ขึ้นอยู่กับแหล่งอาศัย มีขนาดความยาวประมาณ 5 - 6 เซนติเมตร โดยเปลือกหอยลายมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณร้อยละ 97 (ดยาคี ตรงสถิตกุล, 2547)

2) หอยแมลงภู่ มีชื่อสามัญว่า “หอยแมลงภู่” ชื่อสามัญภาษาอังกฤษว่า “Green Mussel” ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า “Perna viridis” เป็นหอยสองฝามีรูปร่างคล้ายเสียมที่งอนทางด้านหัวเล็กน้อย หอยที่อาศัยอยู่ในบริเวณใต้น้ำตลอดเวลาจะมีเปลือกสีเขียวอมดำ พวกที่อยู่ในบริเวณน้ำขึ้นและลงมีโอกาสถูกแสงแดดบ้างเปลือกจะมีสีเหลือง ซึ่งจะมีขนาดความยาวประมาณ 4 - 20 เซนติเมตร โดยเปลือกหอยแมลงภู่มิมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณร้อยละ 96 มีปริมาณใกล้เคียงกับฝุนหินปูนที่มีปริมาณประมาณร้อยละ 98 (Ballester, Mármol, Morales & Sánchez, 2007) และจากการศึกษาโครงสร้างผลึกของเปลือกหอยแมลงภู่พบว่ามีการสร้างผลึกเป็นทั้งในแบบอะราโกไนต์และแคลไซต์ (จรรยาพร พุ่มงาม, 2545)

3) หอยนางรม มีชื่อสามัญว่า “หอยนางรมหรือหอยตะโกรม” ชื่อสามัญภาษาอังกฤษว่า “Pacific Oyster” ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า “Crassostrea gigas” เป็นหอยสองฝาที่โดยทั่วไปฝาทั้งสองด้านมีขนาดไม่เท่ากัน ฝาข้างซ้ายจะมีขนาดใหญ่กว่า เปลือกของหอยนางรมจะเปลี่ยนไปตามสภาวะแวดล้อม หอยนางรมที่เติบโตบนวัตถุแข็ง เช่น หินหรือปูนซีเมนต์ เปลือกจะมีจำนวนร่องมาก แต่ถ้าเจริญเติบโตในน้ำที่มีความเค็มสูงเปลือกจะแข็งกว่าหอยที่อยู่ในน้ำที่มีความเค็มต่ำ มีขนาดความยาวประมาณ 9 - 20 เซนติเมตร ซึ่งเปลือกหอยนางรมมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณร้อยละ 96 และความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.35 - 2.47 โดยขึ้นอยู่กับขนาดของเปลือกหอยอบ หากบดละเอียดมากความถ่วงจำเพาะจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม (Yoon, Kim & Han, 2003)

4) หอยแครง มีชื่อสามัญว่า “หอยแครง” ชื่อสามัญภาษาอังกฤษว่า “Cockle or Ark Shell” ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า “Anadara granosa” เป็นหอยสองฝาลักษณะค่อนข้างกลม เปลือกหนาส่วนใหญ่จะอาศัยอยู่ตามบริเวณชายฝั่งทะเลที่เป็นหาดโคลนและเลน หอยแครงเป็นหอยสองฝาชนิดหนึ่งที่มีลักษณะค่อนข้างกลมและแข็งแรง มีเปลือกหนา ด้านนอกของเปลือกทั้งสองข้างนั้นเป็นสันนูนในลักษณะเส้นโค้งจากด้านหลังไปยังปลายขอบของเปลือก มีจำนวนประมาณ 20 เส้นสีของเปลือก



ชั้นนอกไม่แน่นอน อาจจะมีสีขาวหรือแดงปนดำหรือแดงปนสีน้ำตาล โดยปกติแล้วเปลือกหอยจะเป็นสีขาวแต่จะถูกดินโคลนในแหล่งที่อยู่อาศัยจับจนเป็นสีน้ำตาล มีขนาดความยาวประมาณ 6 - 7 เซนติเมตร เปลือกหอยแครงมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณร้อยละ 97 และจากการศึกษาโครงสร้างผลึกของเปลือกหอยแครง พบว่า มีโครงสร้างผลึกเป็นทั้งอะราโกไนท์และแคลไซต์ (จรรยาพร พุ่มงาม, 2545)

#### 2.4 หอยนางรม

หอยนางรมจัดอยู่ใน Phylum Mollusca, Class Lamellibranchiata, Family Ostreidae มีการเพาะเลี้ยงหอยนางรมตามชายฝั่งทะเลตะวันออกของไทย ได้แก่ จังหวัดชลบุรี ระยอง จันทบุรี และตราด ภาคใต้ฝั่งอ่าวไทยพบการเลี้ยงหอยนางรมใน 6 จังหวัด ได้แก่ ประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร สุราษฎร์ธานี สงขลา ปัตตานี และนราธิวาส ส่วนภาคใต้ฝั่งทะเลอันดามันพบการเลี้ยงหอยนางรมในจังหวัด กระบี่ ระนอง ภูเก็ต หอยนางรมอาศัยอยู่ทั่วไปในพื้นที่น้ำเค็มหรือน้ำกร่อย คือบริเวณที่มีทั้งน้ำจืดและน้ำเค็มไหลมารวมกันทำให้น้ำบริเวณนั้นมีความกร่อย และเต็มไปด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อสัตว์น้ำที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือ แพลงก์ตอน ซึ่งเป็นอาหารของหอยนางรม และสัตว์น้ำทั่วไปหอยนางรมมีพฤติกรรมชอบอาศัยเกาะตามโขดหิน หรือรากไม้หลายชนิด ในประเทศไทยมีการเลี้ยงหอยนางรมมากกว่า 50 ปีมาแล้ว ส่วนใหญ่บุรีโภคสด มีการจำหน่ายไม่แพร่หลายเนื่องจากมีผลผลิตไม่เพียงพอ สามารถแบ่งพันธุ์หอยนางรมที่พบในประเทศไทยเชิงพาณิชย์ออกได้เป็น 3 ชนิด ด้วยกัน คือ

(1) หอยนางรมพันธุ์เล็กหรือหอยนางรมปากจیب (*Saccostrea commercialis*) เป็นหอยนางรมที่มีขนาดเล็ก หอยนางรมพันธุ์นี้มีการเลี้ยงกันมากทางภาคตะวันออกของประเทศไทย

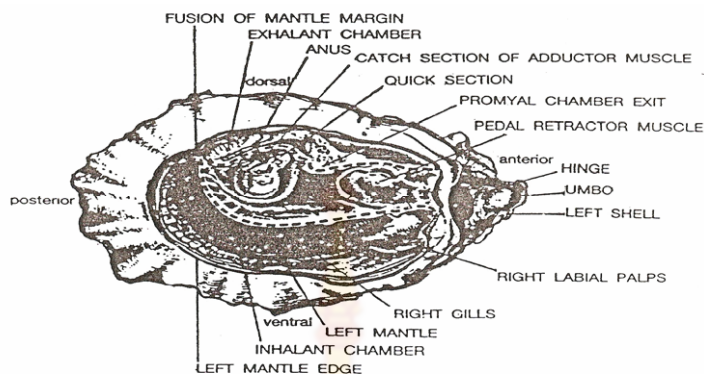
(2) หอยตะโกกรมกรามขาว (*Crassostrea belcheri*) เป็นหอยนางรมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในสามพันธุ์ มีการเลี้ยงกันมากทางภาคใต้และภาคตะวันออกของไทย ซึ่งได้แก่บริเวณ อ่าวบ้านดอน จังหวัดสุราษฎร์ธานี อ่าวเขาขั้ว จังหวัดกระบี่ บ้านตึกไคร จังหวัดพังงา บ้านนาทับจังหวัดสงขลา และอ่าวคู่มกระเบน จังหวัดจันทบุรี เป็นต้น (วันทนา อยู่สุข และ วีระพงษ์ ค้วงดี, 2544)

(3) หอยตะโกกรมกรามดำ (*Crassostrea lugubris*) เป็นหอยนางรมที่มีขนาดใหญ่เป็นอันดับที่สองในสามพันธุ์ พบมากที่อ่าวคู่มกระเบน จังหวัดจันทบุรี อ่างศิลา จังหวัดชลบุรี อ่าวช่อง จังหวัดตราด คลองบางนางรม จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ และคลองกำพวน จังหวัดระนอง เป็นต้น (วันทนา อยู่สุข และ วีระพงษ์ ค้วงดี, 2544)

#### 2.4.1 ลักษณะทางสรีระวิทยา

หอยเป็นสัตว์ที่ไม่มีกระดูกสันหลังมีมากมายหลายชนิดลำตัวไม่แบ่งเป็นปล้อง ๆ แต่อวัยวะต่าง ๆ จะประกอบรวมอยู่ในสัณฐานเดียวกัน หอยทุกชนิดมีเปลือกหุ้มภายนอกมีกล้ามเนื้อยึดเปลือกแข็งแรง โครงสร้างของตัวมีลักษณะคล้ายคลึงกับรูปแบบของบรรพบุรุษ ลำตัวซีกซ้ายและขวาเหมือนกัน ที่หัวไม่มีตาและหนวด ไม่มีแผงฟันในช่องปาก มีเหงือกขนาดใหญ่ 1 คู่ใช้สำหรับหายใจและกรองอาหาร ทางเดินอาหารมีช่องปากทางด้านหน้า และช่องทวารหนักทางด้านท้ายของตัว การผสมพันธุ์เป็นแบบภายนอกตัว หอยสองฝาที่นิยมนำมาบริโภคเป็นอาหารมีอยู่หลายชนิด เช่น หอยนางรม หอยแมลงภู่ และหอยแครง เป็นต้น

หอยนางรมเป็นหอยสองฝา ที่เปลือกทั้งสองข้างมีขนาดไม่เท่ากัน เปลือกด้านซ้ายมีขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นรูปถ้วย ซึ่งเป็นด้านที่หอยใช้ติดกับวัสดุ ในขณะที่เปลือกด้านขวาของหอยจะมีลักษณะค่อนข้างแบนราบ เปลือกหอยนางรมประกอบด้วยสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับเปลือกหอยชนิดอื่นๆ เปลือกทั้งสองข้างเชื่อมติดกันด้วยบานพับ ลักษณะหอยนางรมโดยทั่วไปมีรูปร่างไม่คงที่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่อาศัยภายในเปลือกประกอบด้วยส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อหอย โดยมีเนื้อเยื่อบาง ๆ ห่อหุ้มตัวทั้งสองข้างของลำตัวเรียกเนื้อเยื่อคลุม มีลักษณะเป็นริ้วแผ่ขยายออกไปถึงช่องปาก เหงือกมี 2 คู่ ทำหน้าที่เป็นกลไกกรองอาหารพร้อมทั้งทำหน้าที่หายใจ และช่วยในการขับถ่ายของเสียจากร่างกาย บริเวณประมาณกึ่งกลางลำตัวมีกล้ามเนื้อใหญ่ทำหน้าที่ปิดและเปิดเปลือก ตลอดจนบังคับให้เปลือกอ้ามากน้อยตามต้องการ ส่วนถัดเข้าไปเป็นก้อนเนื้ออันใหญ่ที่รวมอวัยวะต่าง ๆ ซึ่งบรรจุอยู่ภายใน เช่นระบบประสาท ระบบขับถ่ายของเสีย และระบบสืบพันธุ์ เนื้อเยื่อที่อ่อนนุ่มของหอยนางรมไม่ได้บรรจุอยู่เต็มฝาเปลือกทั้งสองข้างเลยทีเดียว แต่ภายในมีส่วนที่ช่องว่างเปิดติดต่อกับ ภายนอกช่องเปิดนี้เป็นทางผ่านให้อาหารเข้าไปพร้อมกับน้ำ โดยผ่านการรวบรวมให้เป็นกลุ่มก้อนแล้วเข้าสู่ปากผ่านระบบย่อยอาหาร สุดท้ายเศษเหลือจะผ่านออกทางทวาร พร้อมกำจัดของเสียออกไปจากตัวหอยซึ่งจะดำเนินไปในเวลาเดียวกับการหายใจ และการถ่ายของเสียของหอย โดยลักษณะทางกายภาพของหอยนางรม ภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2-1 ลักษณะทางกายภาพของหอยนางรม ที่มา : กรมประมง (2536)

#### 2.4.2 การกินอาหารและการเจริญเติบโต

หอยนางรมส่วนใหญ่จะกินอาหารโดยวิธีการกรอง เนื่องจากเป็นสัตว์อยู่กับที่อวัยวะที่ใช้ในการกรองอาหารคือเหงือก (gill) น้ำที่ไหลผ่านเข้ามาในโพรงเยื่อหุ้ม (mantle cavity) ไหลผ่านเหงือกไปออกทางท่อน้ำออก อาหารหรืออนุภาค ต่าง ๆ ซึ่งถูกพัดพามากับน้ำจะติดบนซี่เหงือก ซึ่งอาหารที่กรองได้ ได้แก่ ไดอะตอม (Diatom) ซิลิโค-แฟลคเจลเลต (silico-flagellates) และแพลงก์ตอนพืช (Phytoplankton) จำพวก ไดอะตอมและ สปอร์ ของสาหร่ายทะเลเป็นหลัก (สุวัฒน์ รัตนภาพไพศาล และคณะ, 2541) อาหารที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะตกลงมาในโพรงเยื่อหุ้มตอนล่างและถูกขับออกทางท่อน้ำออก ส่วนที่มีขนาดเล็กจะมีเมือกมาคลุม และมีขนเล็ก ๆ คอยพัดโบกให้อนุภาคเหล่านั้นเข้าสู่ทางเดินอาหารต่อไปได้ อนุภาคที่ไม่สามารถถูกย่อยจะถูกขับออกมาทางท่อน้ำออกภายหลัง กระบวนการกรองของหอยสองฝาจะเป็นไปได้ด้วยดีและมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อปริมาณน้ำที่ไหลผ่านเข้าสู่โพรงเยื่อหุ้มมากพอ และตัวหอยอยู่ในน้ำตลอดเวลา ดังนั้นจากการสังเกตจะพบว่า หอยที่เลี้ยงอยู่ในน้ำตลอดเวลาจะมีการเจริญเติบโตเร็วกว่าที่อยู่ในระดับน้ำขึ้นน้ำลงมีการสัมผัสกับอากาศเป็นบางเวลา (กรมประมง, 2540) ได้กล่าวว่าการเจริญเติบโต ของหอยนางรมขึ้นอยู่กับอิทธิพลปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมดังต่อไปนี้

(1) อาหาร เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการดำเนินการจัดการเลี้ยงหอย หอยส่วนใหญ่กินพวกไดอะตอมและแพลงก์ตอนพืช ดังนั้นความอุดมสมบูรณ์ของอาหารจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของหอยนางรม

(2) น้ำทะเล ควรมีความเค็มประมาณ 15 – 30 p.p.t ถ้าความเค็มสูงหรือต่ำกว่านี้มีผลกระทบต่อการทำงานของอวัยวะเจริญเติบโตของหอยนางรม โดยหอยจะมีอัตราการกรองอาหารช้าลงและทำให้อัตราเจริญเติบโตช้า สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Tan et al, 1996) พบว่าความเค็มที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของหอยนางรมอยู่ในช่วงความเค็มที่ 0 – 30 p.p.t

(3) อิทธิพลน้ำขึ้นน้ำลง ระยะเวลาที่หอยนางรมอยู่ในน้ำนานจะเจริญเติบโตเร็วแต่มีเปลือกบาง ส่วนหอยนางรมที่มีระยะเวลาอยู่ในน้ำน้อย การเจริญเติบโตช้าและมีเปลือกหนา

(4) ความขุ่นของน้ำ ปริมาณความขุ่นมาก ตะกอนโคลนตมเกาะตามเหงือกทำให้หอยหายใจไม่ออกและตายได้ นอกจากนี้ความขุ่นยังทำให้ประสิทธิภาพในการกรองอาหารต่ำลงมีผลทำให้หอยมีการเจริญเติบโตช้า

(5) ความหนาแน่นของหอยที่เลี้ยง การเลี้ยงหอยถ้ามีความหนาแน่นมากเกินไปมีผลทำให้หอยมีการเจริญเติบโตช้า โดยส่งผลต่อการเจริญเติบโตทางกายภาพ คือ ด้านความยาวของหอยจะมีการเจริญเติบโตมากกว่าด้านความกว้าง

(6) กระแสน้ำที่เหมาะสมแก่การเลี้ยงหอยควรไหลแรงระหว่าง 0.17 – 0.25 เมตรต่อวินาที และ 0.25 – 0.35 เมตรต่อวินาที อย่างไรก็ตามถ้าหากพื้นที่มีลมหรือกระแสน้ำแรงเกินไป เช่น ถ้าหากกระแสน้ำไหลแรงเกิน 0.5 เมตรต่อวินาที จะพัดพาตัวอ่อนของลูกหอยออกไปจากพื้นที่เร็วเกินความสามารถที่ลูกหอยจะหาวัสดุเกาะได้ อีกทั้งอาจพัดพาหลักหรืออุปกรณ์ที่ใช้ประกอบการเลี้ยงหอยสูญหายไป

(7) อุณหภูมิของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมระบบสรีรวิทยาของหอย เช่น ประสิทธิภาพของการกรองกินอาหาร การเผาผลาญอาหาร การหายใจและการขับถ่าย ตลอดจนการพัฒนาการของเซลล์สืบพันธุ์ และการเจริญเติบโตของตัวอ่อน หอยอาศัยอยู่ในแหล่งซึ่งมีอุณหภูมิที่ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของหอยนางรมอยู่ในช่วง 25 – 30 องศาเซลเซียส

#### 2.4.3 การสืบพันธุ์และการขยายพันธุ์

หอยนางรม มีเพศผู้ และเพศเมีย แยกกัน ยกเว้นในบางกรณีหอยตัวเดียวอาจจะมีทั้งไข่ และน้ำเชื้อ ลักษณะที่มีทั้งสองเพศอยู่ตัวเดียวกันนี้เรียกว่ากระเทย (hermaphrodite) ซึ่งอาจพบได้ในหอยสองฝาแทบทุกชนิด โดยที่มันอาจจะเปลี่ยนแปลงเพศได้ เมื่อเข้าสู่สภาวะใดสภาวะหนึ่ง แต่ทั่วไปแล้วมักจะแยกกัน การจำแนกเพศของหอยตะโกรม เมื่อดูจากลักษณะภายนอกไม่สามารถบอกได้ นอกจากจะเปิดเปลือกหอยออกมา แล้วสังเกตดูจากอวัยวะสืบพันธุ์ (gonad) ซึ่งปกคลุมอยู่รอบกระเพาะอาหาร นำมาส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ จึงจะแยกได้ว่าเป็นตัวผู้หรือตัวเมียเพราะทั้งตัวผู้และตัวเมีย เมื่อมีความสมบูรณ์เพศ จะมีสีครีมขาวเหมือนกัน ความสมบูรณ์เพศของหอยนางรมเกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อม ที่เป็นตัวกระตุ้นให้หอยปล่อยเซลล์สืบพันธุ์ออกมาผสมกันภายนอก เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความเค็ม ระดับความลึกของน้ำ ความเป็นกรด่างของน้ำหรือสารเคมีบางชนิด เป็นตัวกระตุ้นให้หอยปล่อยเซลล์สืบพันธุ์ออกมา เมื่อไข่กับน้ำเชื้อผสมกันจะมีการแบ่งตัวและพัฒนาเป็นลูกหอยวัยอ่อนซึ่งสามารถว่ายน้ำ ดำรงชีวิตเป็นพวกแพลงก์ตอนลอยในทะเล

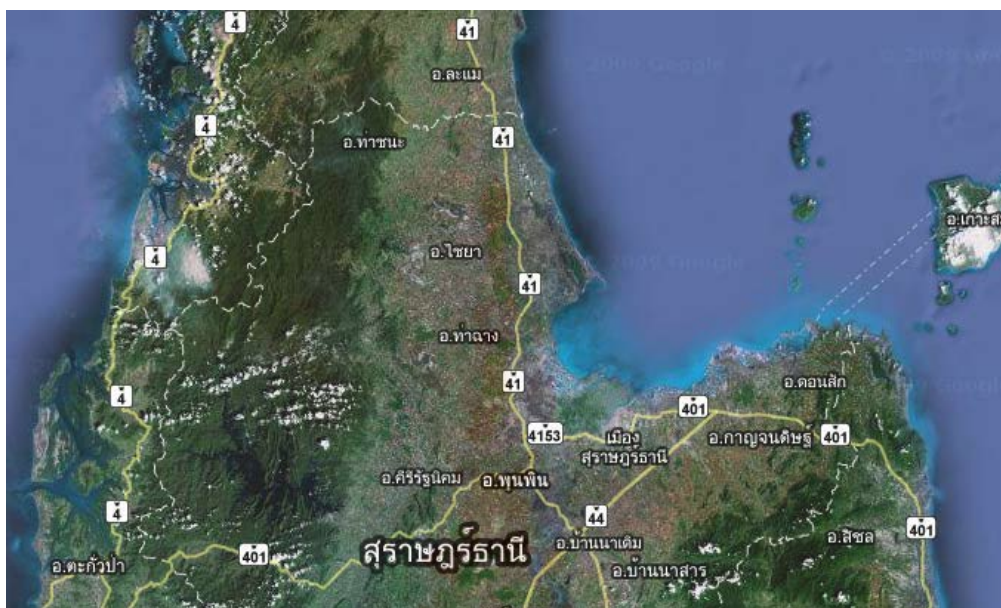


และมีการพัฒนาการขึ้นมา จนกระทั่ง ถึงวัยลงสู่พื้น หรือเกาะวัสดุ ซึ่งเรียกว่า metamorphosis หรือ settlement ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 13 – 20 วัน เรียกว่าหอยวัยเกิ้ล็ด ซึ่งจะเติบโตเป็นตัวเต็มวัย เมื่อลูกหอยถึงระยะลงสู่พื้นมักต้องเกาะกับวัสดุแข็งในน้ำ เช่น ก้อนหินเปลือกหอย หรือวัสดุต่าง ๆ เพื่อที่เจริญเติบโตต่อไป ถ้าลูกหอยนางรมหาวัสดุที่จะเกาะไม่ได้ก็จะตกลงสู่พื้นดิน โคลนด้านล่าง และตายในที่สุด

## 2.5 การเพาะเลี้ยงหอยนางรมในจังหวัดสุราษฎร์ธานี

### 2.5.1 ลักษณะทางภูมิศาสตร์ของอ่าวบ้านดอน

อ่าวบ้านดอน ตั้งอยู่ระหว่างละติจูดที่  $09^{\circ} 70'$  เหนือถึงละติจูด  $09^{\circ} 48'$  เหนือและลองจิจูดที่  $98^{\circ} 58'$  ตะวันออกถึงลองจิจูดที่  $100^{\circ} 5'$  ตะวันออก อ่าวบ้านดอนมีรูปร่างของอ่าวเป็นรูปตัว U (ภาพที่ 2.2) มีพื้นที่รวม 1,554.39 ตารางกิโลเมตร หรือ 971.492 ไร่ (มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์, 2550) มีความยาวของแนวชายฝั่งประมาณ 120 กิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ 9 อำเภอในจังหวัดสุราษฎร์ธานี ได้แก่ อำเภอท่าชนะ อำเภอไชยา อำเภอท่าฉาง อำเภอพุนพิน อำเภอเมือง อำเภอกาญจนดิษฐ์ อำเภอดอนสัก อำเภอเกาะสมุย และอำเภอเกาะพะงัน การขึ้นลงของน้ำทะเลในอ่าวบ้านดอนเป็นแบบน้ำเดียวหรือขึ้นลงวันละครั้ง ความลึกเฉลี่ยบริเวณกลางอ่าว อยู่ที่ช่วง 4 – 5 เมตร มีคลองน้อยใหญ่ 11 สายไหลลงอ่าว กระแสน้ำได้นำพาอาหารและปุ๋ยมากับสายน้ำด้วย ประกอบกับผิวหน้าดินในทะเลบริเวณใกล้แนวชายฝั่งอ่าวบ้านดอนเป็นดินเลนมีแร่ธาตุมาก จากสภาพอ่าวบ้านดอนที่มีพื้นที่มากความลึกค่อนข้างน้อย และปริมาณน้ำจืดที่ไหลลงอ่าวค่อนข้างมากในแต่ละปี จึงทำให้เกิดสภาพน้ำกร่อยเกิดขึ้นเป็นวงกว้าง และเป็นเวลานาน ความอุดมสมบูรณ์และระดับน้ำเค็มของน้ำทะเลในอ่าวจึงเหมาะแก่การเจริญเติบโตของหอยนางรมเป็นอย่างยิ่ง เมื่อแม่พันธุ์หอยนางรมวางไข่ จากลักษณะอ่าวที่เป็นรูปตัว U นี้เองจึงมีอิทธิพลทำให้ตัวอ่อนของหอยนางรมเคลื่อนตัวตามกระแสน้ำหมุนวนเหมือนลายเส้นก้นหอยโฆงอยู่ตามบริเวณปลายแหลมต่าง ๆ ในอ่าวบ้านดอน ทำให้บริเวณดังกล่าวมีลูกหอยนางรมหนาแน่น พบเกาะติดกับรากต้นไม้โกงกางหรือวัสดุที่ปักอยู่ในบริเวณดังกล่าว



ภาพที่ 2-2 พื้นที่การเพาะเลี้ยงหอยนางรมในจังหวัดสุราษฎร์ธานี  
ที่มา : คัดแปลงจาก กรมแผนที่ (2552)

### 2.5.2. พื้นที่การเพาะเลี้ยงหอยนางรมในจังหวัดสุราษฎร์ธานี

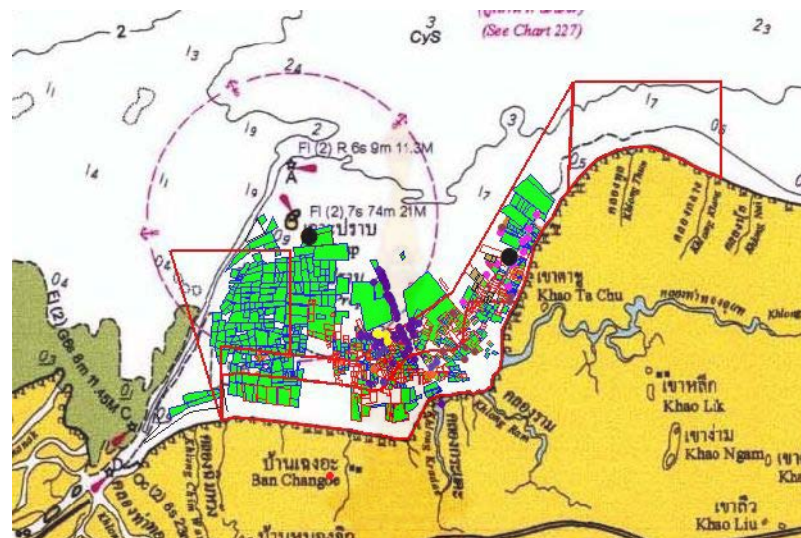
จังหวัดสุราษฎร์ธานีมีการเพาะเลี้ยงหอยนางรมอยู่ 3 อำเภอ คือ อำเภอกาญจนดิษฐ์ อำเภอคอนสัก และอำเภอไชยา (ตารางที่ 2.2 ) ในปี 2550 มีเกษตรกรผู้เลี้ยงหอยทั้งสิ้น 399 ราย โดยแบ่งออกเป็น อำเภอกาญจนดิษฐ์ 332 ราย (ภาพที่ 2.3) อำเภอคอนสัก 46 ราย และไชยา 21 รายรวมพื้นที่เพาะเลี้ยงทั้งหมด 12,426 ไร่ มีปริมาณการผลิตทั้งหมด 2,071 ตัน มูลค่าการผลิตทั้งหมด 78,698,000 บาท เนื้อที่เพาะเลี้ยงหอยนางรมของจังหวัดสุราษฎร์ธานีมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสถานการณ์ด้านราคาตกต่ำทำให้เกษตรกรขาดการดูแล และไม่มีการเลี้ยงหอยนางรมเพิ่ม รวมถึงเกษตรกรผู้เลี้ยงหอยนางรมเดิมได้หันมาเลี้ยงหอยแครง

ตารางที่ 2-2 แสดงอำเภอที่มีการเลี้ยงหอยในจังหวัดสุราษฎร์ธานี

District	Number of farms	Oyster Cultured farms (farm)	production quantity (Ton)	production cost (Baht)
Kanjanadit	332	11,238	1,873	71,174,000
Donsak	46	276	46	1,748,000
Chaiya	21	912	512	5,776,000
Total	399	12,426	2,071	78,698,000

ที่มา : สำนักงานประมงจังหวัดสุราษฎร์ธานี (2550)





ภาพที่ 2-3 เนื้อที่เพาะเลี้ยงหอยนางรมของจังหวัดสุราษฎร์ธานี  
ที่มา : สำนักงานประมง จังหวัดสุราษฎร์ธานี (2551)

### 2.5.3 การเลี้ยงหอยนางรมในจังหวัดสุราษฎร์ธานี

สำหรับจังหวัดสุราษฎร์ธานี เริ่มมีการเพาะเลี้ยงหอยนางรมครั้งแรกเมื่อประมาณ พ.ศ. 2501 หอยนางรมส่วนใหญ่เป็นหอยนางรมพันธุ์ท้องถิ่น โดยมีการเก็บลูกหอยในคลองท่าทองไปปล่อยให้เกาะติดกับหลักไม้บริเวณที่เป็นโคลนเลน มีน้ำท่วมถึงแต่มีระดับความลึกไม่มากนักมีรายงานว่าประมาณ ปี พ.ศ. 2503 มีการทดลองเลี้ยงหอยนางรมที่ปากน้ำท่าทอง อำเภอกาญจนดิษฐ์ และได้มีการขยายพื้นที่เลี้ยงไปยังบริเวณแหลมชุกอำเภอยะหา หอยนางรมสุราษฎร์ธานี เป็นหอยนางรมเปลือกบาง ขนาดใหญ่ เนื้อขาวवलอ้วน ส่วนใหญ่เป็นพันธุ์หอยตะโกรมกรมขาว นิยมรับประทานสดรสชาดี เป็นที่กล่าวถึงของนักบริโภคทั่วไป (กรมประมง, 2536) การเลี้ยงหอยนางรมเป็นอาชีพที่ช่วยเสริมรายได้ให้แก่เกษตรกร เนื่องจากลงทุนต่ำ ค่าตอบแทนสูง วิธีการเลี้ยงเป็นแบบง่าย ๆ และสามารถใช้แรงงานภายในครอบครัวได้ (กรมประมง, 2540) จังหวัดสุราษฎร์ธานีมีกระบวนการเลี้ยงหอยนางรมหลายรูปแบบ แต่กระบวนการเลี้ยงหอยนางรมที่นิยมเลี้ยงมากที่สุดคือแบบใช้หลอดหรือท่อซีเมนต์ แบบใช้กระเบื้องมุงหลังคาและแบบใช้แท่งซีเมนต์ เกษตรกรจับจองพื้นที่เพื่อใช้ในการเลี้ยงหอยนางรม โดยเลือกพื้นที่ตามแนวชายฝั่งบริเวณน้ำขึ้นและบริเวณนั้นมีหอยที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เมื่อได้พื้นที่แล้วทำการปักหลักไม้ ไม้ที่ใช้ในการปักหลัก ได้แก่ ไม้แป้น ไม้โกงกาง และไม้ไผ่ ๆ ปักไว้รอบพื้นที่สำหรับเป็นรั้ว แสดงอาณาเขตพื้นที่การเพาะเลี้ยงหอย เพื่อป้องกันการรบกวนจากภายนอก หลังจากนั้นจัดแบ่งพื้นที่ส่วนหนึ่งเป็นที่พักหรือที่ดูแล

หอย ที่เรียกกันว่า ขน้า (ขน้า ในที่นี้ก็คือ ที่พักหรือบ้านพักสำหรับพักอาศัย หลบแดดหลบฝน มีพื้นที่ ห้องนอน ห้องครัว ห้องน้ำเหมือนกับบ้าน และมีระเบียง จุดประสงค์หลักคือใช้ฝ้าดูแลหอยที่เพาะเลี้ยง)

## 2.6 ปูนซีเมนต์และองค์ประกอบทางเคมี

ปูนซีเมนต์เป็นผลผลิตมาจากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ จนรวมตัวกันสุกพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ประกอบด้วย 1. วัสดุที่มีธาตุแคลเซียมเป็นองค์ประกอบหลักเช่น หินปูนหรือชอล์กและ 2. วัสดุที่มีธาตุอลูมิเนียมและซิลิก้าเป็นองค์ประกอบ เช่นหิน (Shale) หรือดินเหนียว (Clay) และ 3. พวกที่ให้ธาตุเหล็กคือ แร่เหล็ก (Iron Ore) หรือดินลูกรัง (Laterite) ขั้นตอนในการผลิตซีเมนต์แบ่งเป็น การผลิตแบบเปียก (Wet Process) และ การผลิตแบบแห้ง (Dry Process) การผลิตแบบเปียกนั้นเป็นกรรมวิธีในการผลิตปูนซีเมนต์โดยใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นสูงมาบดผสมกันในสภาพที่เปียกและเติมน้ำเพิ่มลงไปในอัตราส่วนที่พอเหมาะเพื่อช่วยในการบดผสม วัตถุดิบที่เตรียมเสร็จจะมีน้ำเป็นส่วนผสมประมาณ 35-50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในรูป Slurry กรรมวิธีในการเผาจะใช้พลังงานความร้อนมากกว่าการผลิตแบบแห้งเพราะว่าต้องใช้ความร้อนส่วนหนึ่งในการไล่ความชื้นใน Slurry ออกให้หมดก่อนที่จะเผาต่อเพื่อให้ได้ปูนเม็ดออกมา กรรมวิธีในการผลิตแบบเปียกนี้ถือได้ว่าเป็นวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ในสมัยก่อน ซึ่งในปัจจุบันไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากต้องใช้พลังงานมากในขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ การผลิตแบบแห้ง คือการผลิตปูนซีเมนต์โดยใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นปกติ เช่น หินปูน (Limestone), หินดินดาน(Shale), ดินลูกรัง (Laterite) และแร่เหล็ก (Iron Ore) มาบดผสมในสภาพที่แห้งและนำไปเข้าเตาเผาโดยเพิ่มอุณหภูมิจนถึงประมาณ 1450 °C หลังจากนั้นทำให้เย็นตัวลงก็จะได้เป็นปูนเม็ด (Clinker) ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดประมาณ 3-25 มม. หลังจากที่ได้เป็นปูนเม็ดแล้วก็จะนำปูนเม็ดไปบดในหม้อบดปูนซีเมนต์ (Cement Mill) โดยทำการบดปูนเม็ดร่วมกับยิปซัมบดจนได้ความละเอียดตามที่ต้องการ หลังจากนั้นก็นำปูนซีเมนต์ที่ได้ไปบรรจุเพื่อจัดจำหน่ายต่อไป

### 2.6.1 องค์ประกอบต่างๆของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปจะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่คือ

ออกไซด์หลัก ได้แก่  $\text{CaO}$ (60-67เปอร์เซ็นต์),  $\text{SiO}_2$ (17-25เปอร์เซ็นต์),  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (3-8เปอร์เซ็นต์) และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0.5-0.6เปอร์เซ็นต์) ซึ่งรวมกันประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์

ออกไซด์รอง ได้แก่  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$

2.6.1 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของออกไซด์หลักในขบวนการเผาปูนเม็ด ซึ่งจะทำได้สารประกอบหลัก 4 ชนิด คือ

2.6.1.1 ไตรซิลิเกต (3CaO.SiO<sub>2</sub> หรือ ตัวย่อ C<sub>3</sub>S) เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดการแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง การเกิดปฏิกิริยาจะให้ความร้อนประมาณ 500 จูลต่อกรัม มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นมากในช่วงสัปดาห์แรก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C<sub>3</sub>S ประมาณ 50-70 เปอร์เซ็นต์

2.6.1.2 ไดซิลิเกต (2CaO.SiO<sub>2</sub> หรือ ตัวย่อ C<sub>2</sub>S) มีการแข็งตัวและให้กำลังช้ากว่า C<sub>3</sub>S เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวและให้ความร้อนประมาณ 250 จูลต่อกรัม ซึ่งค่าความร้อนจากปฏิกิริยาที่มีค่าน้อยทำให้ปูนซีเมนต์ที่มีส่วนประกอบของ C<sub>2</sub>S มากช่วยลดการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิลงได้ ส่วนกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นในระยะหลัง ซึ่งในระยะยาวแล้วกำลังที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับ C<sub>3</sub>S ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C<sub>2</sub>S ประมาณ 15-30 เปอร์เซ็นต์

2.6.1.3 ไตรซิลิเกตอลูมิเนต (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> หรือ ตัวย่อ C<sub>3</sub>A) เป็นสารประกอบที่ทำให้ปฏิกิริยากับน้ำทันทีก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนสูงในช่วงแรก ให้ค่าความร้อนประมาณ 850 จูลต่อกรัม ซึ่งในขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ทำการป้องกันการเกิด Flash Set โดยการเติมยิปซัมเพื่อหน่วงการก่อตัวอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาของ C<sub>3</sub>A และจำพัฒนา กำลังอัดในช่วง 1-2 วันแต่มีค่ากำลังอัดที่ต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C<sub>3</sub>A อยู่ประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถ้าต้องการปูนซีเมนต์ที่สามารถทนทานต่อซัลเฟตได้ดี ก็ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีค่า C<sub>3</sub>A ต่ำ

2.6.1.4 เตตระซิลิเกตอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (4CaO. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> หรือ ตัวย่อ C<sub>4</sub>AF) เป็นสารประกอบที่ได้จากวัตถุดิบที่มีสารประกอบแร่เหล็กและอลูมิเนียมเป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิของปูนเม็ดระหว่างกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม มีผลทำให้ปูนซีเมนต์เป็นสีเทาซึ่งสำหรับปูนซีเมนต์ขาวจะมีสัดส่วนของ C<sub>4</sub>AF อยู่ในปริมาณที่น้อยมาก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C<sub>4</sub>AF ประมาณ 5-15

## 2.7 สารประกอบรองของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ให้ผลกระทบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์

2.7.1 ยิปซัม (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) เป็นสารประกอบที่ใส่เข้าไปในขั้นตอนการบดปูนเม็ด เพื่อไปทำปฏิกิริยากับ C<sub>3</sub>A เกิดเป็น Ettringite และ Monosulphate เพื่อหน่วงการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C<sub>3</sub>A ส่วนมากจะเติมยิปซัมประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์

2.7.2 Free Lime (CaO) ซึ่งอาจจะเกิดจากวัตถุดิบที่มีปริมาณ CaO มากเกินไป หรือเกิดจากการทำปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ เช่นการเผาปูนยังไม่สุกได้ที่ ซึ่งตัว Free Lime นี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ หลังจากที่ปูนซีเมนต์แข็งตัวแล้วทำให้เกิดการขยายปริมาตรอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและเสียหายได้เนื่องจากการไม่อยู่ตัวของปูนซีเมนต์ (Unsoundness)



2.6.3 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) วัตถุประสงค์ในการผลิตปูนซีเมนต์โดยปกติจะมี  $MgCO_3$  เมื่อเผาแล้วจะได้ MgO และ  $CO_2$  ซึ่งเมื่อ MgO ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะคล้ายกับ CaO คือจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่ส่วนมากจะให้ผลที่ค่อนข้างรุนแรงกว่า โดยปกติจะควบคุมปริมาณ MgO ให้มีปริมาณไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถ้ามีมากกว่านี้ก็จะมีความเสี่ยงต่อการเกิดความไม่อยู่ตัวของปูนซีเมนต์ (Unsoundness)

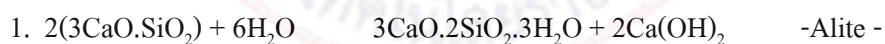
2.6.4 อัลคาไลออกไซด์ ( $Na_2O, K_2O$ ) ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่สามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลหรือด่างในปูนซีเมนต์ มาผสมเป็นคอนกรีตจะเกิดปฏิกิริยา Alkali-Aggregate Reaction หรือ AAR เป็นผลทำให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย

## 2.8 การก่อตัวและปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์

(ชโลทร, 2552) ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำ จะก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวและลื่นไหลได้ในช่วงเวลาหนึ่ง โดยจะเรียกช่วงเวลาที่คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า “Dormant Period” หลังจากนั้นซีเมนต์เพสต์จะเริ่มจับตัว (Stiff) ถึงแม้ว่าจะยังนิ่มอยู่แต่ก็จะไม่สามารถไหลตัวได้อีกแล้ว จุดนี้จะเป็นจุดที่เรียกว่า “จุดเริ่มแข็งตัว (Initial Setting Time)” การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปเรื่อยๆ จนถึงจุดที่เป็นของแข็งที่คงสภาพซึ่งเรียกจุดนี้ว่า “จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Setting Time)” ซีเมนต์เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไป จนกระทั่งสามารถรับน้ำหนักได้กระบวนการทั้งหมดนี้เรียกว่า “การก่อตัวและการแข็งตัว (Setting and Hardening)”

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบในคอนกรีตเกือบทุกตัวเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เกิดจากสารประกอบแต่ละตัวทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง (Solid Product of Hydrations) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาจะทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าน้อยกว่าปริมาณของซีเมนต์เพสต์เริ่มต้น จึงทำให้เกิดการหดตัวขึ้นในซีเมนต์เพสต์และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว สำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์มีดังนี้

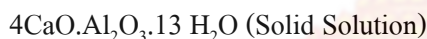
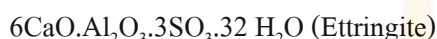
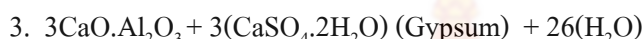
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของอัลไซมซิลิเกต Alite ( $C_3S$ ) และ Belite( $C_2S$ )



สมการที่ 1 เป็นการทำให้ปฏิกิริยาเคมีของ Alite กับ น้ำ ทำให้ได้ของแข็งคือ  $CaO.2SiO_2.3H_2O$  ( $C_3S_2H_3$ ) ซึ่งเป็นผลึกของแข็งหลักในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว และได้ของแข็งอีกชนิดหนึ่งคือ  $Ca(OH)_2$  เป็นของแข็งที่สามารถละลายน้ำได้และมีคุณสมบัติเป็นเบส

สมการที่ 2 เป็นการทำปฏิกิริยาเคมีของ Belite กับ น้ำ ทำให้ได้ของแข็งคือ แคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต ( $C_3S_2H_3$ ) และ  $Ca(OH)_2$  เช่นเดียวกับปฏิกิริยาของ Alite แต่ปฏิกิริยาของ Belite จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และให้ความร้อนออกมาน้อยกว่าปฏิกิริยาของ Alite

ปฏิกิริยาไฮดรเจนชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต Aluminate ( $C_3A$ )

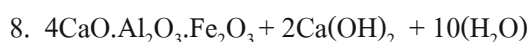
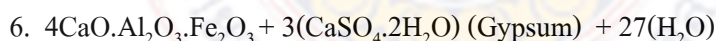


สมการที่ 3 เป็นการทำปฏิกิริยาเคมีของ Aluminate กับ ยิปซัม และน้ำ ทำให้ได้สารที่เป็นของแข็งมีลักษณะคล้ายกับหนามเป็นเส้นเล็กๆ ซึ่งเรียกว่า Ettringite ซึ่งจะเกิดก่อนหน้าในการทำปฏิกิริยาของสารประกอบในซีเมนต์ แต่โครงสร้างของผลึกไม่ได้แข็งแรงเท่ากับผลึกของ แคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต

สมการที่ 4 เนื่องจากผลึก Ettringite ไม่คงตัวจะทำปฏิกิริยาต่อกับ Aluminate และน้ำ ทำให้ได้เป็นของแข็งที่เรียกว่า Monosulphate

สมการที่ 5 หลังจากยิปซัมหมดไปแล้ว Aluminate ที่เหลืออยู่ในระบบจะทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำ ได้เป็นสารละลายของแข็งต่อไป

ปฏิกิริยาไฮดรเจนชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ Ferrite ( $C_4AF$ )

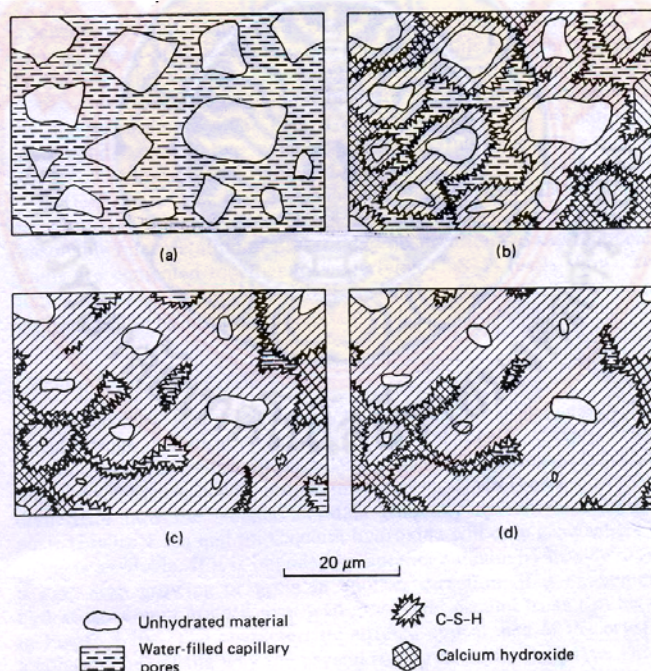


สมการที่ 6 เป็นการทำปฏิกิริยาเคมีของ Ferrite กับ ยิปซัม และน้ำ ทำให้ได้สารที่เป็นของแข็งมีลักษณะคล้ายกับหนามเป็นเส้นเล็กๆ ซึ่งเรียกว่า Ettringite มีลักษณะคล้ายคลึงกับปฏิกิริยาของ Aluminate และยังได้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกมาด้วย

สมการที่ 7 เนื่องจากผลึก Ettringite ไม่คงตัวจะทำปฏิกิริยากับ Ferrite และน้ำ ทำให้ได้เป็นของแข็งที่เรียกว่า Monosulphate และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์

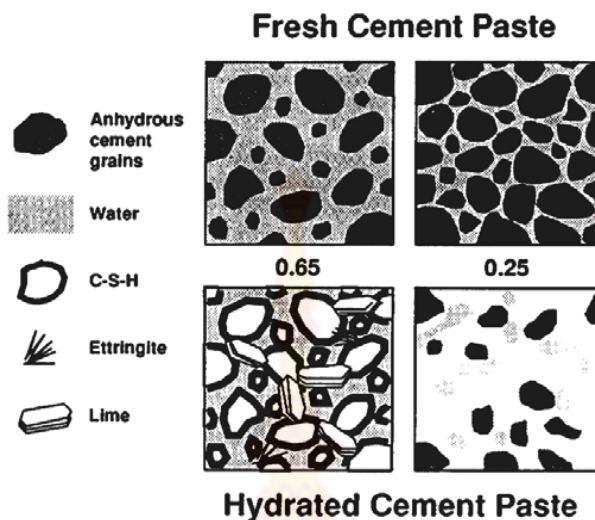
สมการที่ 8 หลังจากยิปซัมหมดไปแล้ว Aluminate ที่เหลืออยู่ในระบบจะทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำ ได้เป็นสารละลายของแข็งต่อไป 8.6.8 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ในสภาพแข็ง (ธีรวัฒน์ ลินศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

ภาพที่ 2.4 แสดงแผนภูมิการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ เริ่มต้นจากเม็ดปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งจะขยายตัวเข้าไปในโพรงหรือช่องว่าง ผลผลิตไฮเดรชันเรียกรวมๆ ว่าซีเมนต์เจล (Cement Gel) โดยปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ (ปฏิกิริยาไฮเดรชัน) เป็นได้ดังสมการดังนี้



ภาพที่ 2-4 แผนภูมิการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์  
(a) เริ่มผสม; (b) อายุ 7 วัน; (c) อายุ 28 วัน; (d) อายุ 90 วัน





ภาพที่ 2-5 ผลกระทบของ w/c ต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์

ภาพที่ 2.5 แสดงผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ต่อโครงสร้างระดับอนุภาคของซีเมนต์เพสต์ โดยพิจารณาที่ปริมาตรเท่ากัน พบว่าที่ w/c = 0.65 อนุภาคของปูนซีเมนต์จะอยู่ห่างกัน เมื่อ w/c ลดลงเท่ากับ 0.25 อนุภาคปูนซีเมนต์จะอยู่ใกล้กัน เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันผลิตผลของปฏิกิริยาจะอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ทำให้โครงสร้างระดับอนุภาคของซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้น ที่ระยะเวลาเท่ากัน พิจารณา w/c = 0.65 การพัฒนาผลผลิตจากปฏิกิริยาให้เชื่อมโยงถึงกันต้องใช้เวลาาน มีปริมาณน้ำเกินความจำเป็นในการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ ส่วนประกอบของน้ำที่เหลือจะเป็นตัวกลางในการนำสารอันตรายเข้ามาทำอันตรายต่อคอนกรีต และถ้ามีส่วนเกินนั้นก็ทำให้เกิดโพรงในคอนกรีต ทำให้ของเหลวหรือก๊าซที่สามารถทำอันตรายกับคอนกรีตซึมเข้ามาในโพรงของคอนกรีต และทำปฏิกิริยากับสารประกอบในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตเสื่อมสภาพและความทนทานลดลง

โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์มีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นของแข็ง, ช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ (Voids) และน้ำในซีเมนต์เพสต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้ว

1. ของแข็ง ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เป็นสารที่ให้กำลังกับคอนกรีต มีปริมาณมากที่สุดในซีเมนต์เพสต์ คือ มีอยู่ประมาณร้อยละ 50-70, แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรด์มีอยู่ประมาณร้อยละ 10-15, แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารที่เหลือ ซึ่งแทรกตัวอยู่ในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์มีอยู่ประมาณร้อยละ 20-25 โดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ และอนุภาคปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาไม่หมดก็ยังคงมีอยู่ในซีเมนต์เพสต์ด้วย

2. ช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ ได้แก่ ช่องว่างคาпилลารี (Capillary Voids) คือ ช่องว่างที่ไม่ถูกอุดด้วยส่วนที่เป็นของแข็ง และโพรงอากาศ (Air Voids) คือ ช่องว่างอากาศ

3. น้ำในซีเมนต์เพสต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้ว (Hydrate Cement Paste, HCP) น้ำที่อยู่ใน HCP สามารถอยู่ได้หลายรูปแบบ การแบ่งแยกรูปแบบของน้ำที่อยู่ใน HCP แบ่งโดยดูที่ความยากง่ายในการเคลื่อนน้ำออกจาก HCP ซึ่งน้ำสามารถออกจาก HCP เมื่อได้รับความร้อน ซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสถานะแข็งประกอบไปด้วยสารต่างๆ ที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ การสูญเสียน้ำในซีเมนต์เพสต์จะส่งผลทำให้ซีเมนต์เพสต์มีการหดตัว (Shrinkage) น้ำในซีเมนต์เพสต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้วสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทตามความยากง่ายในการกำจัดออกไป ดังนี้

3.1 น้ำที่สามารถระเหยได้ง่าย (Water Vapour) เป็นน้ำที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่ของซีเมนต์เพสต์ น้ำประเภทนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้นในอากาศ และ อุณหภูมิ

3.2 น้ำคาпилลารี (Capillary Water) คือ น้ำที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่กว่า 5 นาโนเมตร ซึ่งเป็นน้ำอิสระจากอิทธิพลของแรงดึงดูด (Attractive Force) ของของแข็งที่อยู่ในเพสต์ จากพฤติกรรมดังกล่าวสามารถแบ่งน้ำคาпилลารีได้ 2 ชนิด ชนิดที่ 1 น้ำในช่องว่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตรเรียกน้ำดังกล่าวว่าน้ำอิสระ (Free Water) เมื่อนำน้ำอิสระออกจากเพสต์แล้ว จะไม่ทำให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลง ส่วนน้ำชนิดที่ 2 เป็นน้ำที่เกิดจากแรงดึงคาпилลารี (Capillary Tension) ในช่องว่างขนาด 5-50 นาโนเมตร ซึ่งเมื่อน้ำชนิดนี้ระเหยออกไปจะส่งผลทำให้ซีเมนต์เกิดการหดตัวได้

3.3 น้ำที่ถูกดูดซับ (Adsorbed Water) คือ น้ำที่อยู่ใกล้กับผิวสัมผัสของของแข็งซึ่งถูกยึดไว้ด้วยแรงดึงดูด (Attractive Force) ของของแข็งที่อยู่ในเพสต์ โดยโมเลกุลของน้ำจะถูกดูดซับอยู่รอบๆผิวสัมผัสของของแข็งในเพสต์ เรียกแรงยึดเหนี่ยวนี้ว่าแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) น้ำในส่วนนี้จะเรียงตัวกันไม่เกิน 5 โมเลกุล (ความหนาแน่นไม่เกิน 1.3 นาโนเมตร) น้ำส่วนนี้ถูกขับออกโดยทำให้เพสต์แห้งเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าประมาณร้อยละ 30 การสูญเสียน้ำในส่วนนี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการหดตัว

3.4 น้ำระหว่างชั้น (Interlayer Water) เป็นน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของ C-S-H เนื่องจากโครงสร้างของ C-S-H มีลักษณะเป็นชั้นๆ โดยแรงดึงดูดแต่ละชั้นเป็นแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรเจน น้ำส่วนนี้อยู่ใน Gel Pore ของซีเมนต์เพสต์ (มีขนาดเล็กกว่า 2.6 นาโนเมตร) น้ำส่วนนี้ถูกยึดไว้อย่างแข็งแรงโดยผิวของของแข็งในช่องว่าง การกำจัดน้ำในส่วนนี้ต้องใช้ความร้อนสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าร้อยละ 11% โครงสร้างของ C-S-H จะหดตัวเมื่อสูญเสียน้ำดังกล่าวไป

3.5 น้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทางเคมี (Chemically Combined Water) เป็นน้ำที่เป็นส่วนประกอบของผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Product) น้ำในส่วนนี้นำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาทางเคมี การกำจัดน้ำในส่วนนี้ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า  $1,000^{\circ}\text{C}$  เพื่อให้ซีเมนต์

เพสต์และน้ำสลายตัวไปเป็นสารอื่นหรือที่เรียกว่าการสลายตัวของสาร (Decomposition) เช่น การสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ CaO กับน้ำ (H<sub>2</sub>O)

เมื่อเผาซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิระหว่าง 100-400°C ปริมาณน้ำประเภทต่างๆ ในซีเมนต์เพสต์จะระเหยไป แต่เมื่อเผาซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นระหว่าง 400-1,000°C สารประกอบต่างๆ ในซีเมนต์เพสต์จะสลายตัวไปเป็นสารประกอบอื่นที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำลงหรือเป็นธาตุดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2-3 อุณหภูมิที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารต่างๆ ในซีเมนต์เพสต์ (Decomposition Reaction)

ลำดับที่	อุณหภูมิ (°C)	ปฏิกิริยา
1	100	น้ำในช่องว่างระเหย
2	180	การสลายตัวของ C-S-H
3	350	การสลายตัวของ C-S-H
4	400	การสลายตัวของ C-S-H
5	600	การสลายตัวของ Ca(OH) <sub>2</sub>
6	700	การสลายตัวของ CaCO <sub>3</sub>

ลำดับที่ 1 แสดงถึงปฏิกิริยาการเอาน้ำออกจากช่องว่าง (Pore) ซึ่งเป็นน้ำอิสระ (Free Water) ที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่สามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิประมาณ 100 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่น้ำกลายเป็นไอ

ลำดับที่ 2 แสดงถึงปฏิกิริยาการเอาน้ำจากช่องว่างคาпилลารีออก ซึ่งเป็นน้ำที่เกิดจากแรงดึงคาпилลารี (Capillary Tension) ในช่องว่างขนาดเล็กในโครงสร้างของ C-S-H

ลำดับที่ 3 แสดงถึงปฏิกิริยาการเอาน้ำที่ถูกดูดซับ (Adsorbed Water) ออกซึ่งเป็นน้ำที่อยู่ใกล้กับผิวสัมผัสของของแข็งในโครงสร้างของ C-S-H

ลำดับที่ 4 แสดงถึงปฏิกิริยาการเอาน้ำระหว่างชั้น (Interlayer Water) ออกซึ่งเป็นน้ำที่อยู่ในแต่ละชั้นในโครงสร้างของ C-S-H อันเนื่องมาจากว่าโครงสร้างของ C-S-H มีลักษณะเป็นชั้นๆ

ลำดับที่ 5 แสดงถึงปฏิกิริยาการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยสลายตัวได้แคลเซียมออกไซด์และน้ำดังสมการ

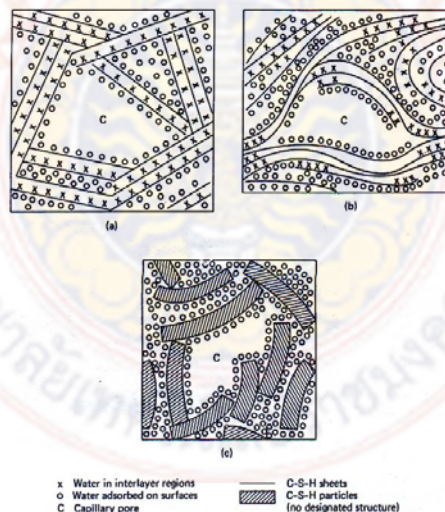


ลำดับที่ 6 แสดงถึงปฏิกิริยาการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) โดยสลายตัวได้แคลเซียมออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการ



การศึกษาโครงสร้างที่แท้จริงของ C-S-H เป็นเรื่องยาก โดยได้มีการนำเสนอแบบจำลองของ C-S-H ขึ้นหลายแบบเพื่ออธิบายคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์แสดงในรูปที่ 3 แบบจำลองของ Powers-Brunauer แสดงไว้ในภาพที่ 2.6a แสดงโครงสร้างของ C-S-H ประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆซึ่งยึดติดกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ประกอบด้วยแผ่น C-S-H จำนวน 2 หรือ 3 แผ่นเกาะกันอยู่ แบบจำลองของ Feldman-Sereda แสดงไว้ในภาพที่ 2.6b เชื่อว่าโครงสร้างของ C-S-H ประกอบด้วยแผ่น C-S-H เดี่ยวที่เกาะกันอยู่

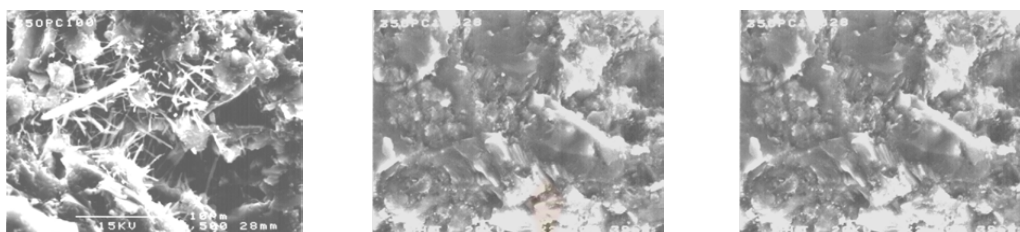
ภาพที่ 2.7 แสดงภาพถ่ายขยายโดย SEM ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 7, 28, และ 90 วัน ตามลำดับพบว่าที่อายุ 7 วัน (ภาพที่ 8.7a) โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์มีช่องว่างหรือโพรงมาก พบเอททริงไกต์มีลักษณะเป็นเข็มยาวเกิดขึ้นรอบเม็ดปูนและขยายเข้าไปในช่องว่างที่อายุ 28 วัน (ภาพที่ 2.7b) ผลิตผลไฮดรชันประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต, แคลเซียมไฮดรอกไซด์, แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรต์ และส่วนประกอบย่อยอื่นอีกไม่มาก ขยายเข้าไปในโพรงหรือช่องว่างมากขึ้นทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความแน่นขึ้น โดยเฉพาะที่อายุ 90 วัน (ภาพที่ 2.7c) ซีเมนต์เพสต์มีโครงสร้างที่แน่นยิ่งขึ้น



ภาพที่ 2-6 แบบจำลองโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต

(a) Powers-Brunauer (b) Feldman-Sereda (c) Munich





ภาพที่ 2-7 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์

(a) อายุ 7 วัน (b) อายุ 28 วัน (c) อายุ 90 วัน

### โครงสร้างโพรงในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว

โดยทั่วไปซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วยโพรงอากาศ (Air Voids) โพรงคาปิลลารี (Capillary Pores) และโพรงเจล (Gel Pores) ภาพที่ 2.8 และ 2.9 แสดงโครงสร้างและขนาดโพรงต่างๆ

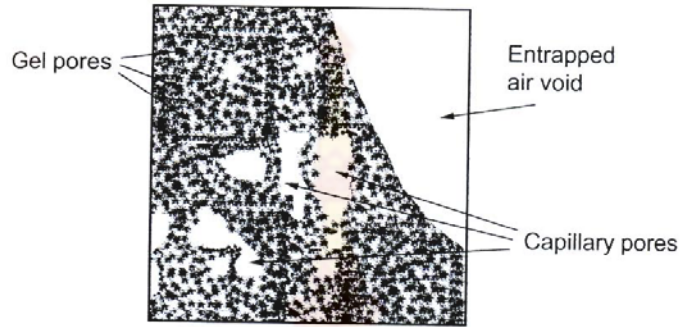
1. โพรงอากาศ (Air Voids) โดยทั่วไปโพรงอากาศมีรูปร่างค่อนข้างกลมในระหว่างการผสมคอนกรีตทำให้เกิดโพรงอากาศ (Entrapped Air Voids) ซึ่งอาจมีขนาดใหญ่ถึง 3 มิลลิเมตร และถ้าใส่สารผสมเพิ่มชนิดสารกักกระจายฟองอากาศ (Air-Entraining Admixture) เข้าไปในคอนกรีตทำให้เกิดโพรงอากาศขนาดเล็กกระจายในซีเมนต์เพสต์ระหว่างการผสมเรียกโพรงอากาศชนิดนี้ว่า Entrained Air Voids มีขนาดอยู่ในช่วง 50-200 ไมโครเมตร โพรงอากาศที่ใหญ่และจำนวนมาก ทำให้กำลังรับแรงลดลงและทำให้การซึมผ่านเร็วและง่ายขึ้น

2. โพรงคาปิลลารี (Capillary Pores) เป็นส่วนของช่องว่างของน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมไม่แน่นอน (Irregular Shape) ปริมาตรและขนาดของโพรงคาปิลลารีขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และการเกิดปฏิกิริยา ในอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่ำ ( $w/c < 0.35$ ) โพรงคาปิลลารีมีขนาดอยู่ในช่วง 10-50 นาโนเมตร ในขณะที่เมื่ออัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าสูง ( $w/c > 0.50$ ) โพรงคาปิลลารีมีขนาดใหญ่ถึง 3-5 ไมโครเมตร โพรงคาปิลลารีที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตรมีผลต่อกำลังและการซึมผ่านของคอนกรีต ส่วนโพรงคาปิลลารีที่มีขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร ส่งผลต่อการหดตัวและการคืบของคอนกรีต

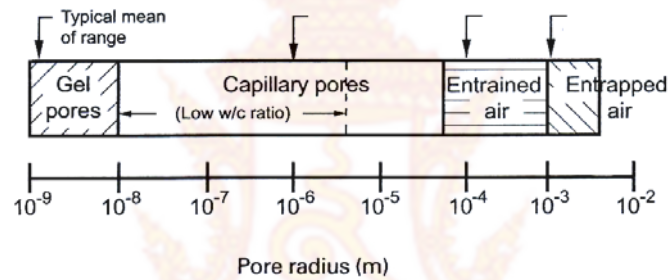
3. โพรงเจล (Gel Pores) เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของซีเมนต์เจล เป็นโพรงที่มีขนาดเล็กมาก คือ มีขนาดต่ำกว่า 10 นาโนเมตร โดย Powers คำนวณว่าโพรงเจลระหว่างโครงสร้างของ C-S-H มีขนาดเฉลี่ย  $18^{\circ}A$  ( $1^{\circ}A = 10^{-10}$  เมตร) Feldman and Seredar พบว่าช่องว่างระหว่าง



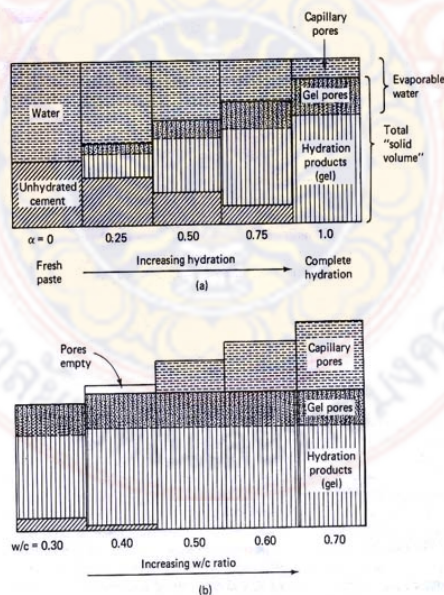
โครงสร้างของ C-S-H มีขนาดตั้งแต่ 5 ถึง 25<sup>o</sup>A โพร่งเจลมีผลน้อยมากต่อกำลังและการซึมผ่าน แต่จะมีผลต่อการหดตัวและการคืบของคอนกรีต



ภาพที่ 2-8 โครงสร้างโพรง



ภาพที่ 2-9 ขนาดโพรง

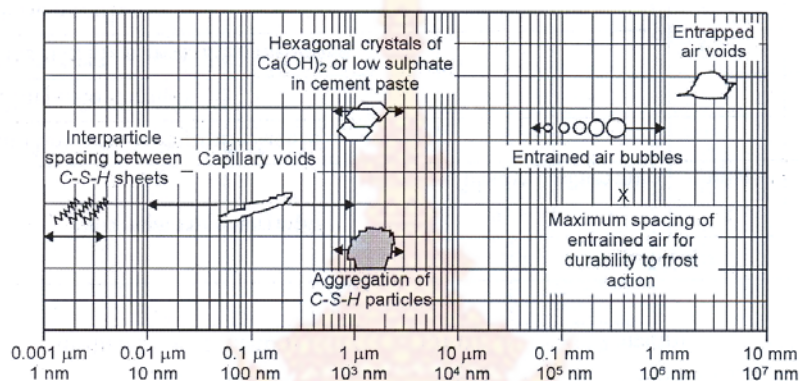


ภาพที่ 2-10 ปริมาตรของส่วนประกอบซีเมนต์เฟสต์

(a) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อนูนซีเมนต์คงที่เท่ากับ 0.50

(b) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อนูนซีเมนต์มีการเปลี่ยนแปลง

ภาพที่ 2.10a แสดงปริมาณของส่วนประกอบซีเมนต์เฟสที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่เท่ากับ 0.50 พบว่าปริมาณโพรงคาปิลลารีลดลงและโพรงเจลเพิ่มขึ้นเมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อพิจารณาภาพที่ 2.10b พบว่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยาเท่ากัน ปริมาณโพรงคาปิลลารีเพิ่มขึ้น ส่วนโพรงเจลจะเท่ากัน ภาพที่ 2.11 เปรียบเทียบขนาดของของแข็งและโพรงในซีเมนต์เฟส



ภาพที่ 2-11 ขนาดของของแข็งและโพรงในซีเมนต์เฟส

### การเสื่อมสภาพของคอนกรีต

หลักการของการออกแบบโครงสร้างที่ดีคือ ออกแบบเพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างที่สามารถรับน้ำหนักออกแบบได้ตลอดอายุการใช้งานที่ต้องการ โดยปราศจากการซ่อมแซมในระดับที่เกินกว่าการคาดหมายเอาไว้ โดยปกติอายุการใช้งานที่ต้องการของโครงสร้างแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างเช่น ขนาด ความสำคัญ สถานที่ที่โครงสร้างนั้นอยู่ และราคาของโครงสร้างนั้นๆ เช่น เขื่อน มักถูกออกแบบให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าสะพานอาคารสูง และอาคารพาณิชย์ ตามลำดับ การที่จะสามารถออกแบบให้โครงสร้างปราศจากการซ่อมแซมที่ก่อให้เกิดค่าใช้จ่าย และปัญหาต่อเนื่องอื่นๆที่ตามมาจากการปิดการใช้งานของโครงสร้างที่จะซ่อมแซมนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงความคงทนของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างควบคู่ไปกับการออกแบบความแข็งแรงของโครงสร้างนั้นด้วย เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าการออกแบบการรับแรงของโครงสร้างคอนกรีตที่อายุใดอายุหนึ่ง เช่น ที่อายุ 28 วัน เป็นเกณฑ์ โครงสร้างที่ออกแบบมานั้น จะรับน้ำหนักที่ออกแบบได้ตลอดไปก็ต่อเมื่อกำลังและคุณสมบัติทางกลอื่นๆของคอนกรีตไม่เลวลงไปกว่าที่อายุ 28 วัน แต่ในหลายสภาวะแวดล้อม คอนกรีตจะมีคุณสมบัติทางกลโดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติการรับแรงต่ำลงไปตามกาลเวลา เนื่องจากถูกกระทำจากปัจจัยหลายอย่างในสิ่งแวดล้อม ทั้งทางกายภาพ

ทางเคมี และอื่นๆ ดังจะได้อธิบายรายละเอียดในบทต่อไป บางสาเหตุก็ยังเป็นผลให้เหล็กสนิมในคอนกรีตเกิดสนิมอีกด้วย

การออกแบบโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การให้รายละเอียดของเหล็กเสริมและการควบคุมการก่อสร้างก็มีผลต่ออายุของโครงสร้างเช่นเดียวกัน การให้รายละเอียดของเหล็กเสริมที่ไม่ดีโดยไม่คำนึงถึงความเป็นไปได้ในการเทคอนกรีตที่ดี การก่อสร้างที่ไม่มีการควบคุมที่ดี ปล่อยให้มีการเทคอนกรีตไม่เต็มหรือคอนกรีตหุ้มเหล็กไม่เพียงพอก็ดี ล้วนแต่นำไปสู่ปัญหาโครงสร้างคอนกรีตมีอายุการใช้งานสั้นลงกว่าที่ควรจะเป็นทั้งสิ้น

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า การออกแบบคอนกรีตที่มีพื้นฐานความคิดมาจากกำลังคอนกรีตที่อายุใดอายุหนึ่งมีจุดด้อยตรงที่ไม่ได้คำนึงถึงการเสื่อมสภาพของคอนกรีตไปตามอายุการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง จึงนำมาสู่แนวทางการออกแบบใหม่โดยคำนึงถึงความคงทนของคอนกรีตด้วย อย่างไรก็ตามก่อนที่จะสามารถออกแบบโดยแนวคิดใหม่นี้ได้จำเป็นต้องมีความเข้าใจถึงการเสื่อมสภาพของคอนกรีตในสภาวะการใช้งานภายใต้สิ่งแวดล้อมต่างๆกันก่อน

การเสื่อมสภาพของคอนกรีตสามารถจำแนกออกได้เป็น 5 ชนิด ตามสาเหตุของการเสื่อมสภาพดังนี้

1. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกายภาพ (Physical Deterioration) ได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) การทรุดตัว (Settlement) การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage) การแข็งตัวและเหลวของน้ำในคอนกรีต (Freezing and Thawing)
2. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางเคมี (Chemical Deterioration) ได้แก่ การคาร์บอนเนชั่น (Carbonation) การกัดกร่อนโดยกรด (Acid Attack) การกัดกร่อนโดยซัลเฟต (Sulfate Attack) ปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม (Alkali-Aggregate Reaction)
3. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกล (Mechanical Deterioration) ได้แก่ การขัดสี (Abrasion) การชะล้างด้วยกระแสน้ำและกระแสน้ำกรวดทราย (Erosion) และการแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ (Cavitation)
4. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางชีวภาพ (Biological Deterioration) ได้แก่ การเสื่อมสภาพโดย ตะไคร้ รา รากพืช หรือแบคทีเรียบางประเภท
5. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุรวม (Mixed Process) ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็กเป็นต้น

คอนกรีตสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายสภาวะตามอายุของคอนกรีตดังต่อไปนี้

1. คอนกรีตสด (Concrete in Fresh State) หมายถึงคอนกรีตหลังการผสมแล้วจนถึงช่วงเสร็จสิ้นการเทคอนกรีตแล้ว

2. คอนกรีตในสถานะพลาสติก (Concrete in Plastic State) หมายถึงคอนกรีตหลังจากเสร็จสิ้นการเท จนถึงเวลาที่คอนกรีตก่อตัวขั้นสุดท้าย

3. คอนกรีตในสถานะอายุเริ่มต้น (Concrete in Early Age State) หมายถึงคอนกรีตช่วงการก่อตัวขั้นสุดท้ายจนถึงช่วงเวลาก่อนที่คอนกรีตจะพัฒนากำลังรับแรงได้ถึงค่ากำลังที่ออกแบบไว้

4. คอนกรีตในสถานะแข็งตัวแล้ว (Concrete in Hardened State) หมายถึง คอนกรีตหลังจากพัฒนากำลังได้ถึงหรือเกินค่าที่ออกแบบไปแล้ว

5. คอนกรีตในสถานะยาวนาน (Concrete in Long-Term State) หมายถึง คอนกรีตในสถานะแข็งตัวแล้วมีอายุเกินกว่าอายุที่ใช้ออกแบบกำลัง และต้องคงทนเป็นเวลายาวนานในสถานะแวดล้อม

ปัญหาของความคงทนในคอนกรีตส่วนใหญ่่มักจะเกิดกับคอนกรีตหลังจากสถานะแข็งตัวแล้ว นั่นคือ ในสถานะยาวนาน แต่อย่างไรก็ดี ปัญหาบางอย่างที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตในสถานะก่อนหน้าก็สามารถนำไปสู่ปัญหาในระยะยาวได้ ดังนั้น ในหนังสือเล่มนี้จะเริ่มจากการอธิบายปัญหาของคอนกรีตตั้งแต่ในสถานะเบื้องต้นไป จนถึงปัญหาของคอนกรีตที่เกิดขึ้นในระยะเวลาที่คอนกรีตแข็งตัวไปแล้วเป็นเวลายาวนาน

## 2.8.1 คอนกรีตในสถานะพลาสติก

### 2.8.1.1 รอยแตกร้าวที่เกิดจากการทรุดตัวของคอนกรีต (Settlement Crack)

รอยแตกร้าวชนิดนี้เกิดขึ้นจากการที่คอนกรีตมีการทรุดตัวที่แตกต่างกันในเนื้อคอนกรีตเอง หลังจากที่เทคอนกรีตแล้วและเทคอนกรีตยังอยู่ในสถานะพลาสติกอยู่ อันมีสาเหตุหลายประการเช่น

- มีสิ่งกีดขวางการทรุดตัวของคอนกรีต เช่น เหล็กเสริม
- ความหนาของโครงสร้างคอนกรีตในทิศทางทรุดตัว (แนวดิ่ง) แตกต่างกัน ทำให้ทรุดตัวไม่เท่ากัน
- ความเสียดทานระหว่างผนังแบบหล่อกับคอนกรีต ทำให้คอนกรีตบริเวณที่ติดกับผิวแบบหล่อทรุดตัวน้อยกว่าคอนกรีตบริเวณข้างใน

### 2.8.1.2 รอยแตกร้าวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage Crack)

รอยแตกร้าวชนิดนี้เกิดจากการที่คอนกรีตสูญเสียความชื้นไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยการระเหยของน้ำบริเวณผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับอากาศ ในช่วงหลังจากที่เทคอนกรีตเสร็จแล้วจนถึงช่วงที่คอนกรีตเริ่มก่อตัว ซึ่งคอนกรีตในช่วงพลาสติก (Concrete in Plastic State)



การสูญเสียความชื้นของคอนกรีตบริเวณผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับอากาศ จะทำให้ช่องว่างกะปิลลารี (Capillary Pores) บริเวณผิวที่สัมผัสอากาศสูญเสียความชื้นไป เกิดแรงดึงแบบกะปิลลารี (Capillary Tension) ขึ้นพร้อมๆกับการลดปริมาตรของคอนกรีตบริเวณที่แห้ง เมื่อแรงดึงนี้มีค่ามากกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตในช่วงพลาสติกซึ่งมีค่าต่ำมาก รอยแตกร้าวก็จะเกิดขึ้น สาเหตุและกลไกการหดตัวแบบพลาสติกและการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบพลาสติก จะมีความคล้ายคลึงกับการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) และการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage Crack) เพียงแต่การหดตัวแบบแห้งจะหมายถึงการหดตัวที่เกิดขึ้นหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว การหดตัวแบบพลาสติกจะรุนแรงในสภาพอากาศร้อน ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ และลมแรง การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติกมักจะเป็นแนวขนานกันมีความยาวประมาณ 0.1 ถึง 1 เมตร และมีความลึก 25 ถึง 50 มิลลิเมตร จากผลการศึกษาพบว่า การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติกจะเกิดขึ้นถ้าอัตราการระเหยมากกว่า 1 กก./ตร.ม./ชั่วโมง โดยประมาณ บริเวณที่มักเกิดการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบพลาสติก ได้แก่ ผิวบนของโครงสร้างคอนกรีตที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศมาก เช่น ผิวถนน ผิวของพื้นอาคารคอนกรีต เป็นต้น

## 2.8.2 คอนกรีตในสภาวะอายุเริ่มต้น

### 2.8.2.1 การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature Cracking)

การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิของคอนกรีตเป็นปัญหาสำคัญของงานคอนกรีตขนาดใหญ่ที่มีการเทคอนกรีตปริมาณมากๆในเวลาจำกัด ที่มักจะเรียกว่า งานคอนกรีตหลา (Mass Concrete) ซึ่งความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิในเนื้อคอนกรีตและอุณหภูมิบรรยากาศหรือมีโครงสร้างที่ต่อยึดอยู่กับคอนกรีตที่เทใหม่ทำให้เกิดการยัดรั้ง ซึ่งการยัดรั้งนี้อาจนำไปสู่การแตกร้าวได้ โดยเฉพาะในกรณีที่คอนกรีตยังอยู่ในช่วงอายุเริ่มต้น ซึ่งมีการพัฒนากำลังไม่เต็มที่ การแตกร้าวนี้จะมีผลต่อกำลังรับแรงในระยะยาวของคอนกรีตที่เท มีผลต่อความหนาแน่นของคอนกรีต (Tightness) และมีผลต่อเนื่องไปถึงความคงทนในระยะยาวด้วย โดยเฉพาะในกรณีที่โครงสร้างคอนกรีตนั้นอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง

การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (Hydration Reaction) เป็นปฏิกิริยาชนิดที่คายความร้อน (Exothermal Reaction) อีกทั้งคอนกรีตในสภาวะอายุเริ่มต้นมักมีการนำความร้อนที่ต่ำ ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดังกล่าวจึงสะสมอยู่ในคอนกรีต เนื่องจากไม่สามารถถ่ายเทความร้อนออกไปสู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าคอนกรีตเป็นไปอย่างรวดเร็ว และโครงสร้างคอนกรีตที่เทมีขนาดใหญ่และมีความหนามาก เมื่ออุณหภูมิของคอนกรีตเพิ่มขึ้นในระหว่างเกิดปฏิกิริยา ในช่วงที่คอนกรีตอยู่ใน



สภาวะพลาสติก คอนกรีตจะมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นต่ำมาก ดังนั้นหน่วยแรงจะยังไม่เกิดขึ้นในคอนกรีต トラブจนคอนกรีตเริ่มแข็งตัวความแตกต่างของอุณหภูมิในเนื้อคอนกรีตระหว่างบริเวณภายในและบริเวณผิวของคอนกรีตหรือโครงสร้างอื่นที่ยึดรั้งคอนกรีตนั้น จะทำให้เกิดการยัดรั้งและก่อให้เกิดหน่วยแรงดึงของคอนกรีตนั้น ก็จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวขึ้นได้

การแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากอุณหภูมินั้น สามารถเกิดได้ทั้งในช่วงที่อุณหภูมิภายในของคอนกรีตกำลังเพิ่มขึ้นหรือกำลังลดลง ยกเว้นในกรณีที่มีการยัดรั้งโดยภายนอก เช่น ในกรณีที่มีการยัดรั้งโดยคอนกรีตเดิมที่เทไปแล้วมักจะเกิดการแตกร้าวในช่วงที่คอนกรีตที่เทใหม่เย็นลง นอกเหนือไปจากนี้แล้ว การที่อุณหภูมิภายในของคอนกรีตสูงกว่าอุณหภูมิของบรรยากาศมาก ก็ยังสามารถนำไปสู่การแตกร้าวบริเวณผิวคอนกรีตเนื่องจากการแห้งได้อีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากผลต่างระหว่างอุณหภูมิของคอนกรีตและบรรยากาศมีผลต่อการระเหยของน้ำบริเวณผิวของคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเทคอนกรีตที่มีพื้นผิวกว้างและมีอัตราการระเหยน้ำสูงกว่า 0.5 กก./ตร.ม./ชั่วโมง โดยประมาณ โดยหลักการแล้วรอยแตกร้าวแบบนี้จะเกิดในบริเวณที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิต่อหน่วยมิตินมากที่สุด ดังนั้นส่วนมากจะเป็นบริเวณผิวหรือใกล้ผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับบรรยากาศ ซึ่งบางครั้งอาจจะมองไม่เห็นจากผิวภายนอกของคอนกรีตก็ได้ หรือในกรณีที่มีสาเหตุจากการยัดรั้งจากภายนอก ก็มักจะเกิดในบริเวณรอยต่อระหว่างโครงสร้างที่ยึดรั้งอยู่กับคอนกรีตที่เทใหม่นั้น โดยจะเกิดรอยแตกร้าวในคอนกรีตที่เทใหม่

#### 2.8.2.2 การหดตัวแบบออโตจีเนียส (Autogenous Shrinkage)

การหดตัวของคอนกรีตมักจะเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ การหดตัวของคอนกรีตมีหลายประเภทเกิดขึ้นในช่วงเวลาต่าง ๆ กัน และเกิดจากสาเหตุที่แตกต่างกันไป ชนิดของการหดตัวอาจสรุปได้เป็น 4 ชนิด ดังต่อไปนี้

1. การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Chemical Shrinkage หรือ Hydration Shrinkage)

2. การหดตัวแบบออโตจีเนียส (Autogenous Shrinkage)

3. การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)

4. การหดตัวเนื่องจากคาร์บอนเนชัน (Carbonation Shrinkage)

การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงก่อนการก่อตัวเป็นการหดตัวที่มักไม่ก่อให้เกิดผลเสียหายต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วและมักไม่ค่อยมีผลต่อปริมาตรโดยรวมของคอนกรีต เนื่องจากจะเกิดขึ้นมากในช่วงเวลาเริ่มแรกก่อนเวลาก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตมักจะสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้โดยไม่เกิดหน่วยแรงและลักษณะของการหดตัวจะเป็นการสร้างช่องว่างในเจล (Gel Pores) ของผลิตภัณฑ์ของไฮเดรชัน ซึ่งจะเป็นผลทางจุลภาค (Microscopic

Volume Reduction) จึงไม่ค่อยมีผลต่อปริมาตรของคอนกรีตโดยรวม ดังนั้นการหดตัวประเภทนี้ ในช่วงก่อนการก่อตัวของคอนกรีตจึงไม่ค่อยได้รับความสนใจมากนัก แต่ส่วนที่หดตัวหลังจาก คอนกรีตก่อตัวสุดท้ายแล้ว จะเป็นปัญหาและจะคิดรวมอยู่ในการหดตัวแบบออโตจีเนียส

การหดตัวอีก 3 แบบที่เหลือ เป็นการหดตัวชนิดที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ปริมาตรโดยรวมของคอนกรีตซึ่งจะนำไปสู่การแตกร้าวได้ถ้ามีการยึดรั้ง และจำเป็นต้องคำนึงถึงใน การออกแบบคอนกรีตให้คงทน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบออโตจีเนียสเป็นการหดตัวที่ส่วนหนึ่งเป็นการหดตัวเนื่องจาก ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Chemical Shrinkage) ที่เกิดหลังจากการก่อตัวขั้นสุดท้ายของคอนกรีตรวมกับ อีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากการสูญเสียน้ำในช่องกะปิลลารี (Capillary Pores) ในพาสต์ เนื่องจาก ความชื้นบางส่วนถูกใช้ไปในปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ ทำให้เกิด Capillary Suction นี้ วัสดุประสานในที่นี้หมายความรวมถึงปูนซีเมนต์และวัสดุปอชโซลานทั้งหลาย เช่น เถ้าลอย เถ้า ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และซิลิกาฟูม เป็นต้น การหดตัวแบบออโตจีเนียสแตกต่างจากการหดตัวแบบ แห้งตรงที่ไม่ได้มีการสูญเสียน้ำในคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อม แต่เป็นการสูญเสียน้ำที่ เพิ่มขึ้นในคอนกรีตเอง การหดตัวแบบออโตจีเนียสเกิดขึ้นทันทีหลังจากผสมเสร็จ แต่ในทางปฏิบัติ จะ มีผลต่อปริมาตรหลังจากที่เทคอนกรีตเสร็จแล้ว เนื่องจากการหดตัวในช่วงก่อนการเทคอนกรีตจะ ไม่มีผลต่อปริมาตรของโครงสร้างที่จะเท และจะมีผลในทางโครงสร้างหลังจากที่คอนกรีตก่อตัว แล้ว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อนการก่อตัวจะไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงในคอนกรีต ดังนั้น จึงนิยามวัดค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสโดยเริ่มต้นจากระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น

### 2.8.2.3 คอนกรีตในสภาวะแข็งตัวแล้ว

#### 2.8.2.3.1 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)

การหดตัวแบบแห้งเกิดจากการที่คอนกรีตอยู่ในสภาวะอากาศที่มีความชื้นต่ำ ทำให้คอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศสูญเสียน้ำ และเกิดการหดตัว โดยที่การหดตัวที่เกิดขึ้นนั้น บางส่วนไม่อาจกลับคืนสู่สภาพเดิมได้แม้ว่าจะทำให้คอนกรีตเปียกชื้นขึ้นมาใหม่

การหดตัวแบบแห้งและการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง มีกลไกการเกิด เช่นเดียวกับการเกิดรอยแตกแบบพลาสติก นั่นคือในคอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศ มีความชื้นต่ำกว่าความชื้นในช่องกะปิลลารี (Capillary Pores) มาก เนื่องจากการสูญเสียน้ำอิสระ (Free Water) ไปสู่อากาศได้ด้วยการระเหย ทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในช่องว่างกะปิลลารี ประกอบกับ ปริมาตรของคอนกรีตลดลง หรือหดตัวลงจากการสูญเสียน้ำ ถ้าการหดตัวนี้ถูกยึดรั้ง ไม่ว่าจะด้วย โครงสร้างที่มีอยู่รอบข้าง หรือด้วยเนื้อคอนกรีตภายในที่ไม่มีการสูญเสียน้ำ รอยแตกร้าวก็ อาจเกิดขึ้นได้ถ้าการยึดรั้งนี้ก่อให้เกิดหน่วยแรงยึดรั้งที่มีค่าสูงกว่ากำลังแรงดึงของคอนกรีตใน

ขณะนั้น การแตกร้าวที่เกิดจากการแตกร้าวแบบพลาสติก จะเกิดในช่วงที่คอนกรีตอยู่ในช่วงพลาสติก และสามารถแก้ไขได้ง่ายโดยการตกแต่งผิวคอนกรีตที่คอนกรีตจะแข็งตัว ส่วนการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งจะเกิดหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว ซึ่งไม่สามารถตกแต่งผิวใหม่ได้แล้ว

#### 2.8.2.3.2 ปฏิกริยาระหว่างด่างกับมวลรวม (Alkali-Aggregate Reaction)

ปฏิกริยาระหว่างด่างกับมวลรวมในคอนกรีตเกิดขึ้นระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนของธาตุโลหะ (Alkali Hydroxides) เช่น โซเดียม โปแตสเซียม หรือแม่แต่แคลเซียมที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ และละลายอยู่ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต (Pore Solution) กับแร่ธาตุบางชนิดในมวลรวมที่สามารถทำปฏิกริยากับด่างได้เกิดเป็นเจล (Gel) ซึ่งจะมีการขยายตัวทำให้เกิดรอยแตกร้าวรอบๆมวลรวมได้ ปฏิกริยาระหว่างด่างกับมวลรวมสามารถแบ่งแยกได้เป็น 3 ชนิดหลักๆดังต่อไปนี้คือ

1. Alkali-Silica Reaction
2. Alkali-Silicate Reaction
3. Alkali-Carbonate Reaction

Alkali-Silica Reaction เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนของธาตุโลหะในซีเมนต์เพสต์กับซิลิกา (Silica) หลายรูปแบบ (ทั้ง Crystalline และ Amorphous) ซึ่งมีอยู่ในมวลรวมหลายประเภท โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรวดและทราย

Alkali-Silicate Reaction เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนของธาตุโลหะในซีเมนต์เพสต์กับแร่ซิลิกา (Silicate) ซึ่งมักมีลักษณะเป็นชั้นอยู่ในเนื้อมวลรวม Alkali Silicate Reaction นี้จะมีลักษณะของการเกิดปฏิกริยาคลายคลึงกันกับ Alkali Silica Reaction ผลผลิตของปฏิกริยาก็คล้ายคลึงกันด้วย นั่นคือ จะได้ (Silicate Gel) ที่มักมีสีใส แต่อาจเปลี่ยนเป็นสีขาวขุ่นได้ถ้าทำปฏิกริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ และเปลี่ยนเป็นสีคล้ำถ้าสกปรก โดยปกติแล้วปฏิกริยา Alkali Silicate Reaction จะดำเนินไปได้ช้ากว่า Alkali Silica Reaction และเนื่องจากลักษณะของปฏิกริยามีลักษณะคล้ายคลึงกับปฏิกริยา Alkali Silica Reaction ในบางกรณีจึงนิยมจัดทั้ง 2 ประเภทให้เป็น Alkali Aggregate Reaction (AAR) ชนิดเดียวกัน โดยเรียกรวมกันเป็น Alkali Silica Reaction ปฏิกริยา Alkali Silicate Reaction มักจะเกิดขึ้นกับมวลรวมประเภท Greywacke, Phyllite และ Argillite เป็นต้น

Alkali-Carbonate Reaction เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนของธาตุโลหะในซีเมนต์เพสต์กับแร่คาร์บอเนตในมวลรวมบางประเภท เช่น Argillaceous (Clayey) Dolomitic limestone ที่มีผลึก Dolomitic limestone ที่มีผลึก Dolomite ขนาดเฉลี่ย

ประมาณ 50  $\mu\text{m}$  แทรกอยู่ในโครงสร้างของ Calcite และแร่ดินเหนียว (Clay Minerals) แต่ปฏิกิริยาชนิดนี้จะพบไม่บ่อยมากนักเนื่องจากปัญหา Alkali Aggregate Reaction ส่วนใหญ่เป็นปัญหาเรื่อง Alkali Silica Reaction ในเนื้อหาต่อจากนี้ไปจะเน้นเฉพาะปัญหา Alkali Silica Reaction เท่านั้น

การทำปฏิกิริยาระหว่างด่างและซิลิกาในมวลรวมจะเกิดขึ้นเมื่อมีน้ำอยู่ด้วย ดังนั้นในคอนกรีตที่แห้งสนิทมักจะไม่มีปัญหาปฏิกิริยาดังกล่าว ปฏิกิริยานี้เมื่อดำเนินไปจะเกิด Alkali Silica Gel จะบวมตัวเมื่อดูดน้ำลักษณะของ Gel มักจะมีสีใส มีความชื้นคล้ายๆ กาว Gel เหล่านี้เมื่อสัมผัสอากาศภายนอกจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นคาร์บอเนต และกลายเป็นสีขาวขุ่นพร้อมกับเกิดการหดตัวและมีรอยแตกเกิดขึ้นเนื่องจากการหดตัวบริเวณผิวที่สัมผัสอากาศ ส่วนภายในคอนกรีต ก็จะทำให้เกิดความดันขึ้นภายในคอนกรีต ซึ่งอาจจะทำให้คอนกรีตแตกร้าวที่บริเวณภายในได้เช่นเดียวกัน

ความเสียหายที่เกิดจาก AAR นั้นทำให้ผิวคอนกรีตแตกเสียหาย ส่วนมากเป็นการแตกร้าวที่มีรูปแบบไม่แน่นอน (Map Cracking) ทำให้ความชื้น น้ำ สารเคมีอื่นๆ เช่น ซัลเฟต และคลอไรด์ สามารถผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ ทำให้เกิดผลกระทบกับความทนทานของคอนกรีต ในสถานการณ์ที่มีปริมาณด่างและ Reactive Silica น้อยในคอนกรีต และถ้าในคอนกรีตมีความพรุนมาก Gel ที่เกิดขึ้นก็จะไม่สามารถเติมช่องว่างในคอนกรีตให้เต็มได้ ทำให้การขยายตัวไม่เป็นผลให้เกิดการแตกร้าว ตัวอย่างของคอนกรีตในสถานการณ์นี้ คือ คอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำ หรือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบาที่มีรูพรุนมาก หรือคอนกรีตที่มีการกักกระจายฟองอากาศ

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชโลธร ศิริภัทรประวัตติ, 2552 ศึกษาวิจัยเรื่อง อิทธิพลของเปลือกหอยบดต่อคุณสมบัติของปูนฉาบ โดยการใช้เปลือกหอยบด 4 ชนิด คือ เปลือกหอยลายบด เปลือกหอยแมลงภู่มบด เปลือกหอยนางรมบด และเปลือกหอยแครงบด เป็นส่วนผสมทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตปูนฉาบ ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มร้อยละการแทนที่เปลือกหอยบดทั้ง 4 ชนิด ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดต่ำลงเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม

Ballester et al., 2007 ศึกษาเปลือกหอยแมลงภู่ม โดยใช้เป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีต และได้ทดสอบในเรื่องของกำลังรับแรงอัดและการนำความร้อนของคอนกรีตผสมเปลือกหอยแมลงภู่มบด ผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เปลือกหอยแมลงภู่มบดทดแทนหินนั้น ไม่มีประสิทธิภาพทางด้านโครงสร้างและไม่ผ่านมาตรฐาน NZS 3108-1983 ของประเทศนิวซีแลนด์



Barnaby, 2004 ศึกษาโดยการนำเปลือกหอยแมลงภู เป็นส่วนผสมในการผลิตมอร์ตาร์ โดยการใช้เปลือกหอยแมลงภูบดมาทดแทนในส่วนของฝุ่นหินปูนที่ได้มาจากเหมืองหิน โดยใช้ทดแทนในอัตราส่วนร้อยละ 0 4 8 และ 12 โดยส่วนของอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย คือ 1:7.8 จากผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเปลือกหอยแมลงภูบดร้อยละ 12 ที่อายุการบ่ม 90 วัน มีกำลังอัดและกำลังดึงสูงที่สุด

Falade, 1995 ศึกษาโดยนำเปลือกหอยขมบด บางส่วนหรือทั้งหมดเป็นส่วนผสมของมวลรวมในคอนกรีต โดยกำหนดส่วนผสมมาตรฐานของปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินและเปลือกหอยขมบดออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้ 1:1½:3 1:2:4 และ 1:3:6 โดยผลการทดสอบพบว่า กำลังการรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เปลือกหอยขมแทนที่หินทั้งหมด ที่อายุ 28 วัน ของส่วนผสม 1:3½:1 และ 1:4½:1½ เท่ากับ 15.65 และ 11.77 N/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ

hazurina et al, 2013 ศึกษาเกี่ยวกับเปลือกหอยแครงเป็นวัสดุสำหรับการทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีต โดยตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอยแครงและเปลือกโดยใช้การวิเคราะห์ XRF และการสังเกตของโครงสร้างอนุภาคด้วย SEM โดยทดแทนปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 5%, 10%, 15%, 25% และ 50% ที่อายุการบ่ม 7, 28, 90 และ 120 วัน ผลการทดลองพบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเปลือกหอยแครงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม

Monita et al, 2015 ศึกษาผงเปลือกหอยแครงเผาอบ ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เป็นวัสดุสำหรับการทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีต โดยทดแทนปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 2%, 4%, 6%, และ 8% ผลการทดลองพบว่าคอนกรีตผสมหอยแครงเผาอบ สามารถต้านทานแรงดึงและแรงคดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม

Yang, Yi & Leem, 2005 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเปลือกหอยนางรมมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้าง โดยศึกษาลักษณะทางเคมีและทางกลของเปลือกหอยนางรมบด พบว่า การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:5 และ 1:10 เมื่ออัตราส่วนการใช้เปลือกหอยนางรมบดแทนที่ทรายที่มากกว่าร้อยละ 20 และ 40 ตามลำดับ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อผสมที่ปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 40 ของการแทนที่ทรายพบว่า ไม่มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญในกำลังรับแรงอัด บ่งบอกถึงความสามารถของการนำกลับมาใช้ใหม่ในวัสดุก่อสร้างได้

Yoon et al, 2003 ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของเปลือกหอยนางรมบดโดยการทดแทนมวลรวมในมอร์ตาร์ จากผลการทดสอบพบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในรูปผลึกของแคลไซต์เป็นส่วนประกอบหลักของเปลือกหอยนางรม มีลักษณะรูปร่างแบนและกลม มีความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.38 - 2.41



Yoon, Park & Lee, 2004 ศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตสด และคอนกรีตที่แข็งตัว โดยมีตัวแปรได้แก่ ค่าโมดูลัสความละเอียด และอัตราการแทนที่ทรายด้วยเปลือกหอยนางรมบด ผลการทดสอบพบว่าไม่มีปฏิริยาระหว่างเปลือกหอยนางรมบดกับซีเมนต์เฟสท์เกิดขึ้น ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตลดลงเมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดลดลงและอัตราการแทนที่ทรายด้วยเปลือกหอยนางรมบดเพิ่มขึ้น รวมทั้งยังพบว่าการผสมเปลือกหอยนางรมบดไม่ได้เป็นสาเหตุของการลดลงของกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และการพัฒนากำลังอัดเร็วขึ้นเมื่ออัตราการแทนที่ทรายด้วยเปลือกหอยนางรมบดเพิ่มขึ้น และสัมพันธ์กับความยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง เมื่ออัตราการแทนที่ของเปลือกหอยนางรมบดเพิ่มขึ้น โดยลดลงประมาณร้อยละ 10 เมื่ออัตราการแทนที่เท่ากับร้อยละ 20



### บทที่ 3

#### วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

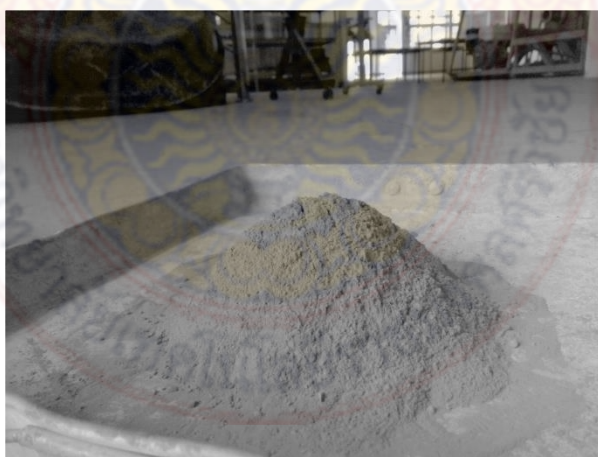
การศึกษาอิทธิพลของเปลือกหอยนางรมบดที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังอัดและการหดตัวแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ บทนี้จะกล่าวถึง รายละเอียดในการดำเนินงานวิจัยซึ่งครอบคลุมไปถึงวัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ วิธีดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

- 3.1 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ
- 3.2 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย
- 3.3 กำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
- 3.4 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ (Cement) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.15 และมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.15



ภาพที่ 3-1 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2. ผงเปลือกหอยนางรมบด (Grushed Oyster Shell Powder) ผงเปลือกหอยนางรมบดที่ใช้ในงานวิจัย มีสีบรอนซ์เทาเหมือนปูนซีเมนต์ ผลิตโดย บริษัท สยามเวิร์ม ออแกนิก วิสาหกิจ เพื่อสังคม จำกัด



ภาพที่ 3-2 ผงเปลือกหอยนางรมบด

3. น้ำผสมคอนกรีต (Water) ใช้ น้ำสะอาด ปราศจาก กรด ด่าง น้ำมัน และอินทรีย์สารอื่นๆ ใน ปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีต

### 3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. ตะแกรงร่อนมาตรฐาน
2. ชุดทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยวิธีของเบลน (Blaine Air Permeability)
3. เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์
4. ชุดทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ
5. ชุดอุปกรณ์เตรียมก้อนเพสต์
6. เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์
7. เครื่องทดสอบการซึมผ่านของอากาศแบบเบลน
8. เครื่องทดสอบระยะเวลาการก่อตัว
9. แบบหล่อก้อนตัวอย่าง ขนาด 50 x 50 x 50 mm
10. แบบหล่อก้อนตัวอย่าง ขนาด 25 x 25 x 285 mm.
11. เครื่องทดสอบวัฏระยะการยัดและหดตัว

12. เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Compression Testing Machine)
13. เครื่องวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมี วิธี X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)
14. เครื่องทดสอบองค์ประกอบทางเคมี วิธี X-Ray Diffractometer Analysis (XRD)
15. เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM)
16. เตาเผา (Furnace)

### 3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

#### 3.2.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

1. การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) โดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิแอร์ (Le Chatelier Flask) ตาม ASTM C 188 ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำ ที่มีปริมาตรเท่าวัสดุนั้น โดยปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุปอชโซลานหาได้จากการแทนที่ในน้ำมันก๊าด



ภาพที่ 3-3 ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิแอร์ (Le Chatelier Flask)

2) ความละเอียดแบบเบลน (Blaine air-permeability ) การทดสอบความละเอียดของเปลือกหอยนางรมบด โดยวิธีแอร์เพอร์มีเอบิลิตี้ของเบลน ตาม ASTM C 204 เป็นการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ



(Specific Surface Area) ด้วยการวัดระยะเวลาที่อากาศที่ไหลผ่านตัวอย่าง ซึ่งค่าที่ทดสอบได้มีหน่วยเป็นพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนัก ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

3) การถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยการนำผงตัวอย่างมาโรยบนแท่นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 ซม. ที่ติดแผ่นกาว 2 หน้า เตรียมไว้แล้ว โดยให้ผงตัวอย่างติดแผ่นกาวเป็นแผ่นบาง ๆ จากนั้นนำไปเป่าด้วยลมออกซิเจนเพื่อให้ผงตัวอย่างหลุดออกให้เหลือเพียงชั้นเดียว นำแท่นตัวอย่างไปอบด้วยแสงไฟเพื่อไล่ความชื้น แล้วนำแท่นตัวอย่างไปเคลือบด้วยอิมอนทองคำ หลังจากนั้นจึงนำไปถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM

4) การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) ของเปลือกหอยนางรมบดโดยการนำผงตัวอย่าง ทาลงบนเทปด้านที่เป็นกาวบนแผ่นเฟรมที่เตรียมไว้ ใช้ฟุ้งกันที่สะอาดเกลี่ยผงตัวอย่างให้ติดบนเทปเป็นชั้นบางอย่างสม่ำเสมอ ทำความสะอาดแผ่นตัวอย่างให้เรียบร้อย ตรวจสอบความสม่ำเสมอของแผ่นตัวอย่างใช้เทปกาวปิดทับตัวอย่าง เพื่อกันไม่ให้ผงหลุดออกจากแผ่นเฟรม จากนั้นนำไปทดสอบ ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)

5) การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ของผงเปลือกหอยนางรมบด

### 3.2.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์เพสต์

ชิ้นงานตัวอย่าง ผสมระหว่างผงเปลือกหอยนางรมบดกับซีเมนต์ โดยเลือกอัตราส่วนที่คาดว่าจะให้ผลการทดสอบดีที่สุด โดยนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 จำนวน 5 อัตราส่วนผสม คือร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30, 0.35 และ 0.40 โดยศึกษาคุณสมบัติทางกลของซีเมนต์เพสต์โดยเปรียบคุณสมบัติกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยใช้เป็นก้อนตัวอย่างสำหรับงานวิจัย



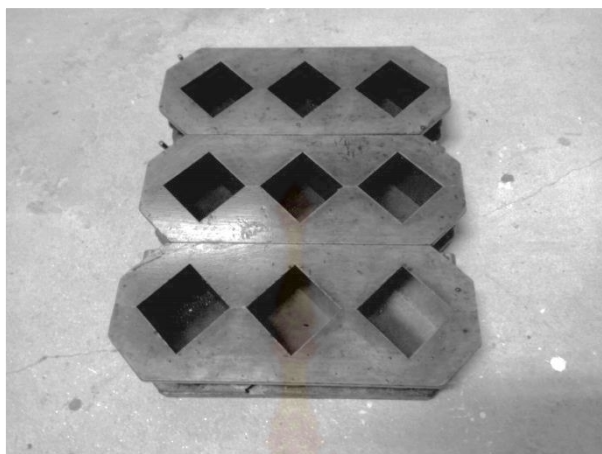
ภาพที่ 3-4 แสดงเครื่องผสมซีเมนต์เพสต์

1. การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว ทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวต้นและปลายตาม ASTM C191 โดยใช้ปริมาณน้ำที่พอเหมาะจากการทดสอบความชื้นเหลวปกติ ซึ่งการก่อตัวระยะต้นคือระยะเวลาที่การจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เป็นระยะ 25 มม. ในเวลา 30 วินาที และการก่อตัวระยะปลายคือระยะเวลาที่เพสต์แข็งตัวแล้วจนทำให้เข็มมาตรฐานไม่สามารถจมลงด้วยน้ำหนักของตัวเองได้



ภาพที่ 3-5 แสดงเครื่องทดสอบระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลาย

2. การทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ หล่อก้อนซีเมนต์เพสต์ขนาด 50x50x50 มม. โดยกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ทุกส่วนผสมจะทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30, 0.35 และ 0.40 ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นต่อกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 109 โดยมีอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ด้วยส่วนผสม ทั้ง 5 ส่วนผสม คือร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ( ปูนซีเมนต์ผสมผงเปลือกหอยนางรมบด ) ซึ่งผลของค่ากำลังอัดที่ได้จะเปรียบเทียบผลการทดสอบกับซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 3-6 แสดงแบบหล่อขึ้นซีเมนต์เพสต์ ขนาด 50x50x50 มม.



ภาพที่ 3-7 แสดงการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

3.การหดตัวแบบออโตจีเนียส (Autogenous Shrinkage) ตามมาตรฐาน ASTM : C490 โดยหล่อก้อนซีเมนต์เพสต์ขนาด ขนาด 25 x 25 x 285 มม. ทุกส่วนผสมจะทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30, 0.35 และ 0.40 โดยมีอัตราทดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ด้วยส่วนผสม ทั้ง 5 ส่วนผสม คือร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ผสมผงเปลือกหอยนางรมบด) ซึ่งผลของค่าการยึดหดตัวที่ได้จะเปรียบเทียบผลการทดสอบกับซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 3-8 แสดงแบบหล่อชิ้นซีเมนต์เพสต์ ขนาด 25x25x28.5 มม



ภาพที่ 3-9 เครื่องทดสอบค่าการยึด-หดตัว



### 3.3 กำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3-1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

CODE	สัญลักษณ์
<b>C100</b>	ซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว
<b>C90OSP10</b>	ซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 10 %
<b>C80OSP20</b>	ซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 20 %
<b>C70OSP30</b>	ซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 30 %
<b>C60OSP40</b>	ซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 40 %

ตารางที่ 3-2 แสดงอัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ผสมผงเปลือกหอยนางรมบดแทนที่ปูนซีเมนต์  
ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

ส่วนผสม	ร้อยละการแทนที่	
	Portland Cement Type I ( C )	Crushed Oyster Shell Powder ( OSP )
<b>C100</b>	100	0
<b>C90OSP10</b>	90	10
<b>C80OSP20</b>	80	20
<b>C70OSP30</b>	70	30
<b>C60OSP40</b>	60	40

หมายเหตุ : C หมายถึง ปูนซีเมนต์  
OSP หมายถึง ผงเปลือกหอยนางรมบด

### 3.4 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ

#### 3.4.1 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์พิเศษ ที่ใช้ในการทดสอบ

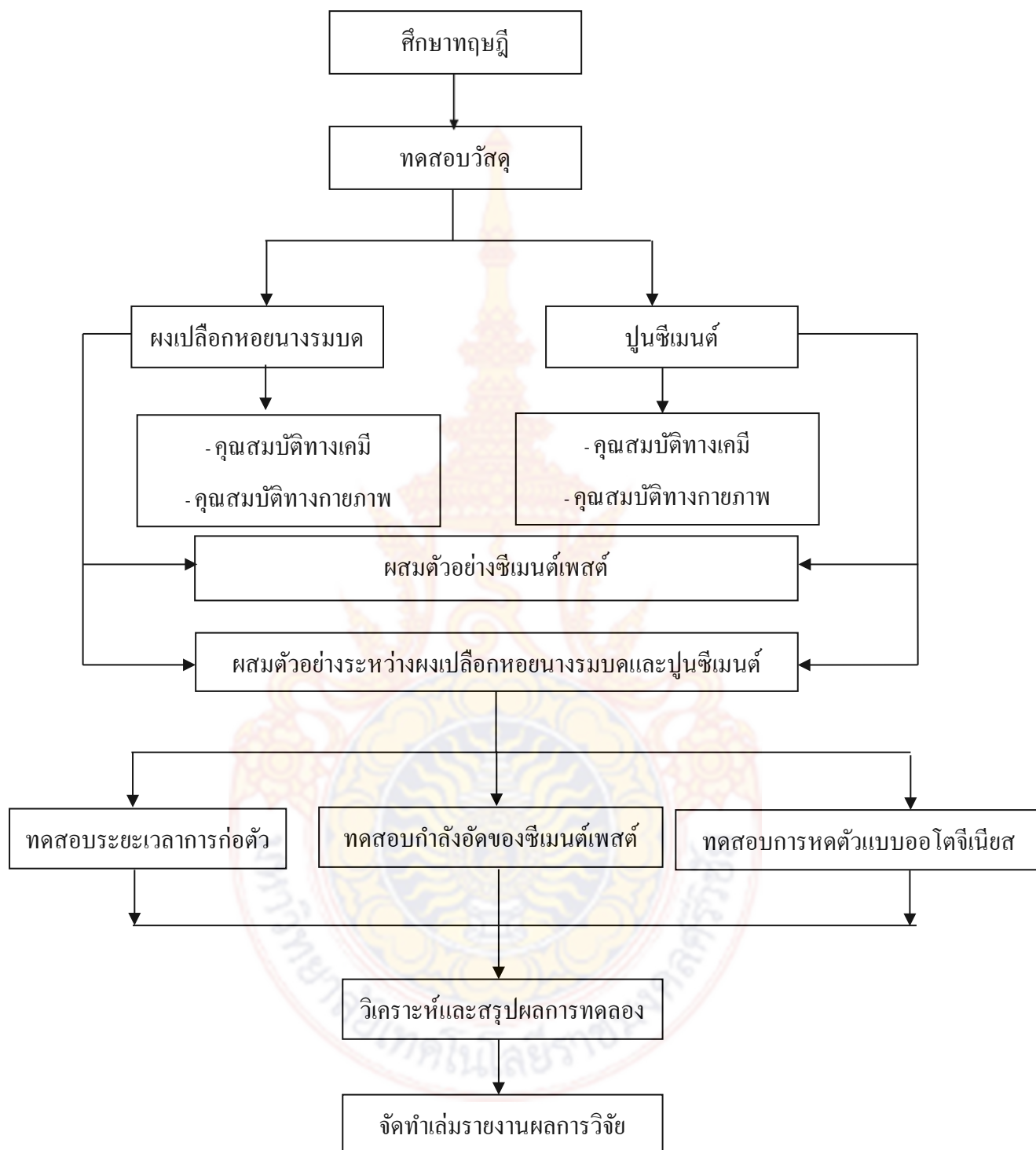
ตารางที่ 3-3 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์พิเศษ ที่ใช้ในการทดสอบ

สัญลักษณ์	อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุผง	สัดส่วนผสม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)			วิธีการทดสอบ/จำนวนตัวอย่าง	
		ปูนซีเมนต์	ผงเปลือกหอยนางรมบด	น้ำ	กำลังอัด	การหดตัว
C100	0.3	1,400	0	420	15	2
C90OSP10	0.3	1,260	140	420	15	2
C80OSP20	0.3	1,120	280	420	15	2
C70OSP30	0.3	980	420	420	15	2
C60OSP40	0.3	840	560	420	15	2
C100	0.35	1,400	0	490	15	2
C90OSP10	0.35	1,260	140	490	15	2
C80OSP20	0.35	1,120	280	490	15	2
C70OSP30	0.35	980	420	490	15	2
C60OSP40	0.35	840	560	490	15	2
C100	0.4	1,400	0	560	15	2
C90OSP10	0.4	1,260	140	560	15	2
C80OSP20	0.4	1,120	280	560	15	2
C70OSP30	0.4	980	420	560	15	2
C60OSP40	0.4	840	560	560	15	2

หมายเหตุ : C หมายถึง ปูนซีเมนต์

OSP หมายถึง ผงเปลือกหอยนางรมบด

ในออกแบบส่วนผสมนั้น จะทำการผสมระหว่างผงเปลือกหอยนางรมบดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยเลือกอัตราส่วนผสมที่คาดว่าจะได้ผลการทดสอบดีที่สุด โดยพิจารณาจากข้อมูลการทดลองเบื้องต้น โดยนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จำนวน 5 อัตราส่วนผสม คือร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30, 0.35 และ 0.40 โดยมีรายละเอียดส่วนผสมดังตารางที่ 3-3



ภาพที่ 3-10 ขั้นตอนการดำเนินงาน

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ผลการทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) โดยในการทดสอบได้เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (C100) ที่อายุการบ่มต่างๆรวมถึงการวิเคราะห์เพื่อหาความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุ

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) และผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP)

Sample	Specific gravity	Median particle size,	Blaine fineness
		$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
C	3.15	16.50	3,400
OSP	2.59	60.53	1,200

ผลการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพของผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (C) พบว่า OSP มีลักษณะเป็นผงละเอียด มีสีคล้ายคลึงกับ C คือสีเทาแต่มีสีอ่อนกว่าเล็กน้อยโดยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า C โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.59 ซึ่งค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ หรือความละเอียดของ OSP มีค่าเท่ากับ 1,200  $\text{cm}^2/\text{กรัม}$  ในส่วนของการทดสอบกระจายของอนุภาคของวัสดุโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser particle size analyzer) พบว่า C มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 16.50 ไมครอน และขนาดของอนุภาคของ OSP ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 60.53 ไมครอน ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า C โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าสามารถทำให้เกิดผลทางกายภาพด้านการอุดแทรกตัว (Filler Effect) ซึ่งจะเป็นผลดีต่อคุณสมบัติด้านกำลังอัดโดยเฉพาะในช่วงต้น (Early Age) แสดงในตารางที่ 4-1



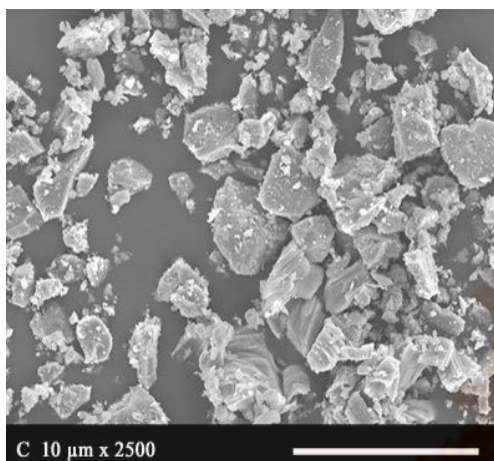
## 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

ตารางที่ 4-2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) และผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)

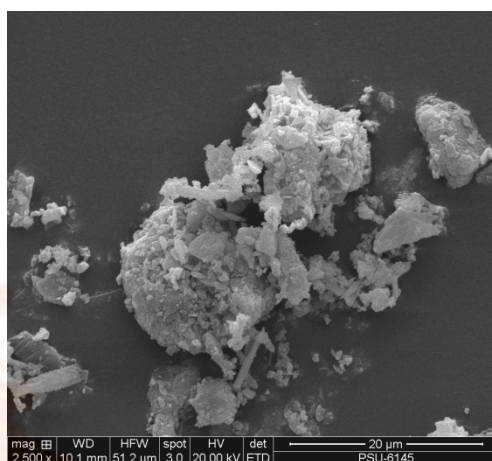
Chemical Composition (%)	C	OSP
Silicon Dioxide (SiO <sub>2</sub> )	20.80	4.31
Aluminum Oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.50	1.17
Ferric Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.16	0.40
Calcium Oxide (CaO)	64.97	48.85
Magnesium Oxide (MgO)	1.06	0.99
Potassium Oxide (K <sub>2</sub> O)	0.55	0.14
Sodium Oxide (Na <sub>2</sub> O)	0.08	0.87
Sulfur Trioxide (SO <sub>3</sub> )	2.96	0.62
Loss on ignition (L O I)	1.40	40.37

ผลการทดสอบ เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) และผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า (C) มีองค์ประกอบหลักคือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยมีปริมาณของ CaO เท่ากับ ร้อยละ 64.97 เปรียบเทียบกับปริมาณ CaO ของ ผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) โดยมีค่าร้อยละ 48.85 ซึ่งปริมาณ CaO ของ OSP มีค่าน้อยกว่า C ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติด้านกำลังอัด ส่วนองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) พบว่าใน C มี SiO<sub>2</sub> เป็นองค์ประกอบร้อยละ 20.80 ในขณะที่ OSP มี SiO<sub>2</sub> เป็นองค์ประกอบร้อยละ 4.31 อย่างไรก็ตาม OSP มีปริมาณค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (LOI) สูงถึงร้อยละ 40.37 ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเผา OSP จะเปลี่ยนวัตถุดิบจาก CaCO<sub>3</sub> ไปเป็น CaO และ CO<sub>2</sub> ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน ASTM C 150 ที่ค่า LOI ต้องไม่เกินร้อยละ 3 โดยอาจเป็นผลเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบค่อนข้างสูง โดยใช้เตาเผา (Furnace) ที่อุณหภูมิประมาณ 900-1000 °C ทำให้ผงเปลือกหอยนางรมบด ซึ่งอยู่ในรูปของ Ca(OH)<sub>2</sub> สลายตัวเป็น H<sub>2</sub>O และเกิดการระเหยกลายเป็นไอออกไป ซึ่งเมื่อเทียบกับมาตรฐาน ASTM C618 หมวด N โดยมีคุณสมบัติของวัสดุที่ไม่ได้มาตรฐานหลายประการ เช่น ผลรวมร้อยละต่ำสุดของซิลิกอนไดออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์และไอรอนออกไซด์ จากผลดังกล่าวจะส่งผลให้วัสดุมีความต้องการน้ำสูงขึ้น หรืออาจทำให้ความสามารถในการเทได้ลดลง

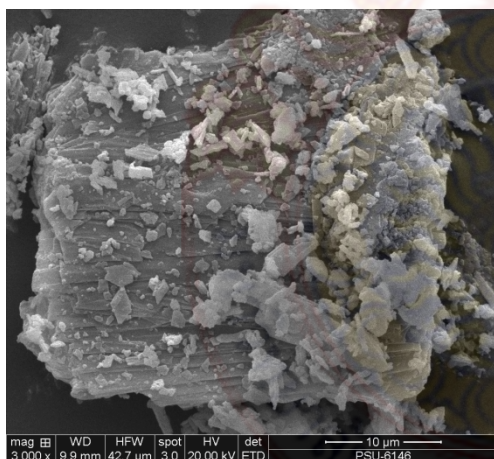
#### 4.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของวัสดุ



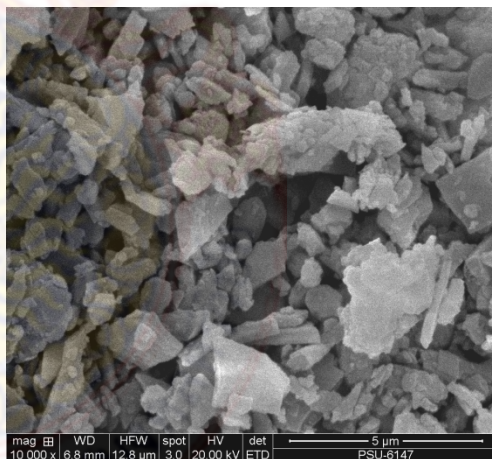
(a) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C)  
ที่กำลังขยาย 2500 เท่า



(b) ผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP)  
ที่กำลังขยาย 2500 เท่า



(c) ผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP)  
ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

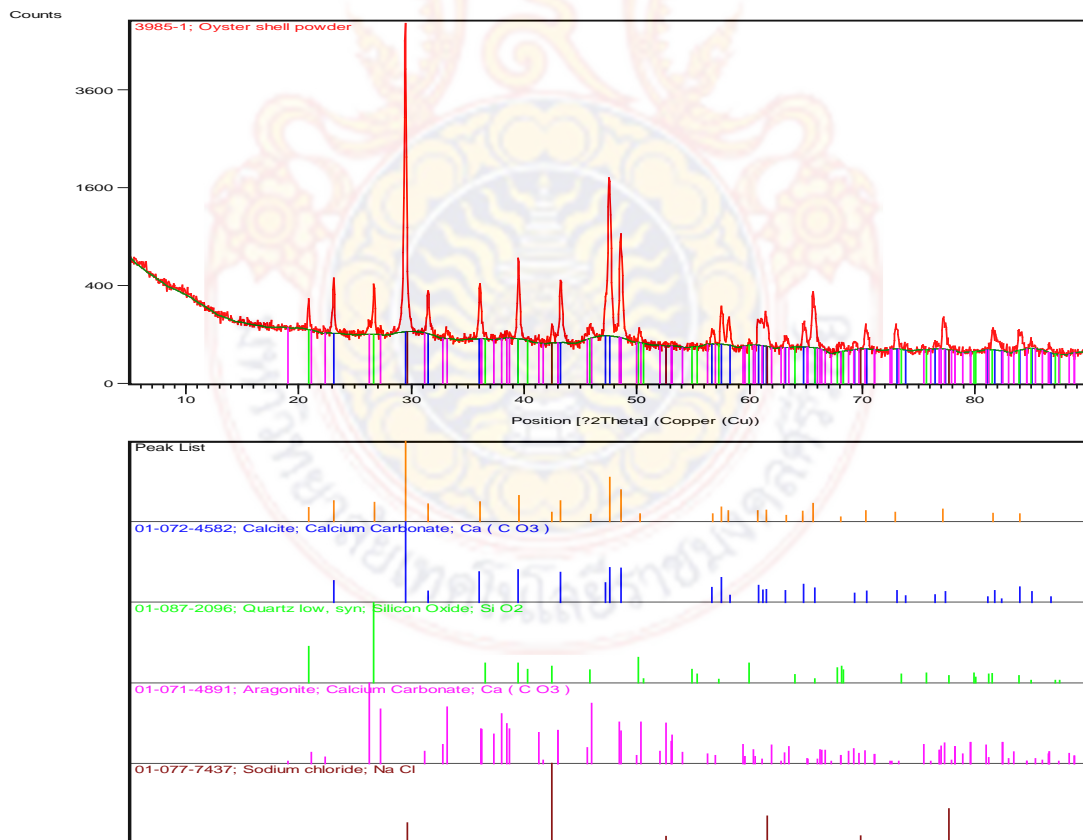


(d) ผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP)  
ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

ภาพที่ 4-1 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุ

จากภาพที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาค ของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) , ผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ผลการศึกษาลักษณะอนุภาคของ C ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า และ OSP ที่กำลังขยาย 2500, 3,000 และ 10,000 เท่า ซึ่งพบว่า OSP อนุภาคมีลักษณะพรุนและมีช่องว่างภายใน อาจเป็นเพราะขนาดของอนุภาคที่ไม่ละเอียดมากนัก โดยประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆเกาะกันเป็นกลุ่มอย่างหลวมๆ ซึ่งลักษณะของผิวอนุภาคดังกล่าวจะมีความสามารถในการกักเก็บน้ำ (Water Retainability) สูงกว่าซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของคอนกรีตสดหลายประการ โดยจะทำให้คอนกรีตมีความต้องการน้ำ (Water Consumption) มากขึ้น รวมถึงจะทำให้ความสามารถในการเทได้ลดลง แต่จะมีผลดีในการช่วยลดอัตราการเยิ้ม (Bleeding) ของน้ำอิสระ (Free Water) (สรารูช, 2552) เมื่อเปรียบเทียบกับ C ซึ่งมีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ต้นไม่มีรูพรุนพื้นที่ผิวขรุขระมากกว่า เพราะมีความละเอียดสูงกว่า ส่งผลให้ความสามารถในการลดช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ได้ดี ซึ่งจะมีผลต่อค่าการรับกำลังอัดในช่วงระยะอายุน้อยกว่า 7 วัน

#### 4.4 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบความเป็นผลึกด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer ของวัสดุ



ภาพที่ 4-2 แสดงผลการวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction ของผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP)

โดยทั่วไปสถานะของสสารประกอบด้วยสถานะสองสถานะด้วยกันคือสถานะผลึก (Crystalline) ซึ่งมีความเหนียวและความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ต่ำเนื่องจากโครงสร้างจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและอีกสถานะหนึ่งคือ สถานะอสัณฐาน (Amorphous) เป็นสถานะที่มีแนวโน้มที่จะสามารถทำปฏิกิริยาได้ สสารที่อยู่ในสถานะอสัณฐาน (Amorphous) นี้จึงเป็นค่าที่บ่งบอกว่า สสารมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้เนื่องจากความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้าง ซึ่งจะสามารถตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอกซเรย์ ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD)

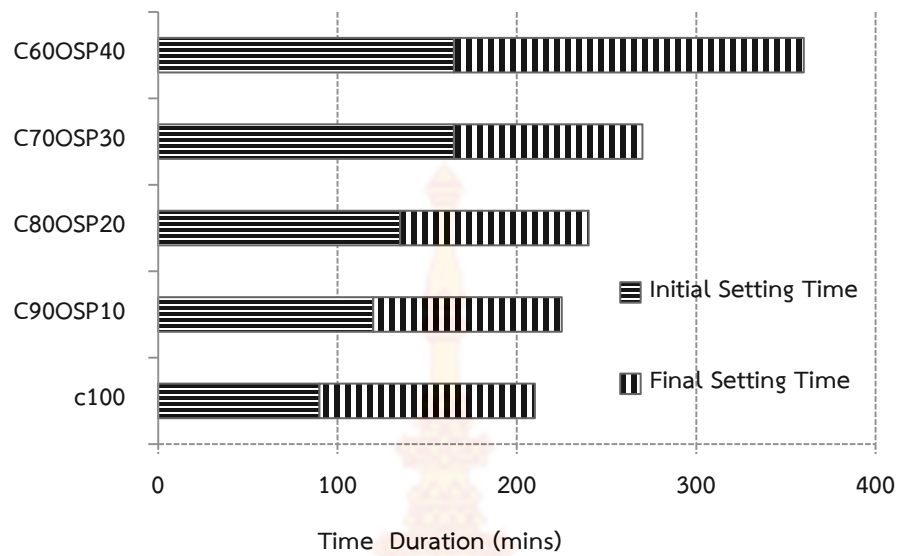
ภาพที่ 4-2 แสดงผลจากการวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอกซเรย์ ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) พบว่า OSP มีองค์ประกอบหลักคือ Calcium Carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) และองค์ประกอบรองคือ Silicon Oxide ( $\text{SiO}_2$ ) ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก พบว่ามีสถานะเป็นผลึก Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) และ Quartz ( $\text{SiO}_2$ ) โดยจุดยอด (Peak Intensity) จะปรากฏ แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ที่มุม  $2\text{-Theta}$  เท่ากับ 29.469 ซึ่งโครงสร้างที่มีความเป็นผลึกมากจะทำให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นผลึกจะมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งในการสลายพันธะต้องใช้พลังงานมาก ดังนั้นปฏิกิริยาจึงเกิดได้ยากขึ้น อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่า OSP มีองค์ประกอบที่เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ซึ่งจะทำให้มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตด้านความคงทนระยะยาวโดยเฉพาะหากเมื่อสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่เป็นสารละลายซัลเฟตหรือคลอไรด์โดยจะมีผลทำให้ความต้านทานต่อสารเคมีดังกล่าวลดลงด้วย (สรารุช, 2552)

#### 4.5 ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ของซีเมนต์เพสต์

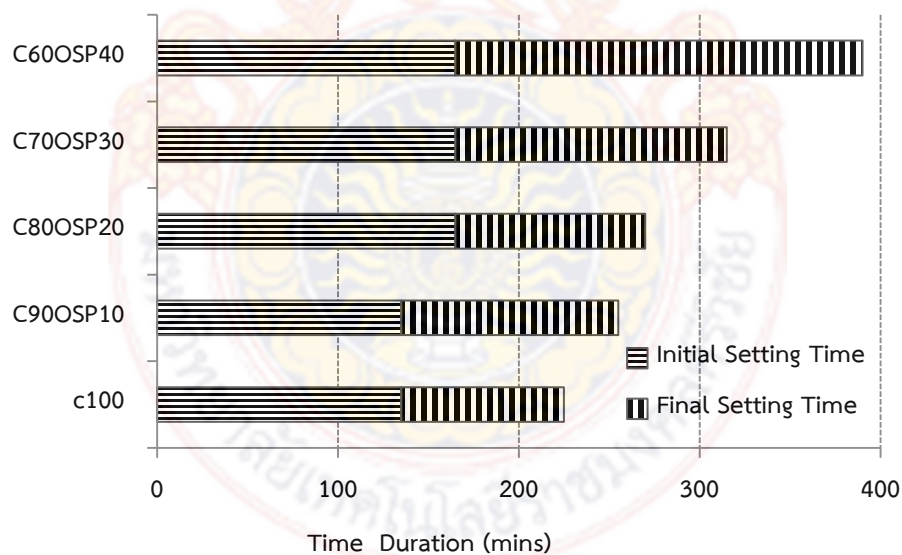
ตารางที่ 4-3 แสดงอัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ผสมผงเปลือกหอยนางรมบดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ส่วนผสม	ร้อยละการแทนที่	
	Portland Cement Type I ( C )	Crushed Oyster shell Powder (OSP)
C100	100	0
C90OSP10	90	10
C80OSP20	80	20
C70OSP30	70	30
C60OSP40	60	40

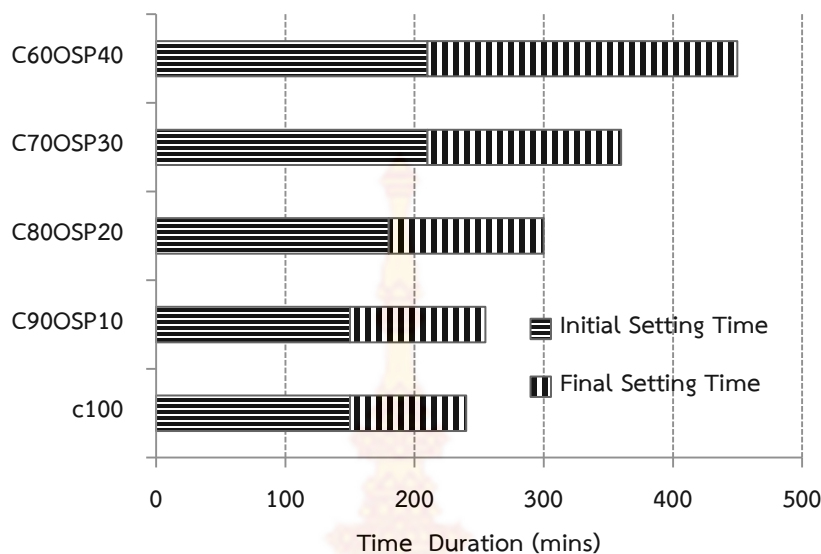




ภาพที่ 4-3 แสดงระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย ของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) ซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30



ภาพที่ 4-4 แสดงระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย ของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) ซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35



ภาพที่ 4-5 แสดงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) ซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ด้วยชุดทดสอบไวเคทตามมาตรฐาน ASTM C191 - 08 ของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C100) ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยแสดงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย โดยซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C100) มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) เท่ากับ 90 นาที ส่วนเวลาการก่อตัวระยะสุดท้าย (Final Setting Time) เท่ากับ 195 นาที ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป ที่มีการก่อตัวระยะเริ่มต้นภายใน 60-240 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายภายใน 180 - 360 นาที สำหรับซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่ร้อยละ 10, 20, 30 และร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่ามีระยะเวลาการก่อตัวในระยะต้นตั้งแต่ 135 - 210 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายตั้งแต่ 225 - 450 นาที ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าการนำผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนนั้น ทำให้การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ใช้เวลาเพิ่มมากขึ้น อาจเพราะช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์นั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแทนที่ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) อาจจะมีขนาดเล็กน้อยกว่าปูนซีเมนต์ และการดูดซึมน้ำได้ช้า เนื่องจาก OSP มีความชื้นอยู่แล้ว จึงส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกเป็นไปได้ยาก เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อาจเพราะผงเปลือกหอยนางรมบดมีความชื้นอยู่แล้ว ส่งผลต่ออัตราการเกิด

ปฏิกิริยาในช่วงแรกของปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าขึ้น แนวโน้มของระยะการก่อตัวเริ่มต้นและระยะการก่อตัวสุดท้าย จึงใช้เวลานาน เพิ่มเมื่อทำการเพิ่มร้อยละการแทนที่ 10, 20, 30 และร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ

#### 4.6 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์พิเศษ ที่ใช้ในการทดสอบ

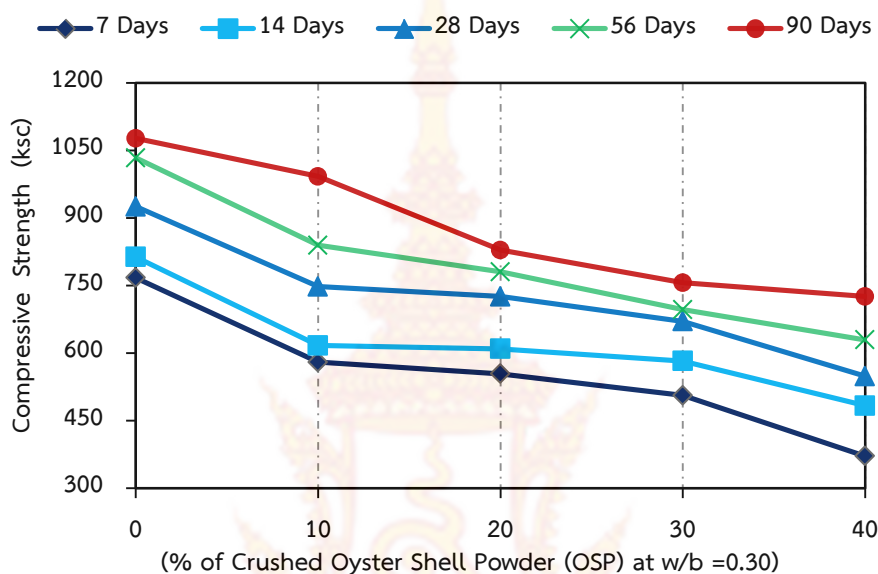
ในการออกแบบส่วนผสมนั้น จะทำการผสมระหว่างผงเปลือกหอยนางรมบดกับซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยเลือกอัตราส่วนผสมที่คาดว่าจะให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากข้อมูลของการทดลองเบื้องต้น โดยนำมาทดแทนปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 จำนวน 5 อัตราส่วนผสม คือร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.30, 0.35 และ 0.40 โดยมีรายละเอียดส่วนผสมดังตาราง ที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 อัตราส่วนผสมและจำนวนของตัวอย่างซีเมนต์พิเศษ ที่ใช้ในการทดสอบ

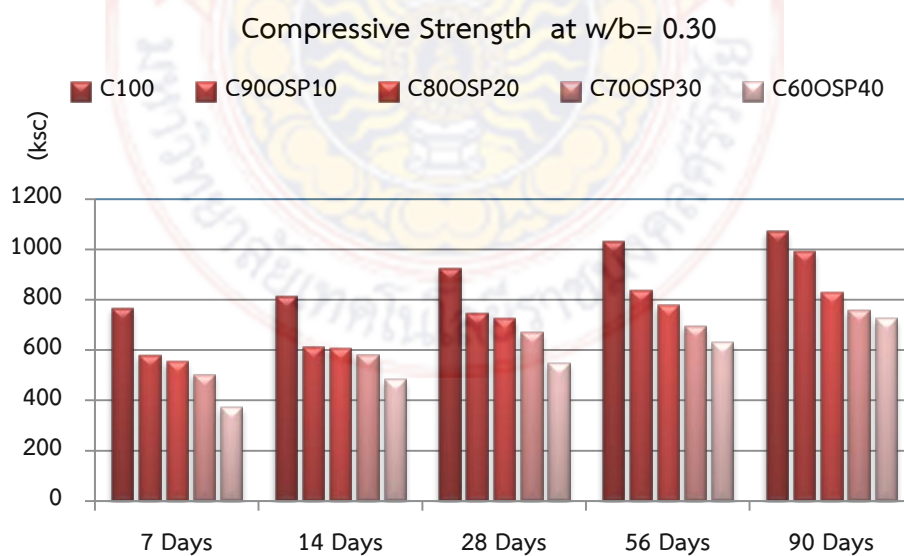
สัญลักษณ์	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง	สัดส่วนผสม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)			วิธีการทดสอบ/จำนวนตัวอย่าง	
		ปูนซีเมนต์ (Kg.)	ผงเปลือกหอยนางรมบด (Kg.)	น้ำ (Kg.)	กำลังอัด	การหดตัว
C100	0.3	1,400	0	420	15	2
C90OSP10	0.3	1,260	140	420	15	2
C80OSP20	0.3	1,120	280	420	15	2
C70OSP30	0.3	980	420	420	15	2
C60OSP40	0.3	840	560	420	15	2
C100	0.35	1,400	0	490	15	2
C90OSP10	0.35	1,260	140	490	15	2
C80OSP20	0.35	1,120	280	490	15	2
C70OSP30	0.35	980	420	490	15	2
C60OSP40	0.35	840	560	490	15	2
C100	0.4	1,400	0	560	15	2
C90OSP10	0.4	1,260	140	560	15	2
C80OSP20	0.4	1,120	280	560	15	2
C70OSP30	0.4	980	420	560	15	2
C60OSP40	0.4	840	560	560	15	2

#### 4.7 อิทธิพลของผงเปลือกหอยนางรมบด Crushed Oyster shell Powder (OSP) ที่มีผลต่อค่ากำลังอัด ของซีเมนต์เพสต์

4.4.1 อิทธิพลของผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่มีผลต่อค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ เปรียบเทียบที่ปริมาณร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ของวัสดุผง โดย  $w/b = 0.30$



ภาพที่ 4-6 แสดงกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ผสมผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) เปรียบเทียบปริมาณ ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ของวัสดุผง โดย  $w/b = 0.30$



ภาพที่ 4-7 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30



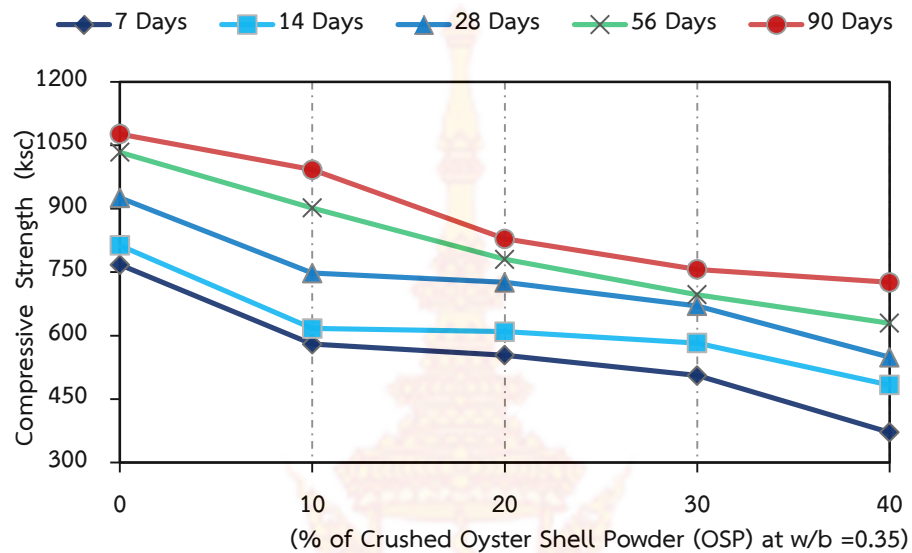
ตารางที่ 4-5 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด กับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30

Symbol	Compressive Strength (ksc) - % of C100 Compressive Strength (%)									
	7 Days		14 Days		28 Days		56 Days		90 Days	
<b>C100</b>	767	100	813	100	925	100	1,033	100	1,077	100
<b>C90OSP10</b>	580	76	617	76	748	81	902	87	992	92
<b>C80OSP20</b>	554	72	609	75	726	78	780	76	829	77
<b>C70OSP30</b>	506	66	582	72	670	72	697	67	756	70
<b>C60OSP40</b>	371	48	483	59	549	59	629	61	726	67

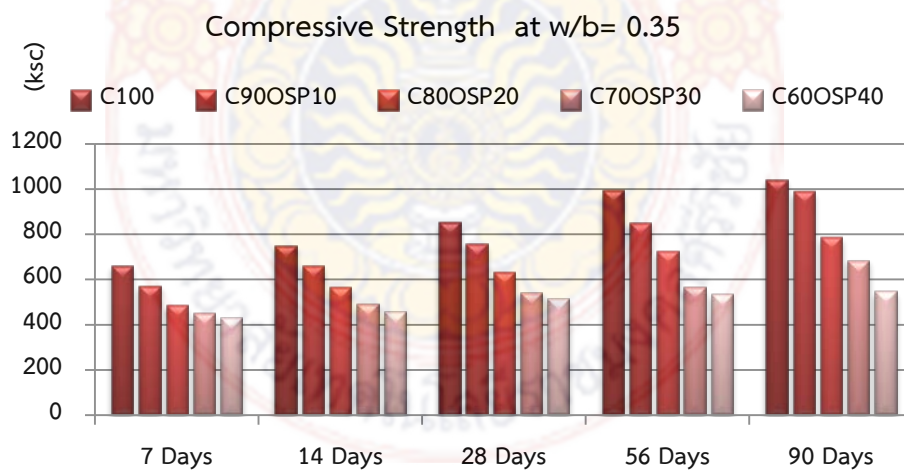
หมายเหตุ : ตัวเลขในคอลัมน์แรกคือ ค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ คอลัมน์ที่สองคือ อัตราส่วนของกำลังอัดเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (C100)

ภาพที่ 4-6 – 4-7 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30 พบว่ามีลักษณะการพัฒนาค่ากำลังอัดลดลง ซึ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่ร้อยละ 30 - 40 นั้น มีแนวโน้มที่ได้ค่ากำลังอัดที่ลดลงมาก ส่วนการแทนที่ ที่ร้อยละ 10 และ 20 นั้นมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงและน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30 ซีเมนต์เพสต์ (C90OSP10) และ (C80OSP20) ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 580, 617, 748, 902, 992 ksc และ 554, 609, 726, 780, 829 ksc ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 76, 76, 81, 81, 92 และ 72, 75, 78, 76, 77 ของซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ตามลำดับดังตารางที่ 4-5

4.4.2 อิทธิพลของผงเปลือกหอยนางรมบด Crushed Oyster shell Powder (OSP) ที่มีผลต่อค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ เปรียบเทียบที่ปริมาณร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ของวัสดุผง โดย  $w/b = 0.35$



ภาพที่ 4-8 แสดงกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ผสมผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) เปรียบเทียบปริมาณร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ของวัสดุผง โดย  $w/b = 0.35$



ภาพที่ 4-9 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35

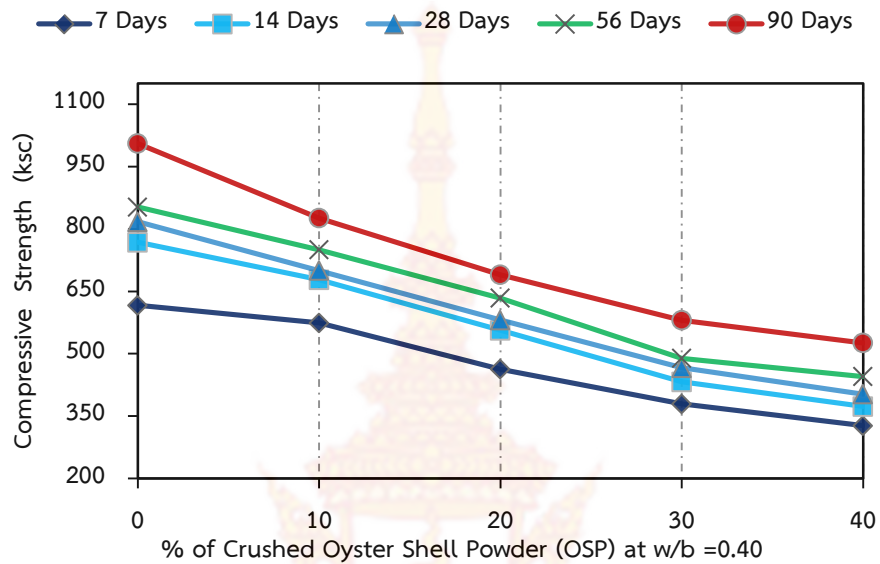
ตารางที่ 4-6 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด กับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35

Symbol	Compressive Strength (ksc) - % of C100 Compressive Strength (%)									
	7 Days		14 Days		28 Days		56 Days		90 Days	
C100	664	100	750	100	854	100	995	100	1,043	100
C90OSP10	571	86	665	89	761	89	852	86	990	95
C80OSP20	485	73	566	76	632	74	725	73	786	73
C70OSP30	451	68	492	66	545	64	564	57	687	64
C60OSP40	431	65	460	61	517	60	535	54	549	51

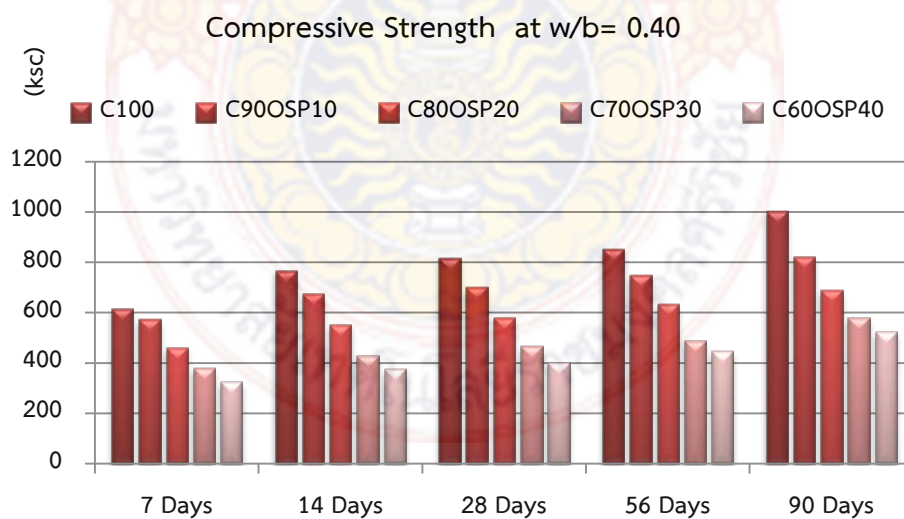
หมายเหตุ : ตัวเลขในคอลัมน์แรกคือ ค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ คอลัมน์ที่สองคือ อัตราส่วนของกำลังอัดเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (C100)

ภาพที่ 4-8 – 4-9 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35 พบว่ามีลักษณะการพัฒนาค่ากำลังอัดลดลง ซึ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่ร้อยละ 30 - 40 นั้น มีแนวโน้มที่ได้ค่ากำลังอัดที่ลดลงมาก ส่วนการแทนที่ ที่ร้อยละ 10 และ 20 นั้นมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงและน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35 ซีเมนต์เพสต์ (C90OSP10) และ(C80OSP20) ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 571, 665, 761, 852, 990 ksc และ 485, 566, 632, 725, 786 ksc ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 86, 89, 89, 86, 95 และ 73, 76, 74, 73, 73 ของซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ตามลำดับดังตารางที่ 4-6

4.4.3 อิทธิพลของผงเปลือกหอยนางรมบด Crushed Oyster shell Powder (OSP) ที่มีผลต่อค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ เปรียบเทียบที่ปริมาณร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ของวัสดุผง โดย  $w/b = 0.40$



ภาพที่ 4-10 แสดงกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ผสมผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) เปรียบเทียบปริมาณ ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ของวัสดุผง โดย  $w/b = 0.40$



ภาพที่ 4-11 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40



ตารางที่ 4-7 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด กับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40

Symbol	Compressive Strength (ksc) - % of C100 Compressive Strength (%)									
	7 Days		14 Days		28 Days		56 Days		90 Days	
<b>C100</b>	616	100	768	100	817	100	853	100	1,005	100
<b>C90OSP10</b>	574	93	678	88	700	86	750	88	826	77
<b>C80OSP20</b>	463	75	556	72	581	71	634	74	690	64
<b>C70OSP30</b>	379	62	433	56	466	57	490	57	581	54
<b>C60OSP40</b>	327	53	373	49	403	49	445	52	526	49

หมายเหตุ : ตัวเลขในคอลัมน์แรกคือ ค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ คอลัมน์ที่สองคือ อัตราส่วนของกำลังอัดเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (C100)

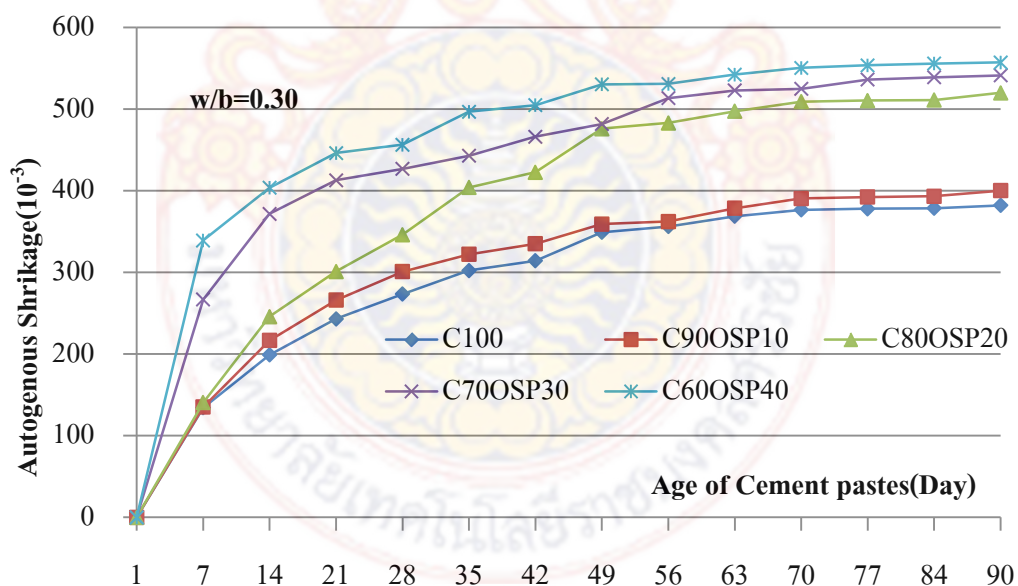
ภาพที่ 4-10 – 4-11 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40 พบว่ามีลักษณะการพัฒนาค่ากำลังอัดลดลง ซึ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่ร้อยละ 20 - 40 นั้น มีแนวโน้มที่ได้ค่ากำลังอัดที่ลดลงมาก ส่วนการแทนที่ ที่ร้อยละ 10 นั้นมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงและน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40 ซีเมนต์เพสต์ (C90OSP10) ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 574, 678, 700, 750 และ 826 ksc ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 93, 88, 86, 88, 77 ของซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ตามลำดับ ดังตารางที่ 4-7

จะสังเกตได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35 และ 0.40 ผลการทดลองที่ได้ นั้น คือค่ากำลังอัดมีการลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อทำการเพิ่ม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35 และ 0.40 ตามลำดับ เพราะปริมาณน้ำที่มากขึ้นนั้นทำให้เกิดฟองอากาศ ส่งผลกระทบต่อช่องว่างในเนื้อของซีเมนต์เพสต์ทำให้ความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ลดลง ทำให้ค่ากำลังอัดที่ได้ลดลงไปด้วย

#### 4.8 อิทธิพลของผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่มีผลต่อค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์

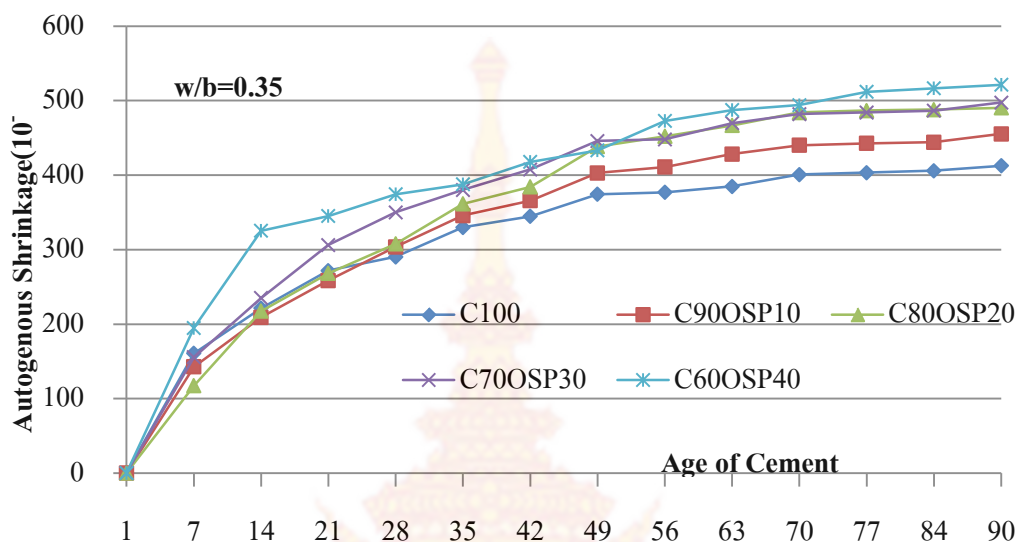
ภาพที่ 4-12 – 4-14 แสดงค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30 0.35 และ 0.40 พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วย OSP นั้นไม่สามารถช่วยลดค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (C100) โดยจะเห็นได้ว่า ร้อยละการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ จะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มร้อยละการแทนที่ของ OSP ที่ร้อยละ 10, 20, 30 และร้อยละ 40 ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง ตามลำดับ

##### 4.5.1 อิทธิพลของผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่มีผลต่อค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียส โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30



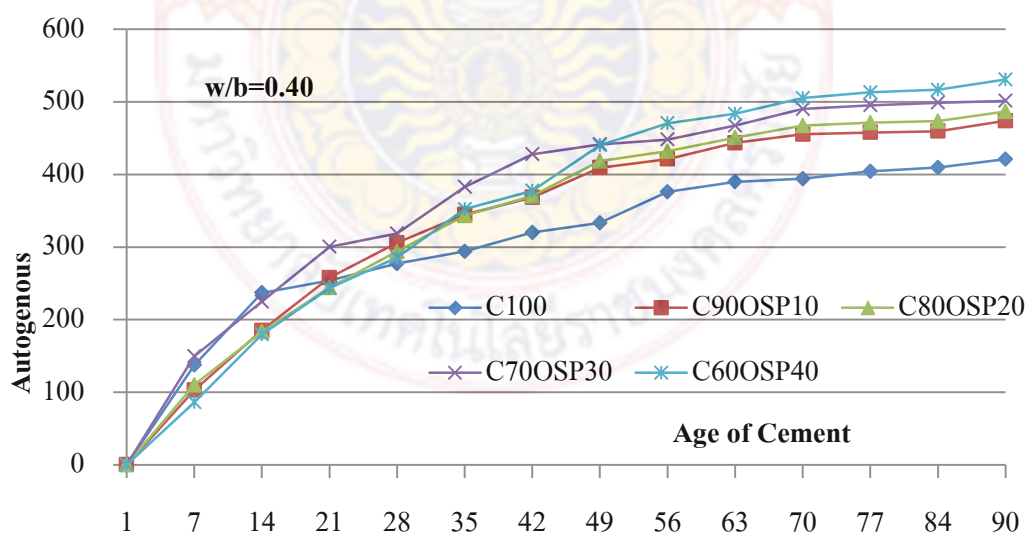
ภาพที่ 4-12 แสดงค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30

4.5.2 อิทธิพลของผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่มีผลต่อค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียส โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35



ภาพที่ 4-13 แสดงค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35

4.5.3 อิทธิพลของผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่มีผลต่อค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียส โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40



ภาพที่ 4-14 แสดงค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40

ตารางที่ 4-8 แสดงการเปรียบเทียบค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) กับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (C100)

Symbol	Autogeneous Shrinkage At 90 Days( $\times 10^{-3}$ ) - %of C100Autogeneous Shrinkage					
	W/b = 0.30		W/b = 0.35		W/b = 0.40	
C100	382	100	413	100	421	100
C90OSP10	400	105	455	110	473	113
C80OSP20	520	136	491	118	487	116
C70OSP30	541	142	498	121	501	119
C60OSP40	557	146	521	126	531	126

หมายเหตุ : ตัวเลขใน คอลัมน์แรกคือ ค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ใน คอลัมน์ที่สองคือ อัตราส่วนของการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (C100)

ตารางที่ 4-8 แสดงการเปรียบเทียบค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30, 0.35 และ 0.40 พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วย OSP นั้นไม่สามารถช่วยลดค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ได้ โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) จะเห็นว่า ร้อยละการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ จะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มร้อยละการแทนที่ของผงเปลือกหอยนางรมบด OSP ที่ร้อยละ 10, 20, 30 และร้อยละ 40 ตามลำดับ

ซึ่งอาจจะส่งผลมาจากปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ของผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ซึ่งมีปริมาณสูง เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1(C) โดยปริมาณของ ( $\text{CaCO}_3$ ) มีผลโดยตรงต่อการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์เพราะเมื่อ  $\text{CaCO}_3$  เริ่มมีการทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ ) เพื่อทำการสร้างผลผลิตที่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตไฮเดรต (Calcium Carboaluminate Hydrates ) โดยปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{C}_3\text{A}$  และ  $\text{CaCO}_3$  จะให้ผลผลิตที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับ เอ็ททริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งโครงสร้างของ Ettringite จะมีลักษณะคล้ายผลึกเข็ม โดยผลึกดังกล่าวจะมีการพัฒนาโครงสร้างขยายออกในแนวของเข็ม ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มจำนวนโพรงที่ละเอียด (Finer pores) ให้มีปริมาณมากขึ้น จึงส่งผลให้การหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ที่ผสมผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

เนื้อหาในบทที่ 5 จะกล่าวถึงผลสรุปของการวิจัย ด้านคุณสมบัติของของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) โดยในการทดสอบได้เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (C100) รวมถึงข้อเสนอแนะต่างๆ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาคุณสมบัติของผงเปลือกหอยนางรมบดที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.30, 0.35 และ 0.40 โดยในการทดสอบได้เปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) มีลักษณะเป็นผงละเอียดมีลักษณะคล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือเทาอ่อนแต่มีสีอ่อนกว่าเล็กน้อยโดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.59

5.1.2 ผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ไม่สามารถช่วยในการเร่งการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ให้เร็วขึ้น โดยเมื่อทำการเพิ่มร้อยละการแทนที่ 10, 20, 30 และร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวเริ่มต้นและระยะก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์จะใช้เวลาเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ตามลำดับ

5.1.3 ซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์เพสต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ไม่สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ เพราะความสามารถในการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และร้อยละ 40 มีกำลังรับแรงอัดได้น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (C100)

5.1.4 เมื่อทำการเพิ่มผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานตามลำดับ ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ทำให้ค่าการหดตัวแบบบอ โดจีเนียสเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (C100)

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งนี้ ผลที่ได้เป็นข้อมูลการวิเคราะห์ผล การศึกษาคุณสมบัติของผงเปลือกหอยนางรมบดที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ โดยได้ศึกษาถึงอิทธิพลและปริมาณของผงเปลือกหอยนางรมที่ร้อยละการแทนที่ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่ให้ผลต่อคุณสมบัติบางประการ รวมถึงปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (w/b) 0.30, 0.35 และ 0.40 เท่านั้น จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในด้านอื่นๆ ดังนี้

5.2.1 ควรศึกษาคุณสมบัติด้านอื่นๆ ของซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีต ซึ่งทำการแทนที่ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ต่อไปในอนาคต

5.2.2 ในการทดสอบควรมีการหาปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (w/b) ที่เหมาะสมที่สุด

5.2.3 ควรทำการศึกษาและทำการทดลอง เพิ่มวัสดุผสมเช่น วัสดุพอซโซลานอย่างอื่นอาจช่วยให้ค้นพบวัสดุที่สามารถสร้างอนุภาคผสมได้ดีขึ้น

5.2.4 ควรนำไปใช้กับงานผลิตบล็อกแบบอื่นๆ เช่น คอนกรีตบล็อกสำหรับปูถนน คอนกรีตบล็อกขอบถนน และคอนกรีตบล็อกสำหรับทางเท้า เป็นต้น

5.2.5 ควรศึกษาคุณสมบัติด้านการดูดซึมน้ำของผงเปลือกหอยนางรมบด (OSP)



## บรรณานุกรม

- [1] กฤติยา แก้วมณี และ ศ.ดร.สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2549. “คุณสมบัติพื้นฐานและความคงทนของคอนกรีตและคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2 , 25-27 ตุลาคม 2549.
- [2] กรมประมง, 2549. กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติการประมง ศูนย์สารสนเทศ. (2549). สืบค้นเมื่อวันที่ 23 มีนาคม 2557, จาก <http://www.fisheries.go.th/it-stat/>
- [3] กรมประมง, 2540. คู่มือการเพาะเลี้ยงหอยตะไกรมเชิงการค้า. โครงการพัฒนาการผลิตหอยตะไกรมเชิงพาณิชย์ กรมประมง โดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- [4] กรุงเทพมหานคร, ศูนย์ข้อมูลกรุงเทพมหานคร. (2550). สถิติรายปี กรุงเทพมหานคร. สืบค้นเมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม 2551, จาก [http://203.155.220.230/stat\\_search/frame.asp](http://203.155.220.230/stat_search/frame.asp)
- [5] จรรยาพร พุ่มงาม, 2545. การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิทยาศาสตร์, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม.
- [6] ชโลธร ศิริภัทรประวัตติ, 2552. อิทธิพลของเปลือกหอยบดต่อคุณสมบัติของปูนฉาบ. วิทยานิพนธ์ สาขาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [7] ตยาศี ตรงสถิตกุล, 2547. การลดปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำดื่มโดยใช้ เปลือกไข่เปลือกหอยลายและเถ้าแกลบดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.
- [8] ทวิช กล้าแท้, 2554. อิทธิพลของผงหินปูนปรับปรุงคุณสมบัติที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังอัดและการหดตัวแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์. วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,
- [9] ทวิช กล้าแท้, ชยณัฐ บัวทองเกื้อและนภลล ศรภักดี , 2559. “Concrete Paving Block Form Parawood Fly Ash” การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21 วันที่ 28-30 มิถุนายน 2559 ณ โรงแรม บีพี สมิหลา บีช อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา
- [10] ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547. “ผลกระทบของเถ้าถ่านหินต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของเพสต์”, การนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในการคอนกรีต ครั้งที่ 2, 28 เมษายน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 64-82.

- [11] ชีรวัฒน์ สีนศิริ, 2549. “การวัดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตโดย TGA และ XRD ของเพสต์ที่แข็งตัวแล้ว”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 2, 25-27 ตุลาคม, อุตรธานี, หน้า MAT64-MAT72.
- [12] บุรฉัตร ฉัตรวีระ, 2554 . คุณสมบัติทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าฟางข้าว. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [13] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ ทวีทัศน์ คงทรัพย์, 2545. ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำ. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [14] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พิชัย นิมิตยงสกุล, 2549. การประยุกต์ใช้เถ้าลอยแม่เมาะเป็นวัสดุผสมในการลดการหดตัวแบบออตโตจีเนียส. วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [15] ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2555 . การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [16] รพีพร สุทาธรรม, 2544. หอยสองฝา. ผลิตภัณฑ์ประมง, 1(12), 1-2.
- [17] รัตนากร ขวงสวัสดิ์ , 2554.การเตรียมวัสดุอุดซ้บจากเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้ง เพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย, วิศวกรรมลาดกระบังปีที่ 28 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2554, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- [18] วันทนา อยู่สุข, 2539. เปลือกหอย. จดหมายข่าวราชบัณฑิตยสถาน. 6(56). สืบค้นเมื่อวันที่ 4 กรกฎาคม 2551, จาก <http://royin.go.th/th/knowledge/detail.php?ID=1016>
- [19] สุวัฒน์ ธนานุภาพไพศาล, 2541. เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของหอยตะไกร (Crassostrea belcheri) ด้วยการเลี้ยงแบบต่าง ๆ /สุวัฒน์ ธนานุภาพไพศาล, สอรัฐ มาบุญ, รัชฎา ขาวหนูนา. สุราษฎร์ธานี: ศูนย์พัฒนาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งจังหวัดสุราษฎร์ธานี.
- [20] หวังแก้ว บุญสวน, 2542. การปรับปรุงคุณสมบัติของปูนก่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง.
- [21] Al-Salen, S. A. and Al-Zaid, R.Z, 2006. Effect of drying condition, admixtures and specimen size on shrinkage strains, Cement and Concrete Research, 36, 1985-1991
- [22] Altoubat, S.A., and Lange, D.A., 2001. Tensile basic creep: measurements and behavior at early age. ACI Material Journal 98(5): 386-393.
- [23] Altoubat, S.A., and Lange, D.A., 2001. Creep, shrinkage, and cracking of restrained concrete at early age. ACI Material Journal 98 (4): 323-331

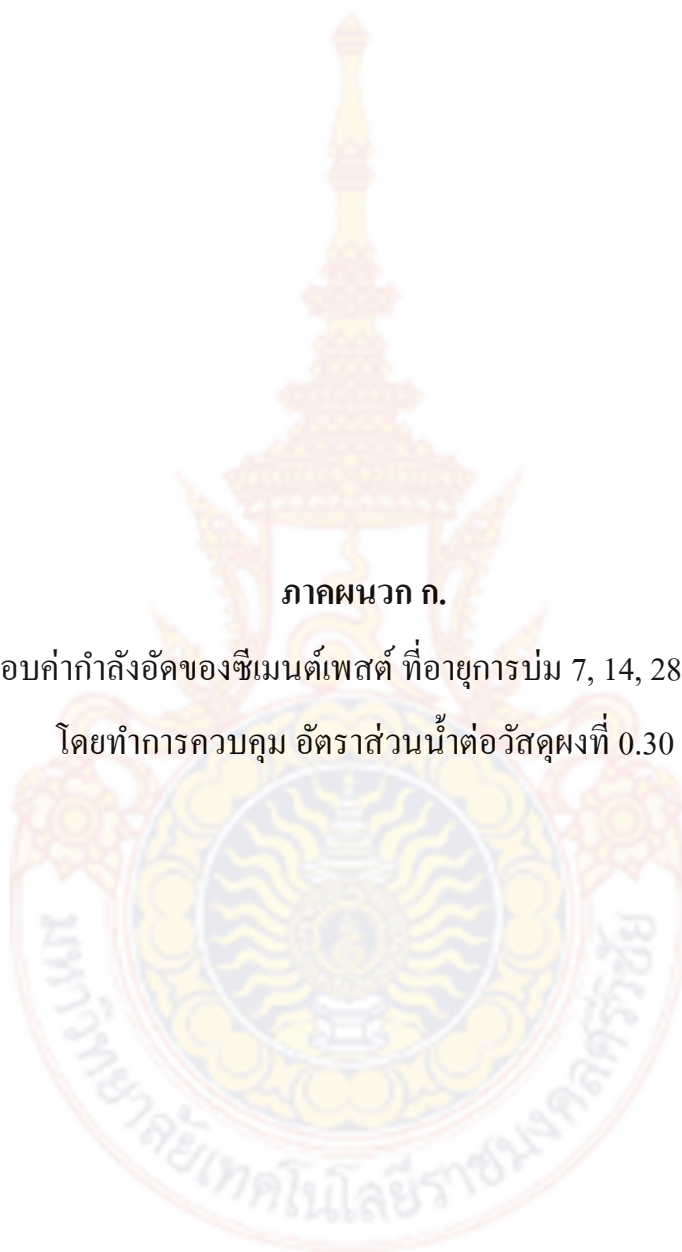


- [24] American Society for Testing and Materials, 2001. Annual Book of ASTM Standards 2001. Volume 04.01 and 04.02, West Conshohocken, U.S.A.
- [25] American Society for Testing and Materials, 2001. Annual Book of ASTM Standards 2001. Volume 04.01 and 04.02, West Conshohocken, U.S.A.
- [26] ASHRAE, 2005. ASHRAE Fundamental Handbook(SI). Atlanta: The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [27] ASTM Committee, 1994, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 : Concrete and Aggregate, American Concrete Institute.
- [28] ASTM Committee, 2006a. Annual Book of ASTM Standard, Vol. 4.01. Philadelphia: American Concrete Institute.
- [29] Ballester, P., Mármol, I., Morales, J. and Sánchez, L, 2007. Use of limestone obtained from waste of the mussel cannery industry for the production of mortars. *Concrete and Concrete Research*, 37, 559-564.
- [30] Barnaby, C, 2004. An Investigation into the reuse of organic waste produced by the New Zealand Mussel Industry. Unpublished master's thesis, Auckland University of Technology, Faculty of Science.
- [31] Bissonnette, B., Pierre, P., and Pigeon, M, 1999. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious material, *Cement and Concrete Research*, 29, 1655-1662.
- [32] British Standard, 1992. The British Standard Institute. London: The British Standard Institution.
- [33] Borgholm, H. E., Herfort, D., and Rasmussen, S., 1995. A New Blended Cement Based on Mineralized Clinker, *World Cement*, Vol. 8, pp. 27-33.
- [34] Chindapasirt P., Jaturapitakkul C., Sinsiri T., 2005. Effect of fly ash finness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement & Concrete Composites*, 27: 425-428
- [35] Demirboga, R, 2007. Thermal Conductivity and Compressive Strength of Concrete Incorporation with Mineral Admixtures. *Building and Environment*, 42(7),2467–2471.
- [36] Falade, F. , 1995. An investigation of periwinkle shells as coarse aggregate in concrete. *Building and Environment*, 30, 573–577.
- [37] Kim, K. H., Jeon, S. E., Kim, J. K. and Yang, S. C, 2003. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and concrete research*, 33, 363–371.

- [38] Khan, M. I , 2002. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of prediction models. *Building and Environment*, 37, 607–614.
- [39] Krammart, P. & Tangtermsirikul, S., 2004. Properties of cement made by partially replacing cement raw materials with municipal solid waste ashes and calcium carbide waste. *Construction and Building Materials*, 18, 579-583. Makaratat, N., Laosamathikul, T.
- [40] Malhotra, V. M. , 2002. Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology. *ACI Concrete International* 24 (7): 22.
- [41] Neville, A. M. , 1995. *Properties of concrete*. London: Longman Stergaard, L., Lange, D.A., Altoubat, S.A., and Stang, H., 2001. Tensile basic creep of early-age concrete under constant load. *Cement and Concrete Research* 31: 1895-1899.
- [42] Tan, Shau –Hwai and Wong ,Tat –Weng, 1996. Effect of salinity on hatching, larval growth,survival and settling in the tropical oyster *Crassostrea belcheri* (Sowerby). *Journal of Aquaculture* 145 : 129 - 139
- [43] Tao, Z., and Weizu, Q., 2006. Tensile creep due to restraining stresses in highstrength concrete at early ages. *Cement and concrete Research* 36: 584-591.
- [44] Tazawa, E., and Miyazawa, S, 1993. Autogenous Shrinkage of Concrete and Its Importance in Concrete Technology. *Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium, Barcelona, Spain*, 189-168.
- [45] Yang, E. I., Yi, S. T., and Leem, Y. M. , 2005. Effect of oyster shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics: Part I. Fundamental properties. *Cement and Concrete Research*, 35, 2175–2182.
- [46] Yoon, G. L., Kim, B. T., Kim, B. O. and Han, S. H. , 2003. Chemical–mechanical characteristics of crushed oyster-shell. *Waste Management*, 23, 825–834.
- [47] Yoon, H. S., Park, S. K., Lee, K. H. and Park, J. B. , 2004. Oyster shell as substitute for aggregate in mortar. *Waste Management and Research*, 22, 158–170.

**ภาคผนวก ก.**

ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน  
โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30



ตาราง ก-1 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (C100) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30

Code : C100 w/b : 0.30

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	C100	24.90	5.02	0.26148	25-Feb-16	3-Mar-16	7	767.92	2,100.24
2	C100	25.00	5.00	0.26270	25-Feb-16	3-Mar-16	7	759.89	2,101.60
3	C100	25.00	5.05	0.26319	25-Feb-16	3-Mar-16	7	773.91	2,105.52
average								<b>767.24</b>	<b>2,102.45</b>
1	C100	24.75	4.98	0.25321	26-Jan-16	9-Feb-16	14	823.24	2,046.14
2	C100	25.00	5.01	0.26605	26-Jan-16	9-Feb-16	14	803.08	2,128.40
3	C100	25.35	5.00	0.26315	26-Jan-16	9-Feb-16	14	813.38	2,076.05
average								<b>813.23</b>	<b>2,083.53</b>
1	C100	25.50	5.03	0.26758	14-Jan-16	11-Feb-16	28	909.67	2,098.67
2	C100	25.00	4.97	0.26882	14-Jan-16	11-Feb-16	28	917.23	2,150.56
3	C100	25.50	5.05	0.26848	14-Jan-16	11-Feb-16	28	949.44	2,105.73
average								<b>925.45</b>	<b>2,118.32</b>
1	C100	24.75	5.01	0.26824	25-Nov-15	20-Jan-16	56	1,069.41	2,167.60
2	C100	24.90	4.98	0.26846	25-Nov-15	20-Jan-16	56	999.72	2,156.31
3	C100	25.25	5.03	0.26773	25-Nov-15	20-Jan-16	56	1,030.55	2,120.63
average								<b>1,033.23</b>	<b>2,148.18</b>
1	C100	25.91	5.05	0.27092	16-Nov-15	14-Feb-16	90	1,034.49	2,091.40
2	C100	25.00	4.97	0.26972	16-Nov-15	14-Feb-16	90	1,078.01	2,157.79
3	C100	25.40	5.02	0.27068	16-Nov-15	14-Feb-16	90	1,117.50	2,131.62
average								<b>1,076.67</b>	<b>2,126.94</b>



ตาราง ก-2 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์พิเศษซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือก  
หอยนางรมบด 10% (C90OSP10) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30

Code : C90OSP10 w/b : 0.30

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	C90OSP10	25.15	5.05	0.25842	1-Mar-16	8-Mar-16	7	567.56	2,055.36
2	C90OSP10	24.75	4.98	0.25611	1-Mar-16	8-Mar-16	7	599.07	2,069.53
3	C90OSP10	25.55	5.03	0.25756	1-Mar-16	8-Mar-16	7	573.24	2,016.13
average								<b>579.96</b>	<b>2,047.00</b>
1	C90OSP10	25.76	5.04	0.25681	27-Jan-16	10-Feb-16	14	632.55	1,994.25
2	C90OSP10	25.40	5.02	0.25657	27-Jan-16	10-Feb-16	14	607.78	2,020.24
3	C90OSP10	24.90	4.98	0.25643	27-Jan-16	10-Feb-16	14	610.23	2,059.68
average								<b>616.85</b>	<b>2,024.72</b>
1	C90OSP10	25.25	5.05	0.26259	18-Jan-16	15-Feb-16	28	719.35	2,080.12
2	C90OSP10	24.80	4.96	0.26294	18-Jan-16	15-Feb-16	28	796.24	2,120.45
3	C90OSP10	25.55	5.04	0.26521	18-Jan-16	15-Feb-16	28	727.55	2,076.01
average								<b>747.71</b>	<b>2,092.19</b>
1	C90OSP10	25.50	5.03	0.25965	2-Dec-15	27-Jan-16	56	885.00	2,036.47
2	C90OSP10	25.50	5.04	0.26385	2-Dec-15	27-Jan-16	56	900.00	2,069.28
3	C90OSP10	25.10	5.01	0.26370	2-Dec-15	27-Jan-16	56	920.00	2,101.20
average								901.67	<b>2,068.98</b>
1	C90OSP10	26.11	5.08	0.26699	16-Nov-15	14-Feb-16	90	1,024.00	2,044.96
2	C90OSP10	25.40	5.06	0.26833	16-Nov-15	14-Feb-16	90	985.00	2,112.83
3	C90OSP10	25.00	5.00	0.26632	16-Nov-15	14-Feb-16	90	968.00	2,130.56
average								992.33	<b>2,096.12</b>

ตาราง ก-3 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์พิเศษซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือก  
หอยนางรมบด 20% (C80OSP20) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30

Code : C80OSP20 w/b : 0.30

Spec . No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	C80OSP20	25.76	4.98	0.25300	2-Mar-16	9-Mar-16	7	537.22	1,972.56
2	C80OSP20	25.10	4.97	0.25332	2-Mar-16	9-Mar-16	7	532.30	2,030.67
3	C80OSP20	24.75	5.05	0.25152	2-Mar-16	9-Mar-16	7	591.80	2,012.31
average								<b>553.77</b>	<b>2,005.18</b>
1	C80OSP20	25.86	4.98	0.25456	28-Jan-16	11-Feb-16	14	598.31	1,976.97
2	C80OSP20	24.90	5.00	0.25451	28-Jan-16	11-Feb-16	14	610.51	2,044.26
3	C80OSP20	25.00	4.97	0.25609	28-Jan-16	11-Feb-16	14	619.14	2,061.09
average								<b>609.32</b>	<b>2,027.44</b>
1	C80OSP20	25.15	5.10	0.26134	19-Jan-16	16-Feb-16	28	704.39	2,037.58
2	C80OSP20	24.75	5.02	0.26484	19-Jan-16	16-Feb-16	28	776.76	2,131.54
3	C80OSP20	25.25	4.97	0.26398	19-Jan-16	16-Feb-16	28	695.83	2,103.55
average								<b>725.66</b>	<b>2,090.89</b>
1	C80OSP20	25.50	5.05	0.25494	8-Dec-15	2-Feb-16	56	777.07	1,979.92
2	C80OSP20	24.85	4.98	0.25501	8-Dec-15	2-Feb-16	56	751.02	2,060.64
3	C80OSP20	25.25	5.00	0.25521	8-Dec-15	2-Feb-16	56	813.27	2,021.47
average								<b>780.45</b>	<b>2,020.67</b>
1	C80OSP20	25.30	5.05	0.26362	16-Nov-15	14-Feb-16	90	801.47	2,063.45
2	C80OSP20	24.75	4.98	0.26349	16-Nov-15	14-Feb-16	90	825.44	2,137.71
3	C80OSP20	25.81	5.00	0.26328	16-Nov-15	14-Feb-16	90	859.00	2,040.50
average								<b>828.64</b>	<b>2,080.55</b>

ตาราง ก-4 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์พิเศษซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือก  
หอยนางรมบด 30% (C70OSP30) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30

Code : C70OSP30 w/b : 0.30

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	C70OSP30	24.95	5.00	0.24783	3-Mar-16	10-Mar-16	7	508.67	1,986.66
2	C70OSP30	25.05	4.97	0.24715	3-Mar-16	10-Mar-16	7	513.91	1,985.16
3	C70OSP30	25.10	5.00	0.24757	3-Mar-16	10-Mar-16	7	494.81	1,972.67
average								<b>505.80</b>	<b>1,981.50</b>
1	C70OSP30	25.00	4.95	0.25135	16-Feb-16	1-Mar-16	14	612.61	2,031.11
2	C70OSP30	24.65	5.00	0.24938	16-Feb-16	1-Mar-16	14	549.81	2,023.27
3	C70OSP30	24.90	5.03	0.24927	16-Feb-16	1-Mar-16	14	584.87	1,990.23
average								<b>582.43</b>	<b>2,014.87</b>
1	C70OSP30	25.10	4.97	0.25682	21-Jan-16	18-Feb-16	28	657.15	2,058.73
2	C70OSP30	24.90	5.00	0.25547	21-Jan-16	18-Feb-16	28	694.56	2,051.99
3	C70OSP30	25.00	5.02	0.25414	21-Jan-16	18-Feb-16	28	659.38	2,025.02
average								<b>670.36</b>	<b>2,045.25</b>
1	C70OSP30	24.75	5.00	0.25046	15-Dec-15	10-Feb-16	56	684.00	2,023.92
2	C70OSP30	24.85	4.96	0.24936	15-Dec-15	10-Feb-16	56	708.42	2,023.11
3	C70OSP30	25.05	5.00	0.25139	15-Dec-15	10-Feb-16	56	697.15	2,007.15
average								<b>696.52</b>	<b>2,018.06</b>
1	C70OSP30	26.11	4.98	0.25697	23-Nov-15	20-Feb-16	90	754.80	1,976.12
2	C70OSP30	25.40	4.97	0.25565	23-Nov-15	20-Feb-16	90	749.19	2,025.14
3	C70OSP30	25.00	5.05	0.25581	23-Nov-15	20-Feb-16	90	764.81	2,026.22
average								<b>756.27</b>	<b>2,009.16</b>

ตาราง ก-5 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์พิเศษซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือก

หอยนางรมบด 40% (C60OSP40) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30

Code : C60OSP40 w/b : 0.30

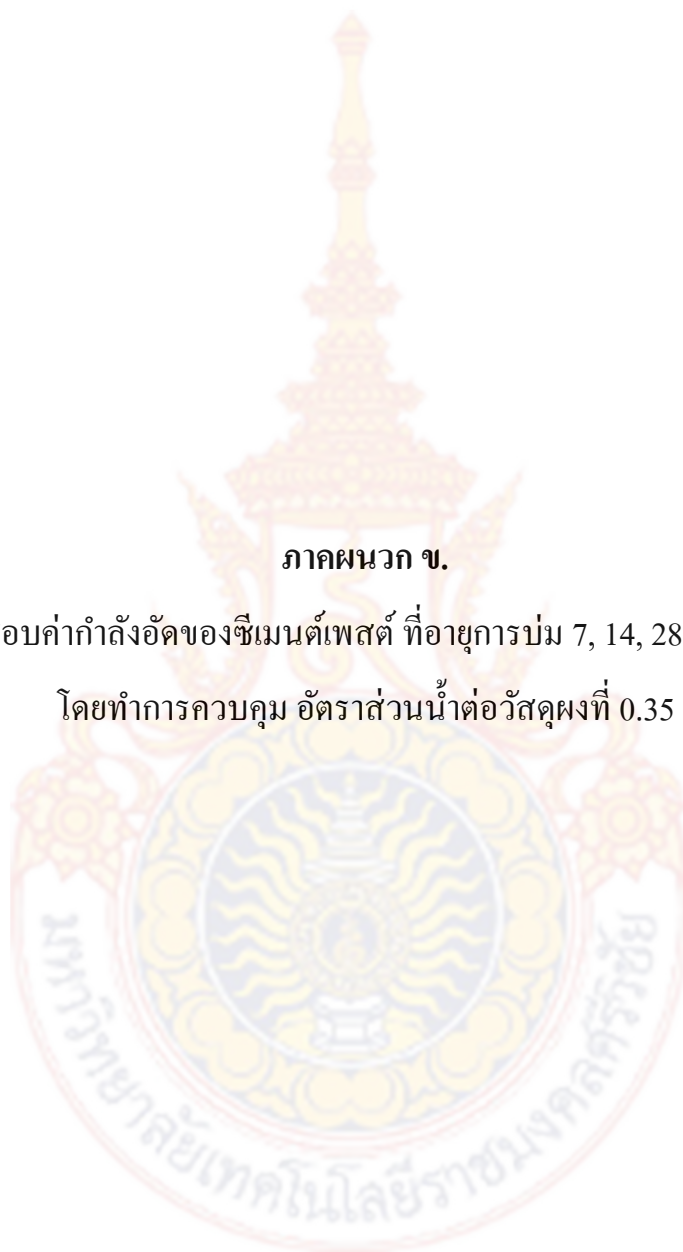
Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	C60OSP40	25.40	5.10	0.24011	9-Mar-16	16-Mar-16	7	388.51	1,853.70
2	C60OSP40	25.60	5.12	0.23903	9-Mar-16	16-Mar-16	7	354.28	1,823.65
3	C60OSP40	24.90	4.98	0.23974	9-Mar-16	16-Mar-16	7	371.48	1,933.36
average								<b>371.42</b>	<b>1,870.24</b>
1	C60OSP40	25.50	5.10	0.23829	24-Feb-16	9-Mar-16	14	496.21	1,832.30
2	C60OSP40	25.25	5.05	0.23930	24-Feb-16	9-Mar-16	14	451.64	1,876.68
3	C60OSP40	25.10	5.00	0.23970	24-Feb-16	9-Mar-16	14	502.30	1,909.96
average								<b>483.38</b>	<b>2,001.26</b>
1	C60OSP40	24.90	4.98	0.25370	26-Jan-16	22-Feb-16	28	561.95	2,045.93
2	C60OSP40	25.50	5.10	0.25136	26-Jan-16	22-Feb-16	28	532.91	1,932.80
3	C60OSP40	25.00	5.00	0.25091	26-Jan-16	22-Feb-16	28	550.90	2,007.28
average								<b>548.59</b>	<b>2,001.26</b>
1	C60OSP40	24.85	5.02	0.24912	17-Dec-15	13-Feb-16	56	618.50	1,997.08
2	C60OSP40	24.90	4.98	0.25081	17-Dec-15	13-Feb-16	56	627.23	2,022.63
3	C60OSP40	25.25	5.00	0.25062	17-Dec-15	13-Feb-16	56	642.37	1,985.11
average								<b>629.37</b>	<b>2,001.26</b>
1	C60OSP40	25.40	5.08	0.25309	24-Nov-15	21-Feb-16	90	727.46	1,961.61
2	C60OSP40	25.10	4.98	0.25054	24-Nov-15	21-Feb-16	90	715.14	2,004.35
3	C60OSP40	24.85	5.11	0.25191	24-Nov-15	21-Feb-16	90	734.51	1,983.80
average								<b>725.70</b>	<b>2,001.26</b>



**ภาคผนวก ข.**

ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุการป่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35



ตาราง ข-1 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่าง  
เดียว (C100) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35

Code : C100 w/b : 0.35

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	C100	25.91	5.05	0.25422	25-Feb-16	16-Mar-16	7	662.64	1,943.05
2	C100	25.00	5.00	0.25524	25-Feb-16	16-Mar-16	7	673.24	2,041.95
3	C100	25.40	4.98	0.25874	25-Feb-16	16-Mar-16	7	654.74	2,045.77
average								<b>663.54</b>	<b>2,010.26</b>
1	C100	26.11	5.05	0.25835	26-Jan-16	9-Feb-16	14	760.94	1,959.19
2	C100	25.40	4.98	0.25671	26-Jan-16	9-Feb-16	14	759.23	2,029.46
3	C100	25.00	5.00	0.25648	26-Jan-16	9-Feb-16	14	728.57	2,051.84
average								<b>749.58</b>	<b>2,013.50</b>
1	C100	25.30	5.05	0.25684	14-Jan-16	11-Feb-16	28	874.66	2,010.38
2	C100	24.75	4.98	0.25526	14-Jan-16	11-Feb-16	28	838.73	2,070.94
3	C100	25.81	5.00	0.25516	14-Jan-16	11-Feb-16	28	849.28	1,977.56
average								<b>854.22</b>	<b>2,019.63</b>
1	C100	26.11	4.98	0.24986	25-Nov-15	20-Jan-16	56	1,095.67	1,921.44
2	C100	25.40	4.97	0.24972	25-Nov-15	20-Jan-16	56	974.49	1,978.17
3	C100	25.00	5.05	0.25053	25-Nov-15	20-Jan-16	56	915.33	1,984.40
average								<b>995.16</b>	<b>1,961.34</b>
1	C100	25.60	5.10	0.26135	17-Nov-05	15-Feb-16	90	1,030.91	2,001.76
2	C100	25.00	5.08	0.26172	17-Nov-05	15-Feb-16	90	1,075.85	2,060.79
3	C100	25.10	5.00	0.25974	17-Nov-05	15-Feb-16	90	1,022.62	2,069.64
average								<b>1,043.13</b>	<b>2,044.06</b>

ตาราง ข-2 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือก  
หอยนางรมบด 10% (C90OSP10) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35

Code : C90OSP10 w/b : 0.35

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	C90OSP10	25.40	5.08	0.24941	1-Mar-16	8-Mar-16	7	549.58	1,967.40
2	C90OSP10	25.10	4.98	0.24973	1-Mar-16	8-Mar-16	7	590.09	1,967.40
3	C90OSP10	24.85	5.11	0.24809	1-Mar-16	8-Mar-16	7	574.51	1,967.40
average								<b>571.39</b>	<b>1,967.40</b>
1	C90OSP10	25.60	5.10	0.25026	27-Jan-16	10-Feb-16	14	637.33	1,916.82
2	C90OSP10	25.00	5.08	0.25212	27-Jan-16	10-Feb-16	14	688.78	1,985.20
3	C90OSP10	25.10	5.00	0.25167	27-Jan-16	10-Feb-16	14	669.90	2,005.34
average								<b>665.34</b>	<b>1,969.12</b>
1	C90OSP10	24.90	5.08	0.25815	18-Jan-16	15-Feb-16	28	782.76	2,040.84
2	C90OSP10	24.85	4.98	0.25594	18-Jan-16	15-Feb-16	28	730.80	2,068.15
3	C90OSP10	25.25	5.11	0.25694	18-Jan-16	15-Feb-16	28	768.80	1,991.36
average								<b>760.79</b>	<b>2,033.45</b>
1	C90OSP10	25.34	5.10	0.24147	2-Dec-15	27-Jan-16	56	882.49	1,868.18
2	C90OSP10	25.00	5.08	0.24350	2-Dec-15	27-Jan-16	56	824.24	1,917.32
3	C90OSP10	25.25	5.00	0.24355	2-Dec-15	27-Jan-16	56	849.67	1,929.11
average								<b>852.13</b>	<b>1,904.87</b>
1	C90OSP10	24.90	5.08	0.25642	17-Nov-15	15-Feb-16	90	1,045.80	2,027.16
2	C90OSP10	24.85	4.98	0.25594	17-Nov-15	15-Feb-16	90	997.09	2,068.15
3	C90OSP10	25.25	5.11	0.25524	17-Nov-15	15-Feb-16	90	925.80	1,978.18
average								<b>989.56</b>	<b>2,024.50</b>

ตาราง ข-3 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือก

หอยนางรมบด 20% (C80OSP20) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35

Code : C80OSP20 w/b : 0.35

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	C80OSP20	25.30	5.02	0.24530	2-Mar-16	9-Mar-16	7	497.26	1,931.40
2	C80OSP20	25.50	5.01	0.24618	2-Mar-16	9-Mar-16	7	502.45	1,926.90
3	C80OSP20	25.05	5.00	0.24400	2-Mar-16	9-Mar-16	7	454.21	1,948.10
average								<b>484.64</b>	<b>1,935.47</b>
1	C80OSP20	24.75	5.00	0.24959	28-Jan-16	11-Feb-16	14	554.34	2,016.89
2	C80OSP20	25.00	4.98	0.24970	28-Jan-16	11-Feb-16	14	579.26	2,005.62
3	C80OSP20	25.35	5.00	0.24976	28-Jan-16	11-Feb-16	14	564.51	1,970.42
average								<b>566.04</b>	<b>1,997.64</b>
1	C80OSP20	25.00	4.95	0.25128	19-Jan-16	16-Feb-16	28	612.03	2,030.55
2	C80OSP20	25.05	5.00	0.24975	19-Jan-16	16-Feb-16	28	629.49	1,994.01
3	C80OSP20	25.10	5.05	0.24880	19-Jan-16	16-Feb-16	28	654.97	1,962.84
average								<b>632.16</b>	<b>1,995.80</b>
1	C80OSP20	25.05	5.00	0.24554	8-Dec-15	2-Feb-16	56	717.86	1,960.63
2	C80OSP20	25.45	5.01	0.24622	8-Dec-15	2-Feb-16	56	755.26	1,931.07
3	C80OSP20	25.30	5.00	0.24707	8-Dec-15	2-Feb-16	56	701.16	1,953.08
average								<b>724.76</b>	<b>1,948.26</b>
1	C80OSP20	25.34	5.10	0.25328	17-Nov-15	15-Feb-16	90	781.86	1,959.55
2	C80OSP20	25.00	5.08	0.25236	17-Nov-15	15-Feb-16	90	799.92	1,987.09
3	C80OSP20	25.25	5.00	0.25000	17-Nov-15	15-Feb-16	90	777.36	1,980.20
average								<b>786.38</b>	<b>1,975.61</b>

ตาราง ข-4 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือก  
หอยนางรมบด 30% (C70OSP30) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35

Code : C70OSP30 w/b : 0.35

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	C70OSP30	25.05	5.01	0.23862	3-Mar-16	10-Mar-16	7	451.71	1,901.35
2	C70OSP30	25.25	4.96	0.23955	3-Mar-16	10-Mar-16	7	458.12	1,912.68
3	C70OSP30	25.15	4.97	0.23892	3-Mar-16	10-Mar-16	7	441.81	1,911.43
average								<b>450.55</b>	<b>1,908.49</b>
1	C70OSP30	25.76	4.97	0.24626	16-Feb-16	1-Mar-16	14	520.30	1,923.87
2	C70OSP30	25.40	4.98	0.24792	16-Feb-16	1-Mar-16	14	484.26	1,959.97
3	C70OSP30	24.90	5.00	0.24758	16-Feb-16	1-Mar-16	14	470.45	1,988.59
average								<b>491.67</b>	<b>1,957.48</b>
1	C70OSP30	25.05	5.10	0.24487	21-Jan-16	18-Feb-16	28	534.28	1,916.72
2	C70OSP30	24.90	5.08	0.24628	21-Jan-16	18-Feb-16	28	553.54	1,947.06
3	C70OSP30	25.00	5.00	0.24633	21-Jan-16	18-Feb-16	28	546.14	1,970.71
average								<b>544.65</b>	<b>1,944.83</b>
1	C70OSP30	25.35	5.05	0.24119	15-Dec-15	10-Feb-16	56	558.32	1,884.26
2	C70OSP30	25.30	5.00	0.24321	15-Dec-15	10-Feb-16	56	565.54	1,922.73
3	C70OSP30	25.00	4.98	0.24220	15-Dec-15	10-Feb-16	56	568.36	1,945.38
average								<b>564.07</b>	<b>1,917.46</b>
1	C70OSP30	25.91	5.05	0.24615	32-11-15	20-Feb-16	90	727.89	1,881.37
2	C70OSP30	25.00	5.00	0.24694	32-11-15	20-Feb-16	90	650.89	1,975.55
3	C70OSP30	25.40	4.98	0.24669	32-11-15	20-Feb-16	90	681.02	1,950.50
average								<b>686.60</b>	<b>1,935.81</b>



ตาราง ข-5 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือก  
หอยนางรมบด 40% (C60OSP40) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35

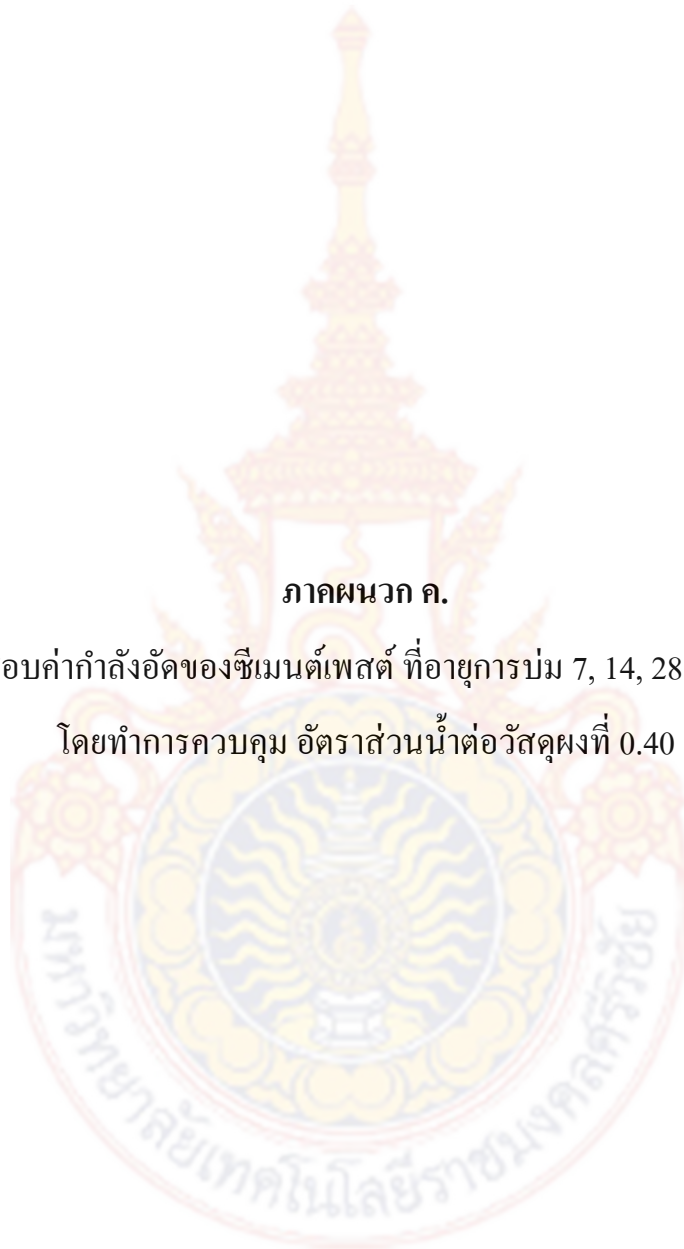
Code : C60OSP40 w/b : 0.35

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	C60OSP40	25.25	5.00	0.23185	9-Mar-16	16-Mar-16	7	421.93	1,836.48
2	C60OSP40	25.10	5.09	0.23281	9-Mar-16	16-Mar-16	7	430.42	1,822.26
3	C60OSP40	25.25	5.09	0.23364	9-Mar-16	16-Mar-16	7	441.81	1,817.89
average								<b>431.39</b>	<b>1,825.54</b>
1	C60OSP40	25.86	4.98	0.23845	24-Feb-16	9-Mar-16	14	442.55	1,851.85
2	C60OSP40	24.90	5.00	0.23661	24-Feb-16	9-Mar-16	14	488.57	1,900.48
3	C60OSP40	25.00	4.97	0.23789	24-Feb-16	9-Mar-16	14	448.68	1,914.61
average								<b>459.93</b>	<b>1,888.98</b>
1	C60OSP40	26.01	5.06	0.24454	25-Jan-16	22-Feb-16	28	503.80	1,858.09
2	C60OSP40	25.15	5.02	0.24508	25-Jan-16	22-Feb-16	28	529.52	1,941.18
3	C60OSP40	25.00	5.00	0.24429	25-Jan-16	22-Feb-16	28	516.27	1,954.32
average								<b>516.53</b>	<b>1,917.86</b>
1	C60OSP40	25.30	5.12	0.24376	17-Dec-15	13-Feb-16	56	527.05	1,881.91
2	C60OSP40	25.15	5.00	0.24428	17-Dec-15	13-Feb-16	56	532.97	1,942.58
3	C60OSP40	24.85	5.00	0.24273	17-Dec-15	13-Feb-16	56	546.07	1,953.56
average								<b>535.36</b>	<b>1,926.02</b>
1	C60OSP40	26.11	5.05	0.24119	24-Nov-15	21-Feb-16	90	524.42	1,829.06
2	C60OSP40	25.40	4.98	0.24296	24-Nov-15	21-Feb-16	90	577.18	1,920.75
3	C60OSP40	25.00	5.00	0.24143	24-Nov-15	21-Feb-16	90	544.09	1,931.44
average								<b>548.56</b>	<b>1,893.75</b>

ภาคผนวก ค.

ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40



ตาราง ค-1 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่าง

เดียว (C100) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40

Code : C100 w/b : 0.40

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	C100	25.20	5.08	0.24481	25-Feb-16	3-Mar-16	7	605.68	1,912.34
2	C100	25.40	5.03	0.24731	25-Feb-16	3-Mar-16	7	577.18	1,935.59
3	C100	24.90	5.00	0.24733	25-Feb-16	3-Mar-16	7	666.05	1,986.59
average								<b>616.30</b>	<b>1,944.84</b>
1	C100	25.00	4.95	0.24675	26-Jan-16	9-Feb-16	14	796.43	1,993.94
2	C100	24.65	5.00	0.24759	26-Jan-16	9-Feb-16	14	779.53	2,008.75
3	C100	24.90	5.03	0.24670	26-Jan-16	9-Feb-16	14	727.49	1,969.71
average								<b>767.82</b>	<b>1,990.80</b>
1	C100	24.75	5.00	0.24790	14-Jan-16	11-Feb-16	28	803.99	2,003.23
2	C100	24.80	4.96	0.24828	14-Jan-16	11-Feb-16	28	827.78	2,018.41
3	C100	25.15	5.00	0.24967	14-Jan-16	11-Feb-16	28	819.64	1,985.45
average								<b>817.14</b>	<b>2,002.36</b>
1	C100	25.15	5.00	0.24754	25-Nov-05	20-Jan-16	56	796.14	1,968.82
2	C100	25.15	5.04	0.24852	25-Nov-05	20-Jan-16	56	897.27	1,960.62
3	C100	25.15	4.98	0.24751	25-Nov-05	20-Jan-16	56	864.30	1,976.18
average								<b>852.57</b>	<b>1,968.54</b>
1	C100	25.30	5.05	0.25322	18-Nov-15	16-Feb-16	90	1,056.25	1,982.05
2	C100	24.75	4.98	0.25300	18-Nov-15	16-Feb-16	90	953.77	2,052.61
3	C100	25.81	5.00	0.25193	18-Nov-15	16-Feb-16	90	1,006.18	1,952.53
average								<b>1,005.40</b>	<b>1,995.73</b>

ตาราง ค-2 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือก  
หอยนางรมบด 10% (C90OSP10) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40

Code : C90OSP10 w/b : 0.40

Spec . No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	C90OSP10	25.91	5.05	0.24327	1-Mar-16	8-Mar-16	7	553.11	1,859.36
2	C90OSP10	25.00	5.00	0.24331	1-Mar-16	8-Mar-16	7	565.25	1,946.51
3	C90OSP10	25.40	4.98	0.24234	1-Mar-16	8-Mar-16	7	604.06	1,916.10
average								574.14	1,907.32
1	C90OSP10	26.11	5.05	0.24370	27-Jan-16	10-Feb-16	14	646.46	1,848.09
2	C90OSP10	25.40	4.98	0.24349	27-Jan-16	10-Feb-16	14	698.68	1,924.94
3	C90OSP10	25.00	5.00	0.24314	27-Jan-16	10-Feb-16	14	688.37	1,945.12
average								677.84	1,906.05
1	C90OSP10	25.30	5.05	0.25069	18-Jan-16	15-Feb-16	28	708.06	1,962.24
2	C90OSP10	24.75	4.98	0.25213	18-Jan-16	15-Feb-16	28	718.55	2,045.55
3	C90OSP10	25.81	5.00	0.25015	18-Jan-16	15-Feb-16	28	672.47	1,938.73
average								699.69	1,982.17
1	C90OSP10	26.11	4.98	0.24957	2-Dec-15	27-Jan-16	56	766.56	1,919.21
2	C90OSP10	25.40	4.97	0.25037	2-Dec-15	27-Jan-16	56	739.39	1,983.32
3	C90OSP10	25.00	5.05	0.24901	2-Dec-15	27-Jan-16	56	743.95	1,972.36
average								749.97	1,958.30
1	C90OSP10	26.11	4.98	0.24725	18-Nov-15	16-Feb-16	90	814.12	1,901.37
2	C90OSP10	25.40	4.97	0.24371	18-Nov-15	16-Feb-16	90	841.62	1,930.56
3	C90OSP10	25.00	5.05	0.24446	18-Nov-15	16-Feb-16	90	822.87	1,936.32
average								826.20	1,922.75

ตาราง ก-3 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์พิเศษซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือก  
หอยนางรมบด 20% (C80OSP20) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40

Code : C80OSP20 w/b : 0.40

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	C80OSP20	24.95	5.00	0.24053	2-Mar-16	9-Feb-16	7	450.00	1,928.14
2	C80OSP20	25.05	4.97	0.24113	2-Mar-16	9-Feb-16	7	478.00	1,936.81
3	C80OSP20	25.10	5.00	0.23955	2-Mar-16	9-Feb-16	7	460.00	1,908.76
average								462.67	1,924.57
1	C80OSP20	25.00	4.95	0.24097	28-Jan-16	11-Feb-16	14	560.22	1,947.23
2	C80OSP20	24.65	5.00	0.24072	28-Jan-16	11-Feb-16	14	562.02	1,953.01
3	C80OSP20	24.90	5.03	0.24118	28-Jan-16	11-Feb-16	14	546.72	1,925.63
average								556.32	1,941.96
1	C80OSP20	24.75	4.97	0.24153	19-Jan-16	16-Feb-16	28	601.91	1,963.54
2	C80OSP20	24.85	5.00	0.23762	19-Jan-16	16-Feb-16	28	572.62	1,912.43
3	C80OSP20	25.15	5.02	0.23914	19-Jan-16	16-Feb-16	28	567.83	1,894.13
average								580.79	1,923.37
1	C80OSP20	24.75	5.00	0.24185	8-Dec-15	2-Feb-16	56	643.21	1,954.34
2	C80OSP20	24.85	4.97	0.24287	8-Dec-15	2-Feb-16	56	636.27	1,966.49
3	C80OSP20	25.05	4.98	0.24170	8-Dec-15	2-Feb-16	56	621.98	1,937.54
average								633.82	1,952.79
1	C80OSP20	25.40	5.10	0.24185	18-Nov-15	16-Feb-16	90	657.69	1,867.14
2	C80OSP20	25.60	5.12	0.24287	18-Nov-15	16-Feb-16	90	705.13	1,852.95
3	C80OSP20	24.90	4.98	0.24170	18-Nov-15	16-Feb-16	90	706.81	1,949.16
average								689.88	1,889.75



ตาราง ก-4 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์พิเศษซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือก  
หอยนางรมบด 30% (C70OSP30) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40

Code : C70OSP30 w/b : 0.40

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	C70OSP30	25.40	5.08	0.23515	3-Mar-16	10-Mar-16	7	381.37	1,822.56
2	C70OSP30	25.10	4.98	0.23491	3-Mar-16	10-Mar-16	7	382.85	1,879.31
3	C70OSP30	24.85	5.11	0.23359	3-Mar-16	10-Mar-16	7	373.35	1,839.53
average								<b>379.19</b>	<b>1,847.13</b>
1	C70OSP30	25.60	5.10	0.23700	16-Feb-16	1-Mar-16	14	417.08	1,815.26
2	C70OSP30	25.00	5.08	0.23699	16-Feb-16	1-Mar-16	14	420.32	1,866.06
3	C70OSP30	25.10	5.00	0.23731	16-Feb-16	1-Mar-16	14	460.35	1,890.92
average								<b>432.58</b>	<b>1,857.41</b>
1	C70OSP30	24.90	5.08	0.23839	21-Jan-16	18-Feb-16	28	465.53	1,884.63
2	C70OSP30	24.85	4.98	0.23705	21-Jan-16	18-Feb-16	28	492.41	1,915.51
3	C70OSP30	25.25	5.11	0.24031	21-Jan-16	18-Feb-16	28	440.59	1,862.47
average								<b>466.18</b>	<b>1,887.54</b>
1	C70OSP30	25.34	5.10	0.23709	15-Dec-15	10-Feb-16	56	489.24	1,834.29
2	C70OSP30	25.00	5.08	0.23625	15-Dec-15	10-Feb-16	56	481.09	1,860.24
3	C70OSP30	25.25	5.00	0.23641	15-Dec-15	10-Feb-16	56	497.09	1,872.55
average								<b>489.14</b>	<b>1,855.69</b>
1	C70OSP30	25.50	5.10	0.23727	23-Nov-15	20-Feb-16	90	563.97	1,824.45
2	C70OSP30	25.25	5.05	0.23773	23-Nov-15	20-Feb-16	90	618.48	1,864.37
3	C70OSP30	25.10	5.00	0.23733	23-Nov-15	20-Feb-16	90	559.59	1,891.08
average								<b>580.68</b>	<b>1,859.96</b>

ตาราง ก-5 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์พิเศษซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือก  
หอยนางรมบด 40% (C60OSP40) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40

Code : C60OSP40 w/b : 0.40

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	C60OSP40	25.40	5.10	0.22614	9-Mar-16	16-Mar-16	7	298.68	1,745.85
2	C60OSP40	25.60	5.12	0.22757	9-Mar-16	16-Mar-16	7	337.44	1,736.22
3	C60OSP40	24.90	4.98	0.22607	9-Mar-16	16-Mar-16	7	344.38	1,823.12
average								<b>326.83</b>	<b>1,768.40</b>
1	C60OSP40	25.50	5.10	0.23029	24-Feb-16	9-Mar-16	14	382.31	1,770.78
2	C60OSP40	25.25	5.05	0.23273	24-Feb-16	9-Mar-16	14	356.78	1,825.15
3	C60OSP40	25.10	5.00	0.22970	24-Feb-16	9-Mar-16	14	380.76	1,830.28
average								<b>373.28</b>	<b>1,808.74</b>
1	C60OSP40	24.90	4.98	0.23419	25-Jan-16	22-Feb-16	28	422.69	1,888.60
2	C60OSP40	25.50	5.10	0.23535	25-Jan-16	22-Feb-16	28	394.31	1,809.69
3	C60OSP40	25.00	5.00	0.23655	25-Jan-16	22-Feb-16	28	391.30	1,892.40
average								<b>402.77</b>	<b>1,863.56</b>
1	C60OSP40	24.85	5.02	0.23582	17-Dec-16	13-Feb-16	56	446.32	1,890.46
2	C60OSP40	24.90	4.98	0.23535	17-Dec-16	13-Feb-16	56	437.52	1,897.95
3	C60OSP40	25.25	5.00	0.23476	17-Dec-16	13-Feb-16	56	451.38	1,859.49
average								<b>445.07</b>	<b>1,882.63</b>
1	C60OSP40	24.90	4.98	0.24035	24-Nov-15	21-Feb-16	90	482.10	1,938.28
2	C60OSP40	25.50	5.10	0.23800	24-Nov-15	21-Feb-16	90	552.72	1,830.07
3	C60OSP40	25.00	5.00	0.24050	24-Nov-15	21-Feb-16	90	542.68	1,924.00
average								<b>525.83</b>	<b>1,897.45</b>

**ภาคผนวก ง.**

ผลการทดสอบค่าการหดตัวแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่ม 1-90 วัน  
โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30



ตาราง ง-1 ผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตอัดตัวของซีเมนต์พิเศษที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุ  
ประสานเพียงอย่างเดียว (C100) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30

Code : C100				w/b : 0.30			
Age	Sample 1	$X_0$	1.416	Sample 1	$X_0$	1.439	Average
	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	
1	1.416	1.416	0.00	1.439	1.439	0.00	0.00
7	1.416	1.204	149.72	1.439	1.268	118.83	134.28
14	1.416	1.117	211.16	1.439	1.170	186.94	199.05
21	1.416	1.061	250.71	1.439	1.100	235.58	243.14
28	1.416	1.012	285.31	1.439	1.062	261.99	273.65
35	1.416	0.973	312.85	1.439	1.019	291.87	302.36
42	1.416	0.956	324.86	1.439	1.002	303.68	314.27
49	1.416	0.906	360.17	1.439	0.952	338.43	349.30
56	1.416	0.896	367.23	1.439	0.942	345.38	356.31
63	1.416	0.875	382.06	1.439	0.927	355.80	368.93
70	1.416	0.864	389.83	1.439	0.916	363.45	376.64
77	1.416	0.861	391.95	1.439	0.915	364.14	378.05
84	1.416	0.859	393.36	1.439	0.915	364.14	378.75
90	1.416	0.858	394.07	1.439	0.906	370.40	382.23

ตาราง ง-2 ผลการทดสอบการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 10 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30

Code : C90GOS10

w/b : 0.30

Age	Sample 1	$X_0$	1.317	Sample 1	$X_0$	1.545	Average
	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %		$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	
1	1.317	1.317	0.00	1.545	1.545	0.00	0.00
7	1.317	1.131	141.23	1.545	1.346	128.80	135.02
14	1.317	1.001	239.94	1.545	1.246	193.53	216.73
21	1.317	0.930	293.85	1.545	1.177	238.19	266.02
28	1.317	0.879	332.57	1.545	1.129	269.26	300.91
35	1.317	0.852	353.08	1.545	1.095	291.26	322.17
42	1.317	0.833	367.50	1.545	1.077	302.91	335.21
49	1.317	0.802	391.04	1.545	1.039	327.51	359.27
56	1.317	0.797	394.84	1.545	1.035	330.10	362.47
63	1.317	0.774	412.30	1.545	1.012	344.98	378.64
70	1.317	0.764	419.89	1.545	0.987	361.17	390.53
77	1.317	0.761	422.17	1.545	0.985	362.46	392.32
84	1.317	0.759	423.69	1.545	0.984	363.11	393.40
90	1.317	0.752	429.01	1.545	0.971	371.52	400.26



ตาราง ง-3 ผลการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 20 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30

Code : C80GOS20				w/b : 0.30			
Age	Sample 1	X <sub>0</sub>	1.095	Sample 1	X <sub>0</sub>	1.010	Average
	L <sub>0</sub> (mm.)	X <sub>1</sub> (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	L <sub>0</sub> (mm.)	X <sub>1</sub> (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	
1	1.095	1.095	0.00	1.010	1.010	0.00	0.00
7	1.095	0.955	127.85	1.010	0.855	153.47	140.66
14	1.095	0.847	226.48	1.010	0.742	265.35	245.92
21	1.095	0.790	278.54	1.010	0.683	323.76	301.15
28	1.095	0.740	324.20	1.010	0.638	368.32	346.26
35	1.095	0.677	381.74	1.010	0.579	426.73	404.23
42	1.095	0.657	400.00	1.010	0.560	445.54	422.77
49	1.095	0.602	450.23	1.010	0.503	501.98	476.10
56	1.095	0.594	457.53	1.010	0.496	508.91	483.22
63	1.095	0.579	471.23	1.010	0.481	523.76	497.50
70	1.095	0.564	484.93	1.010	0.471	533.66	509.30
77	1.095	0.562	486.76	1.010	0.470	534.65	510.71
84	1.095	0.561	487.67	1.010	0.470	534.65	511.16
90	1.095	0.549	498.63	1.010	0.463	541.58	520.11

ตาราง ง-4 ผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตอัดแรงชนิดพิเศษซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 30 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30

Code : C70GOS30				w/b : 0.30			
Age	Sample 1	$X_0$	1.672	Sample 1	$X_0$	1.160	Average
	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	
1	1.672	1.672	0.00	1.160	1.160	0.00	0.00
7	1.672	1.088	349.28	1.160	0.946	184.48	266.88
14	1.672	0.890	467.70	1.160	0.840	275.86	371.78
21	1.672	0.804	519.14	1.160	0.804	306.90	413.02
28	1.672	0.788	528.71	1.160	0.783	325.00	426.85
35	1.672	0.744	555.02	1.160	0.776	331.03	443.03
42	1.672	0.715	572.37	1.160	0.742	360.34	466.36
49	1.672	0.698	582.54	1.160	0.718	381.03	481.79
56	1.672	0.658	606.46	1.160	0.672	420.69	513.57
63	1.672	0.644	614.83	1.160	0.660	431.03	522.93
70	1.672	0.640	617.22	1.160	0.658	432.76	524.99
77	1.672	0.624	626.79	1.160	0.643	445.69	536.24
84	1.672	0.619	629.78	1.160	0.640	448.28	539.03
90	1.672	0.614	632.78	1.160	0.638	450.00	541.39

ตาราง ง-5 ผลการทดสอบการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 40 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30

Code :

C60GOS40

w/b :

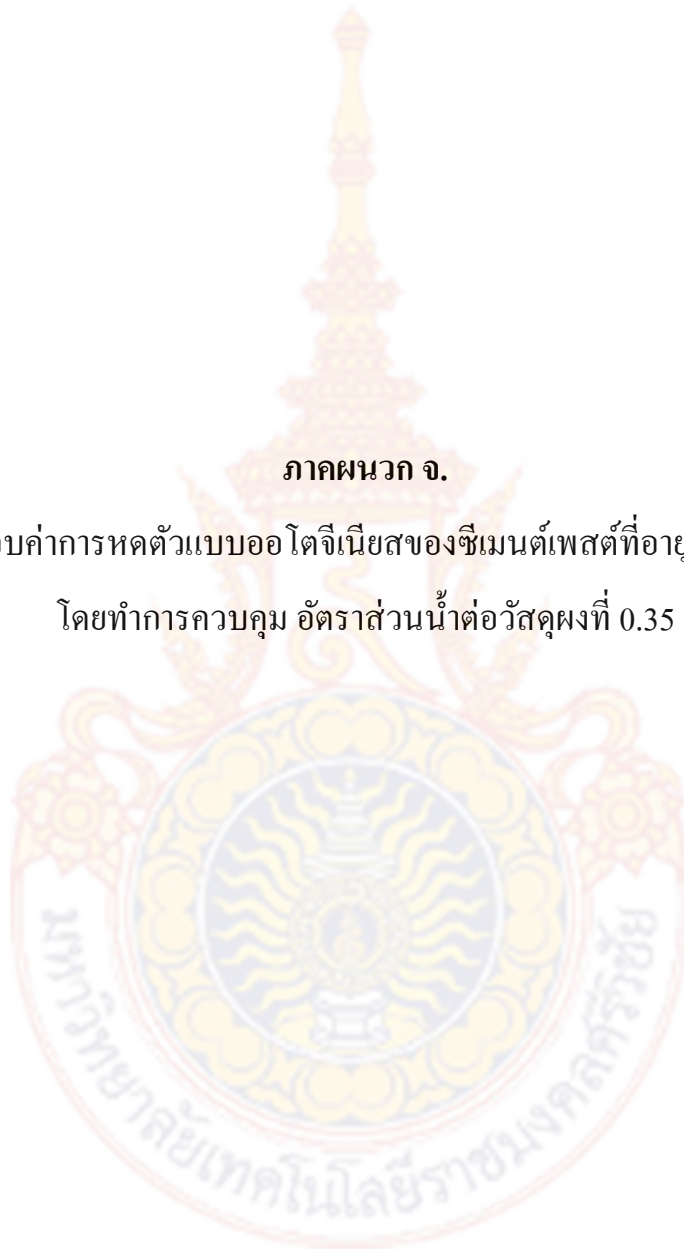
0.30

Age	Sample 1	$X_0$	1.774	Sample 1	$X_0$	1.141	Average
	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %		$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	
1	1.774	1.774	0.00	1.141	1.141	0.00	0.00
7	1.774	0.951	463.92	1.141	0.896	214.72	339.32
14	1.774	0.848	521.98	1.141	0.815	285.71	403.85
21	1.774	0.789	555.24	1.141	0.756	337.42	446.33
28	1.774	0.762	570.46	1.141	0.750	342.68	456.57
35	1.774	0.712	598.65	1.141	0.690	395.27	496.96
42	1.774	0.702	604.28	1.141	0.678	405.78	505.03
49	1.774	0.666	624.58	1.141	0.643	436.46	530.52
56	1.774	0.667	624.01	1.141	0.641	438.21	531.11
63	1.774	0.649	634.16	1.141	0.627	450.48	542.32
70	1.774	0.641	638.67	1.141	0.613	462.75	550.71
77	1.774	0.632	643.74	1.141	0.612	463.63	553.69
84	1.774	0.624	648.25	1.141	0.612	463.63	555.94
90	1.774	0.622	649.38	1.141	0.610	465.38	557.38

**ภาคผนวก จ.**

ผลการทดสอบค่าการหดตัวแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่ม 1-90 วัน

โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35



ตาราง จ-1 ผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตอัดแรงชนิดพิเศษที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุ  
ประสานเพียงอย่างเดียว (C100) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35

Code : C100				w/b : 0.35			
Age	Sample 1	$X_0$	1.365	Sample 1	$X_0$	1.328	Average
	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	
1	1.365	1.365	0	1.328	1.328	0	0
7	1.365	1.146	160.43	1.328	1.114	161.14	160.79
14	1.365	1.071	215.38	1.328	1.026	227.40	221.39
21	1.365	1.003	265.20	1.328	0.958	278.61	271.90
28	1.365	0.976	284.98	1.328	0.935	295.93	290.45
35	1.365	0.927	320.87	1.328	0.878	338.85	329.86
42	1.365	0.905	336.99	1.328	0.860	352.40	344.70
49	1.365	0.865	366.30	1.328	0.820	382.53	374.41
56	1.365	0.862	368.49	1.328	0.816	385.54	377.02
63	1.365	0.855	373.62	1.328	0.802	396.08	384.85
70	1.365	0.830	391.94	1.328	0.784	409.63	400.79
77	1.365	0.826	394.87	1.328	0.781	411.89	403.38
84	1.365	0.824	396.33	1.328	0.776	415.66	405.99
90	1.365	0.818	400.73	1.328	0.764	424.69	412.71



ตาราง จ-2 ผลการทดสอบการหดตัวของแบบบ่อโอดีนิยของซีเมนต์เฟสค์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 10 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35

Code : C90GOS10				w/b : 0.35			
Age	Sample 1	$X_0$	1.233	Sample 1	$X_0$	1.266	Average
	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	
1	1.233	1.233	0	1.266	1.266	0	0
7	1.233	1.060	140.30	1.266	1.082	145.33	142.82
14	1.233	0.977	207.62	1.266	0.999	210.90	209.26
21	1.233	0.915	257.90	1.266	0.938	259.08	258.49
28	1.233	0.857	304.94	1.266	0.883	302.52	303.73
35	1.233	0.806	346.30	1.266	0.829	345.18	345.74
42	1.233	0.780	367.39	1.266	0.805	364.13	365.76
49	1.233	0.734	404.70	1.266	0.758	401.26	402.98
56	1.233	0.721	415.24	1.266	0.751	406.79	411.02
63	1.233	0.699	433.09	1.266	0.730	423.38	428.23
70	1.233	0.685	444.44	1.266	0.714	436.01	440.23
77	1.233	0.683	446.06	1.266	0.710	439.17	442.62
84	1.233	0.682	446.87	1.266	0.707	441.54	444.21
90	1.233	0.666	459.85	1.266	0.695	451.02	455.44

ตาราง จ-3 ผลการทดสอบการหดตัวแบบบอโตยีเนยของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 20 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35

Code : C80GOS20

w/b : 0.35

Age	Sample 1	$X_0$	1.166	Sample 1	$X_0$	1.160	Average
	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %		$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	
1	1.166	1.166	0	1.160	1.160	0	0
7	1.166	1.025	120.92	1.160	1.028	113.79	117.35
14	1.166	0.903	225.55	1.160	0.917	209.48	217.52
21	1.166	0.849	271.86	1.160	0.853	264.65	268.26
28	1.166	0.802	312.17	1.160	0.808	303.44	307.81
35	1.166	0.740	365.35	1.160	0.745	357.75	361.55
42	1.166	0.713	388.50	1.160	0.719	380.17	384.34
49	1.166	0.650	442.53	1.160	0.656	434.48	438.51
56	1.166	0.636	454.54	1.160	0.638	450.00	452.27
63	1.166	0.621	467.40	1.160	0.619	466.37	466.89
70	1.166	0.602	483.70	1.160	0.598	484.48	484.09
77	1.166	0.600	485.42	1.160	0.594	487.93	486.67
84	1.166	0.599	486.27	1.160	0.592	489.65	487.96
90	1.166	0.588	495.71	1.160	0.597	485.34	490.52

ตาราง จ-4 ผลการทดสอบการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 30 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35

Code : C70GOS30				w/b : 0.35			
Age	Sample 1	$X_0$	1.253	Sample 1	$X_0$	1.031	Average
	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	
1	1.253	1.253	0	1.031	1.031	0	0
7	1.253	1.066	149.24	1.031	0.864	161.9	155.61
14	1.253	0.982	216.28	1.031	0.769	254.12	235.20
21	1.253	0.896	284.91	1.031	0.693	327.83	306.37
28	1.253	0.846	324.82	1.031	0.644	375.36	350.09
35	1.253	0.819	346.36	1.031	0.604	414.16	380.26
42	1.253	0.776	380.68	1.031	0.583	434.53	407.60
49	1.253	0.736	412.60	1.031	0.537	479.14	445.87
56	1.253	0.733	415.00	1.031	0.535	481.08	448.04
63	1.253	0.709	434.15	1.031	0.510	505.33	469.74
70	1.253	0.694	446.12	1.031	0.497	517.94	482.03
77	1.253	0.691	448.52	1.031	0.495	519.88	484.20
84	1.253	0.690	449.32	1.031	0.491	523.76	486.54
90	1.253	0.677	459.69	1.031	0.479	535.40	497.54

ตาราง จ-5 ผลการทดสอบการหดตัวของแบบอโดจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 40 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35

Code : C60GOS40

w/b : 0.35

Age	Sample 1	$X_0$	1.059	Average
	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	
1	1.059	1.059	0.00	0
7	1.059	0.857	190.75	195.00
14	1.059	0.708	331.44	325.50
21	1.059	0.693	345.61	345.27
28	1.059	0.662	374.88	374.47
35	1.059	0.649	387.16	387.66
42	1.059	0.617	417.37	417.80
49	1.059	0.600	433.43	433.35
56	1.059	0.559	472.14	472.91
63	1.059	0.540	490.08	487.52
70	1.059	0.542	488.20	494.10
77	1.059	0.523	506.14	512.00
84	1.059	0.518	510.86	516.71
90	1.059	0.513	515.58	521.42

**ภาคผนวก จ.**

ผลการทดสอบค่าการหดตัวแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่ม 1-90 วัน

โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40





ตาราง ฉ-1 ผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตอัดแรงชนิดพิเศษที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุ  
ประสานเพียงอย่างเดียว (C100) โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40

Code : C100				w/b : 0.40			
Age	Sample 1	$X_0$	1.334	Sample 1	$X_0$	1.326	Average
	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	
1	1.334	1.334	0	1.326	1.326	0	0
7	1.334	1.148	139.43	1.326	1.147	134.99	137.21
14	1.334	1.018	236.88	1.326	1.012	236.80	236.84
21	1.334	0.997	252.62	1.326	0.988	254.90	253.76
28	1.334	0.971	272.11	1.326	0.952	282.05	277.08
35	1.334	0.945	291.60	1.326	0.933	296.38	293.99
42	1.334	0.913	315.59	1.326	0.896	324.28	319.93
49	1.334	0.897	327.58	1.326	0.877	338.61	333.09
56	1.334	0.834	374.81	1.326	0.826	377.07	375.94
63	1.334	0.814	389.80	1.326	0.809	389.89	389.84
70	1.334	0.810	392.80	1.326	0.802	395.17	393.98
77	1.334	0.803	398.05	1.326	0.782	410.25	404.15
84	1.334	0.795	404.04	1.326	0.776	414.78	409.41
90	1.334	0.769	423.53	1.326	0.771	418.55	421.04

ตาราง ฉ-2 ผลการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์  
ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 10 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40

Code : C90GOS10				w/b : 0.40			
Age	Sample 1	$X_0$	1.244	Sample 1	$X_0$	1.174	Average
	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	
1	1.244	1.244	0	1.174	1.174	0	0
7	1.244	1.126	94.85	1.174	1.044	110.73	102.79
14	1.244	1.036	167.20	1.174	0.936	202.72	184.96
21	1.244	0.943	241.96	1.174	0.853	273.42	257.69
28	1.244	0.887	286.97	1.174	0.793	324.53	305.75
35	1.244	0.838	326.36	1.174	0.748	362.86	344.61
42	1.244	0.809	349.67	1.174	0.720	386.71	368.19
49	1.244	0.760	389.06	1.174	0.670	429.30	409.18
56	1.244	0.744	401.92	1.174	0.657	440.37	421.15
63	1.244	0.717	423.63	1.174	0.630	463.37	443.50
70	1.244	0.699	438.10	1.174	0.619	472.74	455.42
77	1.244	0.695	441.31	1.174	0.617	474.44	457.88
84	1.244	0.692	443.72	1.174	0.616	475.29	459.51
90	1.244	0.673	459.00	1.174	0.600	488.92	473.96

ตาราง น-3 ผลการทดสอบการหดตัวของแบบอโดจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 20 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40

Code : C80GOS20

w/b : 0.40

Age	Sample 1	$X_0$	1.098	Sample 1	$X_0$	1.274	Average
	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %		$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	
1	1.098	1.098	0	1.274	1.274	0	0
7	1.098	0.966	120.21	1.274	1.147	99.68	109.95
14	1.098	0.883	195.81	1.274	1.057	170.32	183.07
21	1.098	0.810	262.29	1.274	0.986	226.05	244.17
28	1.098	0.754	313.29	1.274	0.924	274.72	294.01
35	1.098	0.695	367.03	1.274	0.867	319.46	343.24
42	1.098	0.665	394.35	1.274	0.833	346.15	370.25
49	1.098	0.611	443.53	1.274	0.773	393.24	418.39
56	1.098	0.594	459.01	1.274	0.758	405.02	432.02
63	1.098	0.572	479.05	1.274	0.736	422.29	450.67
70	1.098	0.553	496.35	1.274	0.716	437.99	467.17
77	1.098	0.549	500.00	1.274	0.710	442.70	471.35
84	1.098	0.547	501.82	1.274	0.707	445.05	473.43
90	1.098	0.531	516.39	1.274	0.692	456.82	486.61

ตาราง ฅ-4 ผลการทดสอบการหดตัวแบบอโดจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 30 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40

Code : C70GOS30				w/b : 0.40			
Age	Sample 1	$X_0$	1.175	Sample 1	$X_0$	1.122	Average
	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	$L_0$ (mm.)	$X_1$ (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	
1	1.175	1.175	0	1.122	1.122	0	0
7	1.175	0.985	161.70	1.122	0.968	137.25	149.47
14	1.175	0.890	242.55	1.122	0.890	206.77	224.66
21	1.175	0.817	304.68	1.122	0.790	295.90	300.29
28	1.175	0.773	342.12	1.122	0.791	295.00	318.56
35	1.175	0.691	411.91	1.122	0.725	353.83	382.87
42	1.175	0.705	400.00	1.122	0.611	455.43	427.71
49	1.175	0.662	436.59	1.122	0.621	446.52	441.55
56	1.175	0.657	440.85	1.122	0.611	455.43	448.14
63	1.175	0.635	459.57	1.122	0.589	475.04	467.30
70	1.175	0.618	474.04	1.122	0.554	506.23	490.14
77	1.175	0.612	479.14	1.122	0.548	511.58	495.36
84	1.175	0.606	484.25	1.122	0.546	513.36	498.81
90	1.175	0.606	484.25	1.122	0.540	518.71	501.48

ตาราง ฅ-5 ผลการทดสอบการหดตัวแบบออโดจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมบด 40 % โดยทำการควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.40

Code : C60GOS40				w/b : 0.40			
Age	Sample 1	X <sub>0</sub>	0.947	Sample 1	X <sub>0</sub>	1.225	Average
	L <sub>0</sub> (mm.)	X <sub>1</sub> (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	L <sub>0</sub> (mm.)	X <sub>1</sub> (mm.)	$\Delta L/L_0(10^{-3})$ %	
1	0.947	0.947	0	1.225	1.225	0	0
7	0.947	0.859	92.92	1.225	1.128	79.18	86.05
14	0.947	0.768	189.01	1.225	1.017	169.79	179.40
21	0.947	0.700	260.82	1.225	0.948	226.12	243.47
28	0.947	0.660	303.06	1.225	0.896	268.57	285.81
35	0.947	0.590	376.97	1.225	0.824	327.34	352.16
42	0.947	0.563	405.49	1.225	0.797	349.38	377.43
49	0.947	0.496	476.24	1.225	0.730	404.08	440.16
56	0.947	0.470	503.69	1.225	0.689	437.55	470.62
63	0.947	0.447	527.98	1.225	0.687	439.18	483.58
70	0.947	0.423	553.32	1.225	0.665	457.14	505.23
77	0.947	0.411	565.99	1.225	0.661	460.40	513.20
84	0.947	0.406	571.27	1.225	0.659	462.04	516.65
90	0.947	0.390	588.17	1.225	0.645	473.46	530.82



ภาคผนวก ช.

ภาพขั้นตอนการปฏิบัติงาน





ภาพที่ ข-1 ผงเปลือกหอยนางรมบด



ภาพที่ ข-2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ภาพที่ ข-3 ตะแกรงร่อนมาตรฐาน



ภาพที่ ข-4 ทดสอบความถ่วงจำเพาะ



ภาพที่ ข-5 ผสมด้วยเครื่องผสมซีเมนต์เพสต์



ภาพที่ ข-6 ทดสอบระยะเวลาการก่อตัว  
เริ่มต้นและระยะสุดท้าย



ภาพที่ ข-7 หล่อก้อนตัวอย่าง



ภาพที่ ข-8 หล่อก้อนตัวอย่าง



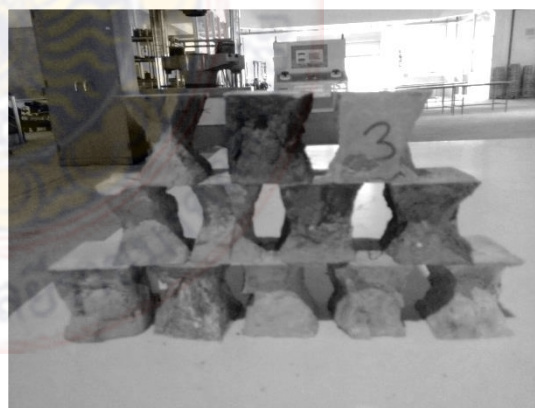
ภาพที่ ข-9 บ่มตัวอย่างด้วยน้ำสะอาด



ภาพที่ ข-10 บ่มตัวอย่างแบบแห้ง



ภาพที่ ข-11 ทดสอบกำลังอัด



ภาพที่ ข-12 การวิบัติเกิดจากการรับแรงอัด



ภาพที่ ข-13 เตรียมตัวอย่างรอการทดสอบ



ภาพที่ ข-14 การทดสอบระยะการหดตัว