

สมบัติด้านกำลังอัดและการหดตัวแบบออโตจีเนียส ของซีเมนต์เพสต์ผสมเปลือกหอยนางรมบด Compressive Strength and Autogenous Shrinkage Properties of Cement Paste Containing Ground Oyster Shell

ทวิช กล้าแท้*

สาขาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
วิทยาเขตนครศรีธรรมราช ตำบลท้องเนียน อำเภอนบพิตำ จังหวัดนครศรีธรรมราช 80210

ภูสิต ห่อเพชร

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ตำบลไทยบุรี อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช 80160

Tawich Klathae*

Department of Civil Engineering, College of Industrial Technology and Management,
Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Si Thammarat Campus,
Thongniam, Khanom, Nakhon Si Thammarat 80210

Phusit Horpet

Department of Marine Science, School of Science, Walailak University,
Thaiburi, Thasala, Nakhon Si Thammarat 80160

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากำลังอัดและการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เปลือกหอยนางรมบด (GOS) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 ทดสอบสมบัติของซีเมนต์เพสต์ ได้แก่ กำลังอัด และการหดตัวแบบออโตจีเนียส ผลการวิจัยพบว่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย GOS ที่อัตราส่วนร้อยละ 10 นั้น มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม (OPC100) ที่อายุ 90 วัน และมีการลดลงของกำลังอัดเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ GOS ที่ร้อยละ 20, 30 และ 40 ตามลำดับ ในส่วนของการหดตัวแบบออโตจีเนียสพบว่าซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย GOS นั้น มีค่าสูงกว่า OPC100 และเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ

*ผู้รับผิดชอบบทความ : tawich.k@mutsv.ac.th

คำสำคัญ : เปลือกหอยนางรมบด; กำลั้งอัด; การหดตัวแบบออโตจีเนียส

Abstract

This research aims to study the compressive strength and autogenous shrinkage properties of cement paste containing ground oyster shell. The cement was replaced with ground oyster shell (GOS) 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. In the experiment, the compressive strength and autogenous shrinkage of the cement paste. The result showed that the compressive strength of the cement paste which replaced cement with of GOS at the proportion of 10 % by the weight of the binder had compressive strength similar to control cement paste (OPC100) at 90 days and a decrease in compressive strengths upon increased addition of GOS at the proportion of 20, 30 and 40 % by the weight of the binder, respectively. For autogenous shrinkage, it appears that the cement paste replaced by GOS had higher rates of shrinkage than that cement paste (OPC100), and the values of shrinkage was higher at higher level of GOS replacement.

Keywords: ground oyster shell; compressive strength; autogenous shrinkage

1. บทนำ

ประเทศไทยมีชายฝั่งทะเลด้านอ่าวไทยครอบคลุมพื้นที่ 17 จังหวัด และชายฝั่งด้านทะเลอันดามันครอบคลุมพื้นที่ 6 จังหวัด รวมแล้วมีความยาวทั้งสิ้นประมาณ 3,148.23 กิโลเมตร ปัจจุบันพื้นที่ชายฝั่งทะเลใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย ได้แก่ กิจกรรมการท่องเที่ยว เป็นแหล่งอยู่อาศัยของชุมชนริมทะเลอุตสาหกรรม การคมนาคมทางน้ำ การประมง การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เป็นต้น [1] การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของไทยได้พัฒนาขยายตัวอย่างรวดเร็ว ด้านหนึ่งเป็นผลจากการลดลงของผลผลิตสัตว์น้ำที่จับได้จากแหล่งน้ำตามธรรมชาติ และอีกด้านหนึ่งเป็นผลจากการขยายตัวของความต้องการสินค้าสัตว์น้ำทั้งในส่วนของตลาดการค้าภายในประเทศและตลาดการค้าระหว่างประเทศ ทำให้เกิดการพัฒนาการวิธีการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำหลากหลายชนิดเพื่อเป็นสินค้าทดแทนสินค้าสัตว์น้ำ

ที่จับได้จากแหล่งธรรมชาติ [2] ซึ่งหอยทะเลเป็นทรัพยากรสัตว์น้ำอีกประเภทหนึ่งที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ เนื่องจากเป็นอาหารโปรตีนราคาถูกกว่าสัตว์น้ำทะเลประเภทอื่น ๆ ซึ่งเป็นที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลาย และนิยมเพิ่มมากขึ้นทุก ๆ ปี ดังนั้นเพื่อให้มีปริมาณหอยเพียงพอต่อความต้องการบริโภค จึงมีการพัฒนาและส่งเสริมการเพาะเลี้ยงหอยทะเลตามแนวพื้นที่ จังหวัดชายฝั่งทะเลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2523 เป็นต้นมา และจากการสำรวจสถิติการเลี้ยงหอยทะเล โดยสำรวจปริมาณผลผลิตของหอยทะเลจากฟาร์มเลี้ยงและการเก็บรวบรวมจากปึกโป๊ะ ในแนวพื้นที่จังหวัดชายฝั่งทะเลของประเทศไทย รวมทั้งกรุงเทพมหานครพบว่าหอยทะเลที่นิยมเลี้ยงกันมาก ได้แก่ หอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยนางรม โดยในปี พ.ศ. 2557 มีผลผลิตของหอยทั้งหมด 183,568.86 ตัน เมื่อจำแนกผลผลิตออกตามชนิดพบว่า เป็นผลผลิตหอยแครง

53,716.86 ตัน หอยแมลงภู่ 117,013.47 ตัน และหอยนางรม 12,838.53 ตัน [3] จากปริมาณผลผลิตและความต้องการบริโภคที่สูงขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณเปลือกหอยที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารจำนวนมาก ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้ด้วยการเผาไหม้ ทำได้เพียงกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบเท่านั้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาสมบัติด้านกำลังอัดและการหดตัวแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ผสมเปลือกหอยนางรมบด ซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติที่ไม่ผ่านกระบวนการเผา ซึ่งเป็นการช่วยลดขยะในชุมชนและขยะจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเล และยังส่งเสริมการรักษาสภาพแวดล้อมอีกทางหนึ่ง ซึ่งจะนำไปสู่การใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างเหมาะสมและเป็นทางเลือกใหม่ต่อไปในอนาคต

หอยนางรมที่เลี้ยงในประเทศไทยแยกเป็น 2 ชนิดหลัก คือ หอยตะโกรม ซึ่งเป็นหอยนางรมขนาดใหญ่ และหอยฝาจีบ ซึ่งเป็นหอยนางรมขนาดเล็ก ในส่วนของหอยตะโกรมยังแยกเป็นหอยตะโกรมกรมขาว (*Crassostrea belcheri*) พบเลี้ยงกันทางภาคใต้ที่ สุราษฎร์ธานี กระบี่ พังงา และสงขลา และทางภาคตะวันออกมีเลี้ยงที่จันทบุรี หอยตะโกรมกรมดำ (*Crassostrea lugubris*) มีขนาดเล็กกว่าหอยตะโกรมกรมขาว ส่วนมากเลี้ยงกันในภาคตะวันออกที่จันทบุรี ชลบุรี และตราด ส่วนภาคใต้พบเลี้ยงที่ประจวบคีรีขันธ์ และระนอง ส่วนหอยฝาจีบ (*Saccostrea comerialis*) เลี้ยงกันมากในภาคตะวันออก [2] ซึ่งเปลือกหอยนางรมมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณร้อยละ 96 และความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.35-2.47 โดยขึ้นอยู่กับขนาดของเปลือกหอยบด หากบดละเอียดมากความถ่วงจำเพาะจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม โดยส่วนประกอบหลักของเปลือกหอย ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งส่วนใหญ่มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 โดยที่แคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยมี

โครงสร้างผลึก [4-7] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Yoon และคณะ [8] ซึ่งศึกษาสมบัติเชิงกลของเปลือกหอยนางรมบดโดยการทดสอบแรงบดในมอร์ตาร์ จากผลการทดสอบพบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในรูปผลึกของแคลไซต์เป็นส่วนประกอบหลักของเปลือกหอยนางรม มีลักษณะรูปร่างแบนและกลม มีความถ่วงจำเพาะ 2.38-2.41 ในขณะที่ Lertwattanaruk และคณะ [9] ได้ศึกษาการนำเปลือกหอยชนิดต่าง ๆ 4 ชนิด เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์สำหรับก่ออิฐและฉาบปูน โดยได้นำเปลือกหอยทะเล ได้แก่ เปลือกหอยลายบด เปลือกหอยแมลงภู่บด เปลือกหอยนางรมบด และเปลือกหอยแครงบด ทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยผลการทดสอบพบว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีหลักของเปลือกหอยลายบด เปลือกหอยแมลงภู่บด เปลือกหอยนางรมบด และเปลือกหอยแครงบด โดยมีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 96-97 อีกทั้งยังพบว่าการเพิ่มร้อยละการแทนที่เปลือกหอยบดในปูนซีเมนต์ ทำให้ค่าระยะการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายมีค่าสูงขึ้น ในส่วนของผลกระทบด้านกำลังรับแรงอัด พบว่าการเพิ่มร้อยละการแทนที่เปลือกหอยบดทั้ง 4 ชนิด ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Othman และคณะ [10] ซึ่งศึกษาเจ้าเปลือกหอยแครงเป็นวัสดุสำหรับการทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีต โดยตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเจ้าหอยแครงและเปลือกโดยใช้การวิเคราะห์ XRF และการสังเกตของโครงสร้างอนุภาคด้วย SEM และทดแทนปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15, 25 และ 50 ที่อายุการบ่ม 7, 28, 90 และ 120 วัน ผลการทดลองพบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเจ้าหอยแครงมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ

กับคอนกรีตควบคุม อีกทั้งการทดสอบผลกระทบด้านสมบัติการหดตัวแบบแห้งของ Lertwattanaruk และคณะ [9] ยังพบอีกว่าการเพิ่มร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยลายบดและเปลือกหอยนางรมบดนั้น ทำให้ร้อยละการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมโดยมอร์ตาร์ผสมเปลือกหอยลายบด และมีแนวโน้มว่าการหดตัวลดลงมากกว่าเปลือกหอยนางรมบด ในขณะที่การเพิ่มร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยแมลงภู่บดและเปลือกหอยแครงบด ทำให้ร้อยละการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม โดยมอร์ตาร์ผสมเปลือกหอยแมลงภู่บดมีแนวโน้มว่าการหดตัวเพิ่มขึ้นมากกว่าเปลือกหอยแครงบด ซึ่งต่อมา Olivia และคณะ [11] ก็ได้ศึกษาผงเปลือกหอยแครงเผาบด ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เป็นวัสดุสำหรับการทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีต โดยทดแทนปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, และ 8 โดยผลการทดลองพบว่าคอนกรีตผสมหอยแครงเผาบด สามารถต้านทานแรงดึงและแรงดัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม

2. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC), ASTM C150 [12]

2.1.2 เปลือกหอยนางรมบด (GOS) จากบริษัท สยามแวร์ม ออแกนิก วิสาหกิจ เพื่อสังคม จำกัด

2.1.3 น้ำสะอาด

2.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.2.1 การเตรียมเตรียมตัวอย่างเปลือกหอยนางรมบด โดยนำเปลือกหอยนางรมมาทำความสะอาดและทำให้แห้ง จากนั้นบดเปลือกหอยโดยไม่ผ่านการเผาด้วยเครื่องบดหยาบเป็นเวลา 4 ชม. เมื่อ

เปลือกหอยบดสามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.47 มิลลิเมตร) แล้วนำไปบดต่อด้วยเครื่องบดอนุภาคแบบบอลมิลล์ เป็นเวลา 2 ชม. เพื่อให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 100 (0.149 มิลลิเมตร) แล้วนำเปลือกหอยบดมาอบให้แห้งในตู้อบที่มีอุณหภูมิ $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.2.2 อัตราส่วนผสมระหว่างผงเปลือกหอยนางรมบดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จำนวน 5 อัตราส่วนผสม คือ ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ควบคุม W/B ที่ 0.30 โดยอัตราส่วนผสมวัสดุประสานและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 Mixture proportions

ส่วนผสม	ร้อยละการแทนที่		W/B
	OPC	GOS	
OPC100	100	-	0.30
OPC90GOS10	90	10	0.30
OPC80GOS20	80	20	0.30
OPC70GOS30	70	30	0.30
OPC60GOS40	60	40	0.30

OPC = ordinary Portland cement type I, GOS = ground oyster shell

2.2.3 การทดสอบสมบัติของวัสดุ ได้แก่ การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี (XRF) การสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (LOI) ความถ่วงจำเพาะ ASTM C188 [13] ความละเอียดแบบเบลน ASTM C204 [14] ลักษณะทางจุลภาค (SEM) องค์ประกอบความเป็นผลึก (XRD) ระยะเวลาการก่อตัว ASTM C191 [15]

2.2.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัด ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม. ที่อายุ 3, 7, 28,

56 และ 90 วัน ควบคุม W/B ที่ 0.30 โดยค่าเฉลี่ยของกำลังอัดได้จากการทดสอบ 3 ก้อนตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM C 109 [16]

2.2.5 การหดตัวแบบออโตจีเนียส (auto-genous shrinkage) ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ขนาด 25 x 25 x 285 มม. ที่อายุ 13 สัปดาห์ ควบคุม W/B ที่ 0.30 โดยค่าเฉลี่ยการหดตัวแบบออโตจีเนียสได้จากการทดสอบ 3 ก้อนตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM C490 [17]

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

Sample	Specific gravity	Median particle size, d_{50} (μm)	Blaine fineness (cm^2/g)
OPC	3.15	16.50	3,400
GOS	2.59	60.53	1,200

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาสมบัติของวัสดุ

3.1.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

ตารางที่ 2 แสดงผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเปลือกหอยนางรมบด (GOS) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (OPC) พบว่า GOS มีลักษณะเป็นผงละเอียด มีสีคล้ายคลึงกับ OPC คือ สีเทา แต่มีสีอ่อนกว่าเล็กน้อย โดยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า OPC โดย GOS มีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.59 ซึ่งค่าพื้นที่ผิวจำเพาะหรือความละเอียดของ GOS มีค่าเท่ากับ 1,200 ตารางเซนติเมตร/กรัม ในส่วนของขนาดอนุภาคพบว่า OPC มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 16.50 ไมครอน และขนาดของอนุภาคของ GOS มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 60.53

ไมครอน ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า OPC โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าสามารถทำให้เกิดผลทางกายภาพด้านการอุดแทรกตัว (filler effect) ซึ่งจะเป็นผลดีต่อสมบัติด้านกำลังอัดโดยเฉพาะในช่วงต้น (early age)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

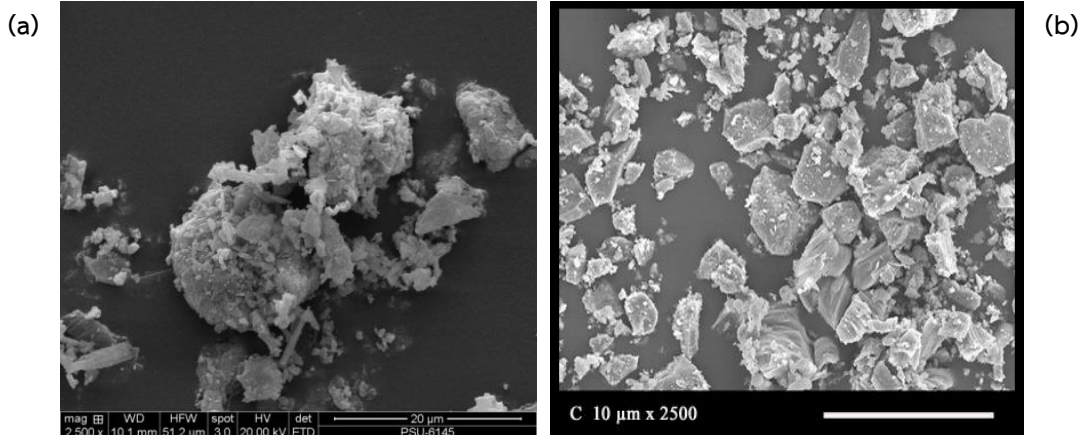
Chemical properties		OPC	GOS
Chemical composition (%)	Silicon dioxide (SiO_2)	20.8	4.31
	Aluminum oxide (Al_2O_3)	5.5	1.17
	Ferric oxide (Fe_2O_3)	3.16	0.40
	Calcium oxide (CaO)	64.97	48.85
	Magnesium oxide (MgO)	1.06	0.99
	Potassium oxide (K_2O)	0.55	0.14
	Sodium oxide (Na_2O)	0.08	0.87
	Sulfur trioxide (SO_3)	2.96	0.62
	Loss on ignition (L O I)	1.4	42.65

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ (ตารางที่ 3) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณของ CaO ร้อยละ 64.97 ส่วนขององค์ประกอบของ SiO_2 ใน OPC มีปริมาณร้อยละ 20.80 สำหรับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์และค่า LOI ตามที่มาตรฐาน ASTM C 150 [12] กำหนดไว้ต้องไม่เกินร้อยละ 6 ร้อยละ 3.5 และ 3 ตามลำดับ ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะเห็นได้ว่า OPC มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ทั้งหมด ในส่วนของเปลือกหอยนางรมบด (GOS) มีองค์ประกอบหลักเป็น CaO เช่นเดียวกับกับ OPC โดยมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 48.85 แต่ CaO ใน GOS นั้นจะอยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตเนื่องจาก GOS ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผา โดยปริมาณของ

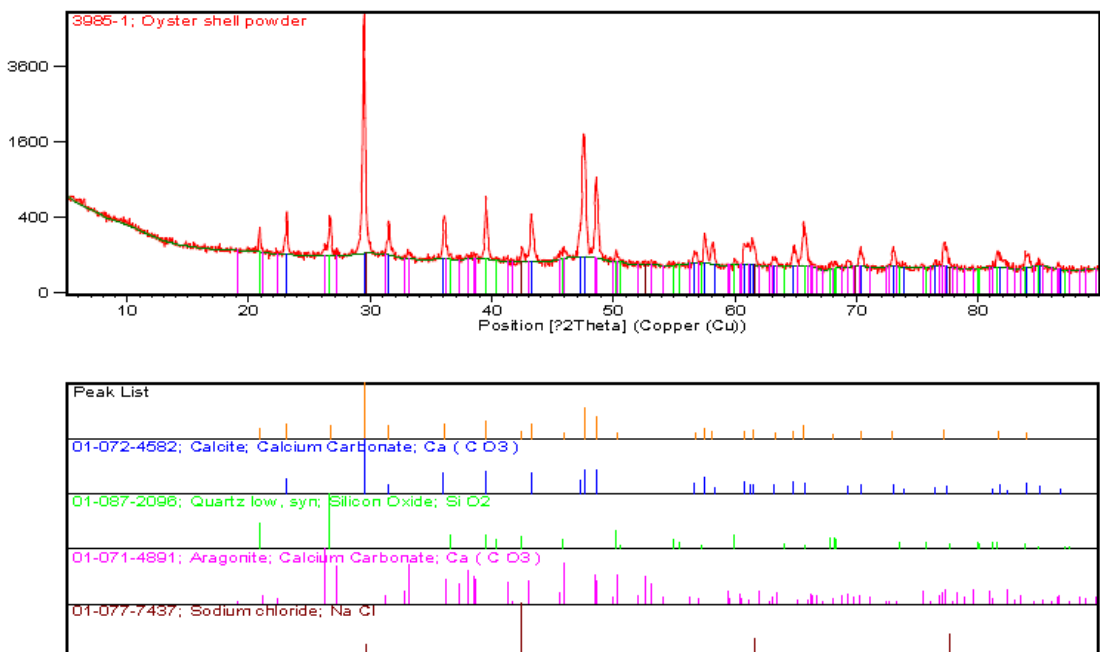
แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) อยู่ในช่วงร้อยละ 95.60 -97.13 [9] และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 4.31 ในขณะที่มีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) มีปริมาณต่ำมาก (ร้อยละ 1.17 และ 0.40 ตามลำดับ)

3.1.2 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุ (SEM)

จากรูปที่ 1a และ 1b แสดงผลการศึกษาลักษณะอนุภาคของเปลือกหอยนางรมบด (GOS) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (OPC) ที่กำลัง



รูปที่ 1 ภาพถ่ายวัสดุจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิด SEM โดย (a) เปลือกหอยนางรมบด (2,500x) และ (b) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (2,500x)



รูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์ X-ray diffraction (XRD) ของเปลือกหอยนางรมบด

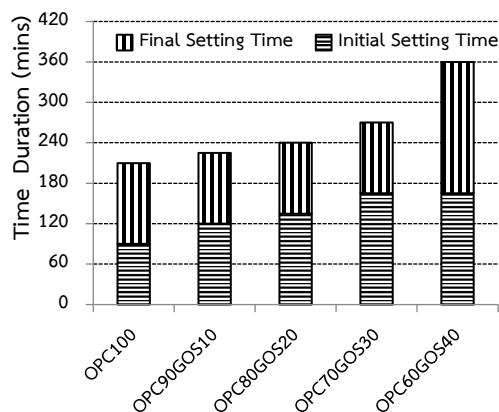
กำลังขยาย 2,500 เท่า พบว่า GOS อนุภาคมีลักษณะเป็นเหลี่ยมหลายมุม และบางส่วนมีลักษณะเป็นรูปร่างเรียวยาว มีขนาดอนุภาคเล็กใหญ่คละกัน พื้นที่ผิวค่อนข้างขรุขระแต่บางส่วนค่อนข้างเรียบ พรุณและมีช่องว่างภายใน อาจเป็นเพราะขนาดของอนุภาคที่ไม่ละเอียดมากนัก โดยประกอบด้วยอนุภาคเล็ก ๆ เกาะกันเป็นกลุ่มอย่างหลวม ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับ OPC ซึ่งมีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ตัน ไม่มีพรุณ พื้นที่ผิวขรุขระมากกว่า เพราะมีความละเอียดสูงกว่า GOS

3.1.3 องค์ประกอบความเป็นผลึกของเปลือกหอยนางรมบด (XRD)

รูปที่ 2 แสดงผลจากการวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอกซ์เรย์ ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) พบว่าเปลือกหอยนางรมบด (GOS) มีองค์ประกอบหลัก คือ calcium carbonate (CaCO_3) และองค์ประกอบรอง คือ silicon oxide (SiO_2) ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก พบว่ามีสถานะเป็นผลึก calcite (CaCO_3) และ quartz (SiO_2) โดยจุดยอด (Peak Intensity) จะปรากฏแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่มุม 2-theta เท่ากับ 29.469 ซึ่งโครงสร้างที่มีความเป็นผลึกมากจะทำให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาดำลง เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นผลึกจะมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งในการสลายพันธะต้องใช้พลังงานมาก ดังนั้นปฏิกิริยาจึงเกิดได้ยากขึ้น อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่า GOS มีองค์ประกอบที่เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [Ca(OH)_2] ซึ่งจะให้มีผลต่อสมบัติของคอนกรีตด้านความคงทนระยะยาว โดยเฉพาะหากเมื่อสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่เป็นสารละลายซัลเฟตหรือคลอไรด์โดยจะมีผลทำให้ความต้านทานต่อสารเคมีดังกล่าวลดลงด้วย

3.1.4 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ (setting time) ASTM C191 [15]

รูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบระยะเวลา



รูปที่ 3 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) และซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยนางรมบด (GOS)

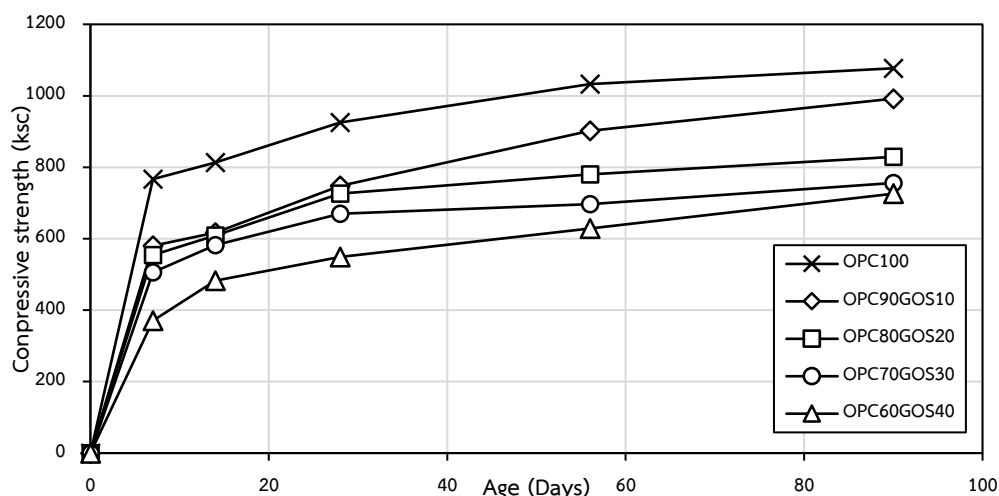
การก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยนางรมบด (GOS) ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดย OPC100 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 90 นาที ส่วนเวลาการก่อตัวระยะสุดท้ายเท่ากับ 195 นาที ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป ที่มีการก่อตัวระยะเริ่มต้นภายใน 60-240 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายภายใน 180-360 นาที สำหรับซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ด้วย GOS ที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่ามีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นตั้งแต่ 135-210 นาที ซึ่งค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นตามมาตรฐาน ASTM C 150 [12] คือ ไม่ต่ำกว่า 60 นาที โดยซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเปลือกหอยนางรมบดมีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 150 [12] ในทุกอัตราส่วนผสม และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายตั้งแต่ 225-450 นาที ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าการนำ

GOS แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนนั้น ทำให้การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ใช้เวลาเพิ่มมากขึ้น อาจเพราะช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์นั้นไม่มีปริมาณเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะ GOS มีความละเอียดน้อยกว่า OPC และมีการดูดซึมน้ำได้ช้าเนื่องจาก GOS มีความชื้นอยู่แล้ว จึงส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกเป็นไปได้อย่าง ส่งผลให้แนวโน้มของระยะการก่อตัวเริ่มต้นและระยะการก่อตัวสุดท้าย จึงใช้เวลาเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ

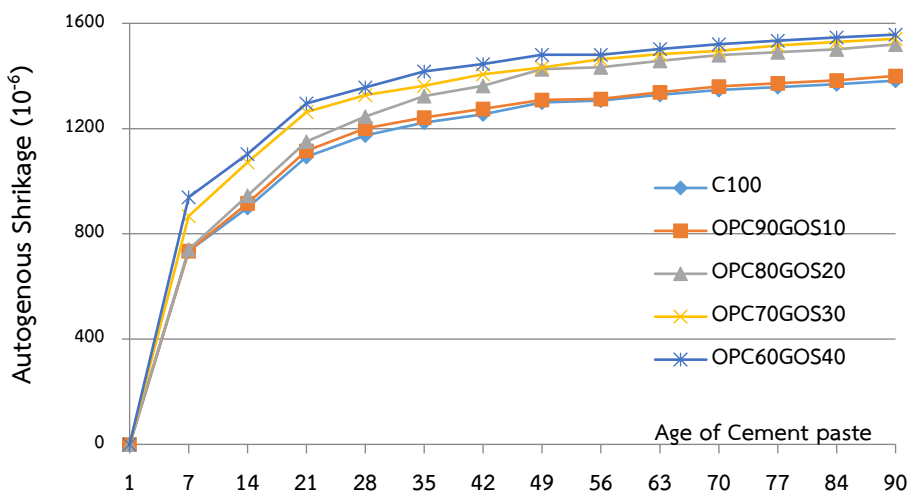
3.2 ค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

รูปที่ 4 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยนางรมบด (GOS) ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30 พบว่ามีลักษณะการพัฒนาค่ากำลังอัดลดลง ซึ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย GOS ที่ร้อยละ 20-40 นั้น มีแนวโน้มที่ได้ค่ากำลังอัดที่ลดลงมาก ในขณะที่การแทนที่ร้อยละ 10 ที่อายุการบ่ม 90 วันนั้น มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์

เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30 ซีเมนต์เพสต์ (OPC90GOS10) ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 580, 617, 748, 902 ksc ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 76, 76, 81, 87 และ 92 ของซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ตามลำดับ ซึ่งในช่วง 7-28 วันนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับ OPC100 พบว่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย GOS ลดลงอย่างมาก อาจเพราะการทำปฏิกิริยาก่อนข้างเป็นไปได้อย่างในช่วงต้น และเมื่อพิจารณาอายุที่ 56-90 วัน และพบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนแม้จะน้อยกว่า OPC100 ก็ตาม เห็นได้ว่าความสามารถในการรับแรงอัดของส่วนผสมที่มีการแทนที่เปลือกหอยนางรมบดในปริมาณที่มากขึ้นจะมีค่ากำลังอัดลดลง เพราะเปลือกหอยนางรมบดค่อนข้างเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา และเนื่องจากขนาดอนุภาคของเปลือกหอยนางรมบดนั้นมีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์เล็กน้อย ทำให้อนุภาคของเปลือกหอยนางรมบดบางส่วนไม่สามารถสอดแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์นั้นได้ ดังนั้นค่ากำลังอัดที่ทดสอบได้จึงมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมค่อนข้างมาก [9]



รูปที่ 4 ค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28, 56 และ 90 วัน



รูปที่ 5 ค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์

3.3 การหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์

รูปที่ 5 แสดงค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยนางรมบด (GOS) ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วย GOS นั้นไม่สามารถช่วยลดค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ได้ เมื่อเปรียบเทียบค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (OPC100) โดยจะเห็นได้ว่าซีเมนต์เพสต์ทั้งหมดมีค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอายุ 28 วัน จากนั้นการหดตัวของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนถึงอายุ 90 วัน อาจเป็นเพราะซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เปลือกหอยนางรมบดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุดันค่อนข้างช้า ทำให้ซีเมนต์เพสต์ต้านทานการยัดรังได้น้อยทำให้เกิดการหดตัวแบบออโตจีเนียสมากในช่วงอายุดัน [18] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Barr และคณะ [19] ซึ่งพบว่าการหด

ตัวของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม โดยมีค่าการหดตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในอายุ 100 วัน และจะหดตัวอย่างช้า ๆ เมื่ออายุมากกว่า 100 วัน โดยจะเห็นได้ว่าร้อยละการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ของ GOS ที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) และซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยนางรมบด (GOS) ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.30 พบว่าร้อยละการหดตัวใกล้เคียงกันเนื่องจากการแทนที่ด้วยเปลือกหอยนางรมบดนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของโพรงภายในเพสต์มากนัก โดยการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์มีค่ามากขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกันในแต่ละอัตราส่วนผสม พบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่เปลือกหอยนางรมบดในปริมาณมากขึ้นค่าร้อยละการหดตัวเพิ่ม

ขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุมแล้ว ซีเมนต์เพสต์ผสมเปลือกหอยนางรมบดมีการหดตัวมากกว่า เนื่องจากเปลือกหอยนางรมบดนั้นมีความละเอียดน้อยกว่าปูนซีเมนต์ จึงทำให้อนุภาคของเปลือกนางรม

บดไม่สามารถแทรกสอดเข้าไปในช่องว่างระหว่างปูนซีเมนต์ได้ ทำให้โครงสร้างภายในไม่หนาแน่น และโพรงภายในมากขึ้น การหดตัวจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าการหดตัวแบบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยนางรมบด (GOS) กับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (OPC100)

Specimen	Autogeneous Shrinkage ($\times 10^{-6}$) - % of OPC100		S.E.M. ($\times 10^{-6}$)
OPC100	1382	(100)	6.918
OPC90GOS10	1400	(101)	8.836
OPC80GOS20	1520	(110)	6.224
OPC70GOS30	1541	(112)	7.557
OPC60GOS40	1557	(113)	8.112

ตัวเลขในคอลัมน์แรก คือ ค่าการหดตัวแบบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 90 วัน, ในวงเล็บ () คอลัมน์ที่สอง คือ อัตราส่วนของการหดตัวแบบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (OPC100), คอลัมน์ที่ 3 คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของตัวอย่าง (standard error of measurement, S.E.M.) ซึ่งกำหนดไม่มากกว่า 0.01 % ของค่าเฉลี่ย ตามมาตรฐาน ASTM C490 [17]

3.4 การวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิต

การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเปลือกหอยนางรมบด (GOS) ซึ่งไม่ผ่านการเผามาทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) บางส่วน ในซีเมนต์เพสต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยเมื่อนำมาวิเคราะห์หาราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร [คอนกรีต ค.8 (STRENGTH 350 กก./ตร.ซม. รูปทรงกระบอก หรือ 400 กก./ตร.ซม. รูปลูกบาศก์)] ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าการใช้เปลือกหอยนางรมบด (GOS) ซึ่งมีราคาประมาณกิโลกรัมละ 0.06 บาท (ผลเฉลี่ยการบดเปลือกหอยในเวลา 60 นาที น้ำหนักที่บดได้ 60.7 กิโลกรัม ใช้พลังงานไฟฟ้า 231.3 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 5.31 แอมป์ ขนาดที่บดได้เล็กกว่า 5

มิลลิเมตร คิดเป็นต้นทุนการผลิตมี ค่าใช้จ่าย 3.57 บาท โดยคิดจากค่าไฟหน่วยละ 3 บาท) [20] ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีราคาประมาณ 2.93 บาทต่อกิโลกรัม (ราคากลาง ณ เดือน กันยายน พ.ศ. 2560) ดังนั้นการใช้เปลือกหอยนางรมบด จึงเป็นวัสดุทางเลือกในการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ซึ่งนอกจากจะสามารถประหยัดพลังงานและลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยตรงแล้ว ยังสามารถประหยัดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลงได้อีกด้วย

5. สรุปผล

5.1 เปลือกหอยนางรมบด (GOS) ไม่สามารถช่วยเร่งการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายของ

ซีเมนต์เพสต์ให้เร็วขึ้น โดยเมื่อเพิ่มการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวเริ่มต้นและระยะก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์จะใช้เวลาเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามลำดับ

5.2 ซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยนางรมบด (GOS) ไม่สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้โดยที่ร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ควบคุมมากที่สุด และกำลังอัดจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มการแทนที่ร้อยละ 20, 30 และ 40 ตามลำดับ

5.3 ซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยนางรมบด (GOS) ไม่สามารถในการช่วยลดการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ได้ โดยจะมีค่าการ

หดตัวที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเพิ่มการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 30 ตามลำดับ

5.4 ปริมาณการใช้เปลือกหอยนางรมบด (GOS) เป็นวัสดุทดแทนที่เหมาะสมต่อการใช้งาน คือ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เนื่องจากมีแนวโน้มค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงซีเมนต์เพสต์ควบคุม (OPC100) ที่อายุการบ่ม 90 วัน

5.5 การใช้เปลือกหอยนางรมบด (GOS) ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ส่งผลทำให้ต้นทุนราคาในการผลิตคอนกรีตลดลง อีกทั้งยังสามารถลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากขยะในชุมชน และลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ลงได้อีกด้วย

ตารางที่ 5 วิเคราะห์หาราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร

Specimen	Mix proportions (kg/m ³) [kg. (Baht/kg.)]				
	OPC	GOS	Fine Agg.	Coarse Agg.	Baht / m ³
OPC100	420 (2.69)	-	827 (0.31)	1,455 (0.37)	1,924.52
OPC90GOS10	378 (2.69)	42 (0.06)	827 (0.31)	1,455 (0.37)	1,814.06
OPC80GOS20	336 (2.69)	84 (0.06)	827 (0.31)	1,455 (0.37)	1,703.60
OPC70GOS30	294 (2.69)	126 (0.06)	827 (0.31)	1,455 (0.37)	1,593.14
OPC60GOS40	252 (2.69)	168 (0.06)	827 (0.31)	1,455 (0.37)	1,482.68
OPC50GOS50	210 (2.69)	210 (0.06)	827 (0.31)	1,455 (0.37)	1,372.22

OPC = ordinary Portland cement type I, GOS = ground oyster shell

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณโครงการวิจัย ประเภทเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2559 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และขอขอบคุณ สาขาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่เอื้อเฟื้อ

ห้องปฏิบัติการ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลองวิจัย

6. รายการอ้างอิง

- [1] จันทิรา รัตนรัตน์ และพัชรินทร์ แซ่ตั้ง, 2560, ความคิดเห็นของชุมชนเกี่ยวกับปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งของประเทศไทย, ว.วิทยาศาสตร์และ

- เทคโนโลยี 25(5): 723-732.
- [2] เรืองโร โตกฤษณะ, กุลภา กุลติลภ, กุลภา บุญชูวงศ์, เบญจวรรณ คงชน และธัญธาดา มะวงศ์ไ, 2558, สถานภาพการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำไทยในบริบทของประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน, สถาบันคลังสมองของชาติ กระทรวงศึกษาธิการ, กรุงเทพฯ, 128 น.
- [3] กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติการประมง, 2559, สถิติการเลี้ยงหอยทะเล ประจำปี 2557, ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ, 32 น.
- [4] Falade, F., 1995, An investigation of periwinkle shells as coarse aggregate in concrete, Build. Environ. 30: 573-577.
- [5] 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, Cem. Concr. Res. 35: 2175-2182.
- [6] 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, Cem. Concr. Res. 37: 559-564.
- [7] Mosher, S., Cope, W.G., Weber, F., Shea, D. and Kwak, T.J., 2010, Effects of lead on Na^+ , K^+ -ATPase and hemolymph ion concentrations in the freshwater mussel *Elliptio complanata*, Environ. Toxicol. 27: 268-276.
- [8] Yoon, H.S., Park, S.K., Lee, K.H. and Park, J.B., 2004, Oyster shell as substitute for aggregate in mortar, Waste Manag. Res. 22: 158-170.
- [9] Lertwattanakul, P., Makul, N. and Siripattaraprat, C., 2012, Utilization of ground waste seashells in cement mortars for masonry and plastering, J. Environ. Manag. 111: 133-141.
- [10] Othman, N.H., Bakar, B.H.A., Don, M.M. and Johari, M.A.M., 2013, Cockle shell ash replacement for cement and filler in concrete, Malay. J. Civil Eng. 25: 201-211.
- [11] Olivia, M., Mifshella, A.A. and Darmayanti, L., 2015, Mechanical properties of seashell concrete, In Proceeding of 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5), Procedia Engineering 125(2015): 760-764.
- [12] ASTM Standard C150, American Society for Testing and Materials, 2015, Standard Specification for Portland Cement, Annual Book of ASTM Standard, Vol.4.01, Pennsylvania.
- [13] ASTM Standard C188, American Society for Testing and Materials, 2009, Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards.
- [14] ASTM Standard C204, American Society for Testing and Materials, 2011, Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus. Annual Book of ASTM Standards, Vol.4.11, Pennsylvania.
- [15] ASTM Standard C191, American Society for Testing and Materials, 2013, Standard

- Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, Annual Book of ASTM Standard, Vol.4.11, Pennsylvania.
- [16] ASTM Standard C109, American Society for Testing and Materials, 2008, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), Annual Book of ASTM Standard, Vol.4.01, Pennsylvania.
- [17] ASTM Standard C490, American Society for Testing and Materials, 2009, Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 4.02, Pennsylvania.
- [18] อรรถเดช ศรีเสน, 2556, กำลังและความทนทานของคอนกรีตกำลังปกติและกำลังสูงที่ใช้เสาถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, 93 น.
- [19] Barr, B., Hoseinian S.B. and Beygi, M.A., 2003, Shrinkage of concrete stored in natural environment, Cem. Concr. Com. 25: 19-29.
- [20] ชลธิชา บุญเฉย, 2558, เครื่องบดเปลือกหอยแครง, โครงการงานปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ, กรุงเทพฯ, 107 น.