การประยุกต์ใช้กระดูกสัตว์และเปลือกหอยทดแทนวัสดุประเภทซีเมนต์ในงานโครงสร้าง
Application of animal bones and shells as substitutes for cement in structural works

นายจาริตร์ จาริตรบุตร[1] นายฐตพล พ่วงสมจิตร[2] นางสาวภัทรา ลองจำนงค์[3] และ รศ.ดร.วัฒนชัย สมิทธากร[4]

[1,2,3,4] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่สำคัญในงานก่อสร้างเพื่อพัฒนาประเทศ แต่ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้น มีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก เป็นสาเหตุทำให้เกิดภาวะโลกร้อนซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ของมนุษยชาติในปัจจุบัน คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะลดการใช้ซีเมนต์โดยการหาวัสดุมาทดแทนหรือลดการใช้ซีเมนต์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับแนวคิดอาคารสีเขียว (**Green Building**) ในปัจจุบัน โดยมีการใช้วัสดุทดแทน คือ กระดูกสัตว์และเปลือกหอยแครง ทั้งนี้เนื่องมาจากกระดูกสัตว์ และเปลือกหอยแครงเป็นของเหลือทิ้งจากการบริโภค และมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนประกอบ ซึ่งเป็นสารประกอบหลักในเม็ดปูน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาสมบัติของปูนซีเมนต์ ที่มีส่วนผสมของกระดูกสัตว์หรือเปลือกหอยแครง โดยทำการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างมอร์ตาร์ ได้แก่ กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดที่ 3 วัน 7 วัน และ 28 วัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุประเภทซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของกระดูกสัตว์และเปลือกหอยแครงในอัตราส่วนร้อยละ 10 15 และ 20 อีกทั้งศึกษาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงจากการใช้ซีเมนต์ผสมเปรียบเทียบกับการใช้ซีเมนต์ทั่วไป ตลอดจนวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อนำวัสดุประเภทซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของกระดูกสัตว์ และเปลือกหอยแครงไปประยุกต์ใช้กับประเภทงานโครงสร้างที่เหมาะสมกับคุณสมบัติของซีเมนต์ต่อไป โดยจากผลการทดลองสรุปว่า กระดูกสัตว์ไม่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ ส่วนเปลือกหอยแครงมีความเหมาะสมต่อการนำมาเป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์

คำสำคัญ: วัสดุทดแทนซีเมนต์, กระดูกสัตว์, เปลือกหอยแครง

Abstract

Cement is an essential material in construction for the development of countries. However, the process of cement production releases large amount of carbon dioxide gas, contributing to global warming, a major issue facing humanity at present. We thus propose reducing cement usage by finding alternative materials, according to the concept of “Green Building”. The alternative materials chosen are animal bones and cockle shells, which are byproducts of consumption and contain calcium carbonate, a primary component in cement clinker. This research aims to study the properties of cement mixed with animal bones or cockle shells. Mortar samples are tested for compressive strength and modulus of rupture at 3, 7, and 28 days to examine the properties of cementitious materials with various proportions of animal bones and cockle. The reduction in carbon dioxide emissions from using these alternative materials is also compared to those from using ordinary portland cement. Furthermore, the test results are evaluated for the suitability of cementitious materials containing animal bones and cockle shells for various structural applications. In conclusion, animal bones are not suitable as a substitute for cement, while cockle shells are suitable as a substitute for cement.

Keywords: alternative cement materials, cockle shells, animal bones

1. บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นอุตสาหกรรมใหญ่ มีความสำคัญต่อการขับเคลื่อนประเทศให้เกิดการพัฒนา การทำงานก่อสร้างงานหนึ่งต้องใช้ต้องใช้ทรัพยากรหลายอย่าง โดยทรัพยากรหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างคือ “ปูนซีเมนต์” โดยการผลิตปูนซีเมนต์มีกระบวนการหลายขั้นตอน เริ่มต้นตั้งแต่การทำเหมืองหินปูนเพื่อเป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งจะใช้ในปริมาณร้อยละ 30 – 50 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ภูเขาหินปูนถูกทำลาย

อย่างต่อเนื่อง รวมถึงส่งผลให้เกิดปัญหาต่างๆ เช่น ปัญหาความเสื่อมโทรมของป่าไม้ปัญหาจากการชะล้างพังทลายของดิน มลพิษทางอากาศ มลพิษทางเสียง เป็นต้น หลังจากขั้นตอนการทำเหมืองหินปูน ต้องผ่านกระบวนการผลิตในโรงงานโดยการบด เผา และเติมยิปซั่ม ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมลพิษเป็นจำนวนมาก สำหรับการผลิตปูนซีเมนต์ทุกๆ 1,000 กิโลกรัม จะก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 900 กิโลกรัม ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ รวมถึงสร้างก๊าซเรือนกระจก(Greenhouse gases) ปริมาณมากสู่บรรยากาศ นำมาซึ่งภาวะโลกร้อน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ (Climate change) ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน โดยในปัจจุบันทั่วโลกกำลังประสบปัญหาภาวะโลกร้อน (Global warming) อย่างรุนแรง และพบว่าปัจจุบันโลกมีสถิติอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจากสมัยยุคก่อนอุตสาหกรรมราว 1.2 องศาเซลเซียส ส่งผลกระทบไปทุกส่วนของโลกใบนี้ ตลอดจนการดำเนินชีวิตของมนุษย์ที่ต้องปรับเปลี่ยนไปทำให้หลายประเทศตระหนัก และตื่นตัวกับปัญหาภาวะโลกร้อนมากขึ้น

ผลกระทบที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ต้องเริ่มแก้ปัญหาจากปัจจัยหลักของการเกิดภาวะโลกร้อน คือ ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ได้มากที่สุด โดยจะต้องอาศัยความร่วมมือจากทุกภาคส่วน โดยอุตสาหกรรมการก่อสร้างเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ใหญ่ในประเทศไทย และมีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศเป็นอย่างยิ่ง แต่ในขณะเดียวกันก็มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศในปริมาณมากเช่นกัน หากสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ จะสามารถลดภาวะโลกร้อนได้และผลกระทบที่เกิดจากภาวะโลกร้อนได้ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากกระบวนการผลิตซีเมนต์ข้างต้น การลดการใช้ซีเมนต์ เป็นอีกหนึ่งแนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศ เพราะในกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ได้มาซึ่งเม็ดปูน ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมาก จึงเกิดแนวคิดการใช้วัสดุทดแทนซีเมนต์ โดยเมื่อนำวัสดุนั้นมาผสมกับเม็ดปูนซีเมนต์ จะสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้ โดยที่คุณสมบัติของซีเมนต์ต้องไม่เปลี่ยนแปลงหรือมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

คณะผู้จัดทำจึงได้มีแนวคิดที่จะช่วยลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยใช้แนวคิดวัสดุทดแทนซีเมนต์ จึงได้ศึกษาและสืบค้นข้อมูลการใช้วัสดุอื่น ที่มีคุณสมบัติคล้ายวัสดุปอสโซลาน โดยงานวิจัยนี้มีสมมติฐานว่ากระดูกสัตว์และเปลือกหอยแครงซึ่งเป็นวัสดุที่อาจจะมีคุณสมบัติเหมาะสม คือมีลักษณะคล้ายหินปูนซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของซีเมนต์ และมีสารประกอบต่างๆ ที่อาจเพิ่มคุณสมบัติบางอย่างให้ซีเมนต์ได้ และยังเป็นของเหลือทิ้ง โดยข้อมูลจากกรมปศุสัตว์ของประเทศไทยระบุว่า คนไทยมีการบริโภคเนื้อสัตว์ต่อปีเป็นจำนวนมาก ทำให้ทราบว่ามีกระดูกที่เหลือจากโรงฆ่าสัตว์จำนวนมาก และถูกขายต่อ นำไปทำเป็นปุ๋ย และอาหารสัตว์ แต่ก็ยังมีกระดูกปริมาณมากที่ยังไม่ได้ถูกใช้ประโยชน์ ส่วนเปลือกหอยแครงตามร้านอาหารทะเลมีการบริโภคเมนูหอยแครงในปริมาณมาก โดยร้านอาหารส่วนใหญ่จะนำไปทิ้งและไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ ในการทดลองในครั้งนี้ จึงนำกระดูกสัตว์และเปลือกหอยแครงไปผสมแทนที่ซีเมนต์ เพื่อศึกษาการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งนำไปสู่การลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลงได้บางส่วน อีกทั้งศึกษาต้นทุนที่ลดลงจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกระดูกสัตว์และเปลือกหอย แล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติที่ต้องการทราบ ซึ่งได้แก่ กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด ที่ 3วัน 7วัน และ 28วัน โดยที่ยังสามารถรักษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ไม่ให้เปลี่ยนไปจนเกิดความเสียหายแก่โครงสร้าง และการใช้กระดูกสัตว์และเปลือกหอยแครงผสมในซีเมนต์ ยังเป็นการนำของเหลือทิ้งจากการบริโภค มาใช้ประโยชน์ ลดการเกิดมลภาวะของเหลือทิ้ง สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะอีกด้วย

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุประเภทซีเมนต์

2.1.1 การปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมซีเมนต์

อุตสาหกรรมซีเมนต์มีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คิดเป็น 6-10% ของการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของทั้งโลก[1] โดยที่ในการผลิตซีเมนต์ปริมาณ 1 กิโลกรัมจะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณ 0.6-0.9 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 60-90 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณการผลิต [2] [3]

*2.1.2 องค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์ (*Main compounds in cement)[4]

1. องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ออกไซด์หลัก คิดเป็น 90% ของน้ำหนักซีเมนต์

	แหล่งที่มาวัตถุดิบ	(% weight)
CaO	หินปูนและดินสอพอง	60 – 67
SiO_2	ดินดำหรือดินเหนียว และดินดาน	1 – 25
Al_2O_3	ดินดำหรือดินเหนียว และดินดาน	3 – 8
Fe_2O_3	แร่เหล็ก หรือศิลาแลง	0.5 – 6

ออกไซด์รอง

	การทำปฏิกิริยา	(% weight)
ยิปซัม ($CaSO_4 \times 2H_2O$)	หน่วงการแข็งตัวของซีเมนต์	-
$Na_2O + K_2O$	ถ้าใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลท์ จะทำให้โครงสร้างแตกราว เนื่องจากการกาขยายตัวจากปฏิกิริยา	0.5 – 0.3
Free Lime (CaO)	CaO ที่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์อื่นๆไม่สมบูรณ์ จะทำปฏิกิริยากับน้ำภายหลังการแข็งตัว ทำให้เกิดการแตกร้าว	-
MgO	หลอมเป็นปูนเม็ดบางส่วน ที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับน้ำหลังการแข็งตัวทำให้เกิดการแตกร้าว	0.1 – 5.5
TiO_2	-	0.1 – 0.4
P_2O_5	-	0.1 – 0.2
SO_3	หลอมเป็นปูนเม็ด (C_3S)	1 - 3

2.2 วัสดุจากกระดูกสัตว์

เนื้อเยื่อพื้นฐานของกระดูกคือเนื้อเยื่อเกี่ยวพันชนิดพิเศษ เรียกว่าเนื้อเยื่อกระดูก (osseous tissue) ประกอบขึ้นจากวัสดุผสมมีความแข็งแรงแต่มีน้ำหนักน้อย ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบด้วยแคลเซียมฟอสเฟต (calcium phosphate) ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทท์ (calcium hydroxyapatite) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความแข็งเกร็ง (rigidity) สูง และต่อต้านแรงกดได้มาก นอกจากนี้ยังมีคอลลาเจน (collagen) เป็นโปรตีนเส้นใยที่ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของกระดูก [5]

2.3 วัสดุจากเปลือกหอยแครง

“หอยแครง (cockle หรือเรียกว่า ark shell) เป็นหอยชนิดหนึ่งประเภทหอยสองฝา จัดอยู่พวกมอลลัส (mollusk) ซึ่งเป็นสัตว์ในไฟลัมมอลลัสกา (mollusca) มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ Anadara granosa

ลักษณะทั่วไป ได้แก่ มีร่องลึกที่เปลือกและบานพับ เปลือกที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง และมีฟันละเอียดที่บานพับจำนวนมาก หอยแครงสกุลนี้ไม่มีท่อน้ำ รอยยึดติดกล้ามเนื้อยึดเปลือกด้านหลังจะใหญ่กว่ารอยแผลของกล้ามเนื้อยึดเปลือกด้านหน้า เนื้อของหอยแครงมีสีน้ำตาลปนแดง เท้าหอยแครงเจริญได้ดีและสามารถเคลื่อนที่ตามผิวโคลนได้ [6]

เปลือกหอยประกอบไปด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) ประมาณ 95-98 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือจะเป็น magnesium (Mg), sodium (Na), phosphorus (P), potassium (K), ferrum (Fe), copper (Cu), nickel (Ni), boron (B), zinc (Zn) และ silicon (S)

แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมมากมาย เช่น อุตสาหกรรมกระดาษเพื่อทำให้กระดาษมีสีขาวและเรียบเนียน อุตสาหกรรมยางเพื่อเพิ่มความขาวอุตสาหกรรมสีเพื่อให้สีขาวและการยึดเกาะที่ดี [7]

3. วิธีการทดลอง

3.1 การเตรียมวัสดุผสมซีเมนต์

1. นำเปลือกหอยเหลือทิ้งที่ได้จากร้านอาหารมาล้างด้วยน้ำสะอาดและกำจัดเศษเนื้อที่ติดอยู่ออก เพื่อเตรียมเข้าเตาอบ

รูปที่ 1 ล้างเปลือกหอยและกำจัดเศษเนื้อออก

2. นำเปลือกหอยที่ทำความสะอาดแล้วมาอบให้แห้งด้วยเครื่องตู้อบลมร้อนมาตรฐาน เป็นเวลา 24 ชม.

รูปที่ 2 นำเปลือกหอยที่ล้างเสร็จแล้วเข้าเตาอบ

3. นำเปลือกหอยที่แห้งแล้วไปบดด้วยเครื่อง Laboratory disc mill machine (KAWASAHI) ให้ละเอียด

รูปที่ 3 นำเปลือกหอยที่แห้งแล้วไปบดด้วยเครื่อง Laboratory disc mill

4. นำผงเปลือกหอยและผงกระดูกสัตว์ที่เตรียมมาไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด Sieve No.200 และเลือกใช้ผงที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงได้

รูปที่ 4 นำผงเปลือกหอยและผงกระดูกสัตว์ไปร่อนผ่านตะแกรง

5. นำผงเปลือกหอยและผงกระดูกสัตว์ที่ได้จากข้อ 4 ไปอบอีกครั้ง 24 ชม. ก่อนนำไปผสม

3.2 การเตรียม Mix design

3.2.1 กำหนดสัดส่วนการผสมมอร์ตาร์แต่ละสูตร

กำหนดให้ปริมาณของร้อยละของมวล Cement ต่อ ทราย จะเท่ากับ 2.750 และใช้ค่า Water Cement Ratio เป็น 0.485 โดยทราย SSD มีการดูดซับน้ำเท่ากับ 0.3 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 1 ตารางแสดงสัดส่วนวัสดุผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ลำดับ	สูตร (ซีเมนต์-กระดูกสัตว์-เปลือกหอย)	วัสดุประเภทซีเมนต์			Oven dried Sand (กรัม)	Water + Absorption 0.3 %(กรัม)
		ซีเมนต์ (กรัม)	กระดูกสัตว์ (กรัม)	เปลือกหอย (กรัม)		
1	100-0-0 (ชุดควบคุม)	2000	0	0	5500	986.5
2	90-10-0	1800	200	0	5500	986.5
3	85-15-0	1700	300	0	5500	986.5
4	80-20-0	1600	400	0	5500	986.5
5	90-0-10	1800	0	200	5500	986.5
6	85-0-15	1700	0	300	5500	986.5
7	80-0-20	1600	0	400	5500	986.5

หมายเหตุ : * ตัวเลขในสูตร คือปริมาณร้อยละของวัสดุที่ผสมในวัสดุประเภทซีเมนต์

* Oven dried sand คือ Graded standard sand ตาม specification ASTM C778[9]

* Water Absorption 0.3% มาจาการทดสอบตาม ASTM C128

สรุป : รวมจำนวน Specimen ที่ต้องทดสอบ คือ
แบบทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 mm (3x3) (1+3+3)=63Specimens
แบบรูปทรงปริซึมขนาด 25x25x28 mm (3x3) (1+3+3)=63Specimens

*3.2.2 ขั้นตอนการผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ อ้างอิงตาม **ASTM C**109[8]*

1. เตรียม mixing bowl และเติมน้ำปริมาณตามตารางที่ 3.2.1

2. เปิด mixer ด้วย low speed (ประมาณ 135-145 rpm) และเติมซีเมนต์พร้อมกับผงกระดูกสัตว์หรือผงเปลือกหอยในปริมาณตามตารางที่ 3.2.1 ในเวลา 30 วินาที ขณะที่เครื่องทำงานอยู่

3. เติมทรายปริมาณที่เหมาะสม ตามตารางที่ 3.2.1 ในอีก 30 วินาที ขณะที่ยัง mixing หลังจากผ่านไป 60 วินาที ให้หยุดเครื่อง 20 วินาที และใช้ช้อนคลุก mortar ที่ติดขอบbowl

4. เปิดเครื่อง mixer อีกครั้ง เป็นเวลา 2 นาทีด้วย medium speed (ประมาณ 275-295 rpm)

3.3 การขึ้นรูปคอนกรีต

3.3.1 การขึ้นรูปคอนกรีตสำหรับการทดสอบหากำลังรับแรงของมอร์ตาร์

1. ใส่มอร์ตาร์ลงในแบบลูกบาศก์ ขนาด 50x50x50 มม. แบ่งเป็นชั้นอัดให้แน่นโดยจะกดเป็นจำนวน 32 ครั้ง เป็นเวลา 10 วินาที โดยทำแบบนี้ 3 ชั้นต่อลูกบาศก์หนึ่งอัน เมื่อเสร็จสิ้นการกดแล้ว ควรจะมีความสูงของลูกบาศก์สูงกว่า Mold เพื่อให้ใช้เกียงฉาบให้เรียบ โดยทำทั้งหมด 9 ชิ้นงานต่อสูตร

รูปที่ 5 ใส่มอร์ตาร์ลงในแบบลูกบาศก์แบ่งเป็นชั้น และอัดให้แน่น

2. ใส่มอร์ตาร์ลงในแบบทรงปริซึม ขนาด 25x25x280 มม. แบ่งใส่ทีละครึ่ง โดยอัดให้แน่นเป็นจำนวน 12 ครั้ง ใน 15 วินาที ทำซ้ำทั้งหมด 4 รอบ ยกที่กดเป็นระยะ 1 นิ้ว จากผิวมอร์ตาร์

รูปที่ 6 ใส่มอร์ตาร์ลงในแบบทรงปริซึม

3. เก็บตัวอย่างไว้ในที่ชื้นประมาณ 1 วันเพื่อแกะแบบ

4. แกะแบบออกมาแล้วนำไปแช่น้ำ

รูปที่ 7 แกะชิ้นงานออกจากแบบ

รูปที่ 8 นำชิ้นงานไปแช่ในน้ำ

*3.4 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดัดตาม ASTM C**109**[8] และ ASTM C**348-08** [10]*

1. เมื่อครบกำหนดทดสอบ นำมอร์ตาร์ที่บ่มไว้ในน้ำขึ้นจากน้ำ แล้วนำไปผึ่งลมจนแห้ง

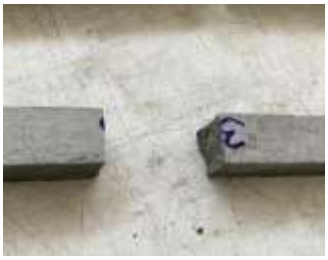
2. บันทึกข้อมูลการวัดขนาด และชั่งน้ำหนักมอร์ตาร์ที่จะทำการทดสอบกำลัง รวมถึงวันที่และเวลาที่ทำการทดสอบ

3. นำก้อนมอร์ตาร์ตัวอย่างไปทดสอบกำลังที่ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

รูปที่ 9 นำก้อนมอร์ตาร์ตัวอย่างไปกดทดสอบกำลัง

4. บันทึกค่ากำลังที่อ่านได้ และสังเกตพฤติกรรมการวิบัติของชิ้นตัวอย่าง

รูปที่ 10 พฤติกรรมการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทรงลูกบาศก์



รูปที่ 11 พฤติกรรมการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทรงปริซึม

4. ผลการศึกษา

ผลการทดสอบสามารถสรุปกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์สูตรต่างๆ ที่อายุ 3 7 และ 28 วัน ได้ดังนี้

ตารางที่ 2 ตารางสรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์สูตรต่างๆ

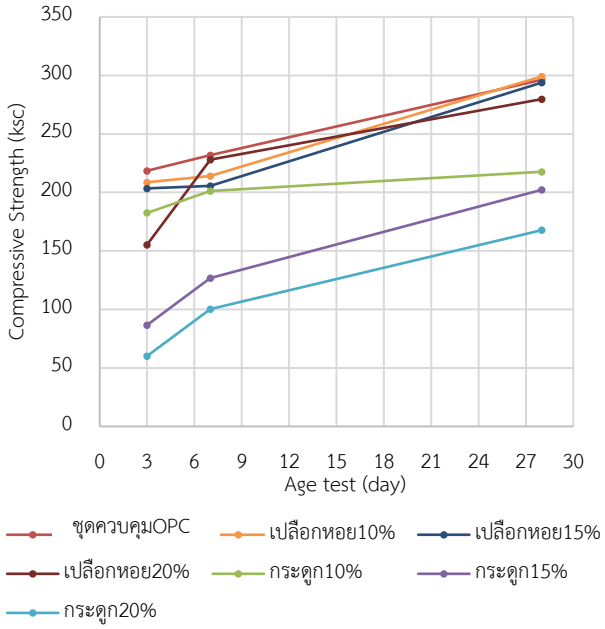
ลำดับ	สูตร	ค่ากำลังรับแรงอัด (ksc)		
		3 days	7 days	28 days
1	ปกติ (ชุดควบคุม)	219	232	296
2	เปลือกหอย10%	209	214	299
3	เปลือกหอย15%	203	206	294
4	เปลือกหอย20%	155	228	280
5	กระดูกสัตว์10%	183	201	218
6	กระดูกสัตว์15%	87	127	202
7	กระดูกสัตว์20%	60	100	168

ตารางที่ 3 ตารางสรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์สูตรต่างๆ

ลำดับ	สูตร	ค่ากำลังรับแรงดัด (ksc)		
		3 days	7 days	28 days
1	ปกติ (ชุดควบคุม)	23	36	38
2	เปลือกหอย10%	24	36	46
3	เปลือกหอย15%	32	37	18
4	เปลือกหอย20%	43	32	22
5	กระดูกสัตว์10%	38	36	24
6	กระดูกสัตว์15%	23	20	24
7	กระดูกสัตว์20%	15	23	19

5. วิเคราะห์ผลการศึกษา

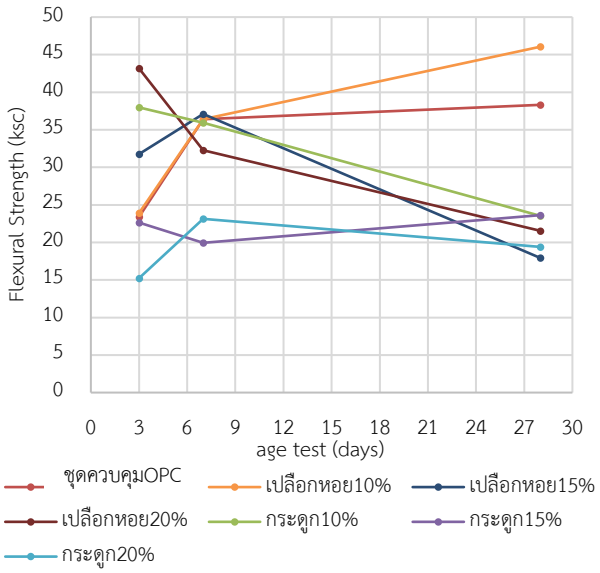
5.1 คุณสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุทดแทน



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบการพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์สูตรต่างๆ

จากกราฟพบว่า กลุ่มมอร์ตาร์ที่ผสมเปลือกหอยมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 7 และ 28 วัน ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ชุดควบคุม โดยเมื่อพิจารณากราฟที่ 3 วัน มอร์ตาร์ที่ผสมเปลือกหอยมากกว่าจะมีแนวโน้มที่ค่ากำลังอัดจะน้อยกว่า เมื่อพิจารณากราฟที่ 7 วัน ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเปลือกหอยร้อยละ 20 มีค่าสูงมากผิดปกติ ซึ่งคาดว่าเกิดจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง และเมื่อพิจารณากราฟที่ 28 วัน ทั้งสามสูตรมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกันและมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ชุดควบคุม แสดงว่าการผสมเปลือกหอยที่อัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 โดยมวลของซีเมนต์ ทำให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกเกิดขึ้นช้า แต่ไม่ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงในช่วงท้ายหรือในระยะยาว จึงสรุปว่าเปลือกหอยเป็นวัสดุที่สามารถนำมาเป็นวัสดุผสมซีเมนต์ได้โดยไม่ทำให้คุณสมบัติด้านกำลังเปลี่ยนแปลงในระยะยาว

กลุ่มมอร์ตาร์ที่ผสมกระดูก มีแนวโน้มอัตราการพัฒนากำลังใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ชุดควบคุม โดยดูจากความชันของกราฟที่เท่ากัน เมื่อพิจารณากำลังของมอร์ตาร์ที่ 3 7 และ 28 วัน พบว่า มอร์ตาร์ที่ผสมกระดูกสัตว์มากกว่าจะมีแนวโน้มที่ค่ากำลังอัดจะน้อยกว่า โดยที่ค่ากำลังอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน มีค่าที่ต่ำกว่าชุดควบคุมทั้งสามสูตร จึงสรุปว่าการผสมกระดูกสัตว์ในซีเมนต์ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลง ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว แต่ไม่ส่งผลต่ออัตราการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์ จึงไม่เหมาะสมในการแทนที่ซีเมนต์ที่ใช้ในงานโครงสร้าง



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบการพัฒนาค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์สูตรต่างๆ

จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบการพัฒนาค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์สูตรต่างๆ พบว่าวันที่ 3 ในมอร์ตาร์สูตรที่มีส่วนผสมของเปลือกหอยจะให้ค่ากำลังรับแรงดัดมากกว่ามอร์ตาร์ชุดควบคุม โดยมอร์ตาร์สูตรที่มีสัดส่วนของเปลือกหอยมากจะยิ่งให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่สูงขึ้น (ในการทดลองใช้สัดส่วนมากสุดที่ 20%) วันที่ 7 กำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์สูตรเปลือกหอยทั้งสามสูตรมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ชุดควบคุม และสุดท้ายในวันที่ 28 พบว่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์สูตรเปลือกหอย 15% และ 20% มีค่าลดลงมากเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ชุดควบคุม ส่วนมอร์ตาร์สูตรเปลือกหอย 10% มีค่าสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ชุดควบคุม ซึ่งอาจมีความเคลื่อนจากการทดลอง เช่น ระยะเวลาในการผสมและเทใส่แบบหล่อที่อาจใช้เวลานานซึ่งส่งผลให้มอร์ตาร์แห้งมากขึ้น สภาพอากาศ การกดอัดและการเคาะแบบหล่อขณะเทมอร์ตาร์ใส่ เครื่องมือที่ใช้ทดสอบกำลังแรงดัด อาจสรุปได้ว่าเปลือกหอยมีส่วนช่วยให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงดัดได้ดีในช่วงแรกของการบ่ม แต่เมื่อเวลาผ่านไปกำลังรับแรงดัดที่เคยสูงจะต่ำลงและสุดท้ายแล้วกำลังรับแรงดัดจะต่ำลงมากเมื่อเทียบกับสูตรปกติในวันที่ 28 การใช้เปลือกหอยทดแทนซีเมนต์จึงอาจไม่เหมาะสมในการลดปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในโครงสร้างที่ต้องรับแรงดัดมากเนื่องจากส่งผลให้กำลังรับแรงดัดลดลงอย่างมาก

จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบการพัฒนาค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์สูตรต่างๆ พบว่าวันที่ 3 ในสูตรที่มีส่วนผสมของกระดูก 15% และ 20% จะให้ค่ากำลังรับแรงดัดน้อยกว่าสูตรปกติ โดยสูตรที่มีสัดส่วนของกระดูกมากจะยิ่งให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่ต่ำลง (ในการทดลองใช้สัดส่วนมากสุดที่ 20%) ส่วนสูตรที่มีส่วนผสมของกระดูก 10% จะให้ค่ากำลังรับแรงดัดมากกว่าสูตรปกติ วันที่ 7 กำลังรับแรงดัดของสูตรกระดูกที่มีส่วนผสมของกระดูก 15% และ 20% มีค่าต่ำกว่าสูตรปกติ ส่วนสูตรที่มีส่วนผสมของกระดูก 10% ให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่ต่ำลงจากตอนแรกและมีค่าใกล้เคียงกับสูตรปกติ และสุดท้ายในวันที่ 28 พบว่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ทั้งสามสูตรมีค่าลดลงมากเมื่อเทียบกับสูตรปกติ ในการทดลองนี้สูตร 10% อาจมีความเคลื่อนจากการทดลองทำให้ได้ค่าที่แตกต่างจากสูตร 15% และ 20% อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจมาจากระยะเวลาในการผสมและเทใส่แบบหล่อที่อาจใช้เวลานานซึ่งส่งผลให้มอร์ตาร์แห้งมากขึ้น สภาพอากาศ การกดอัดและการเคาะแบบหล่อขณะเทมอร์ตาร์ใส่ เครื่องมือที่ใช้ทดสอบกำลังแรงดัด จากการทดลองอาจสรุปได้ว่ากระดูกทำให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงดัดที่ต่ำลง และจะยิ่งต่ำลงอย่างมากเมื่อที่ 28 วัน การใช้กระดูกสัตว์ทดแทนซีเมนต์จึงอาจไม่เหมาะสมในการลดปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในโครงสร้างที่ต้องรับแรงดัดมากเนื่องจากส่งผลให้กำลังรับแรงดัดลดลงอย่างมาก

5.2 การลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการลดปริมาณซีเมนต์

จากการสืบค้นพบว่าในการผลิตซีเมนต์ปริมาณ 1 กิโลกรัมจะมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณ 0.9 กิโลกรัม โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C = (\frac{0.9}{1})(S) \quad (1)$$

C หมายถึงร้อยละของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง

S หมายถึงร้อยละวัสดุทดแทน

สามารถสรุปปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สามารถลดได้จากการแทนที่ด้วยเปลือกหอยได้ดังนี้

1.สูตร 90-0-10 (เปลือกหอย 10%) ลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จากการแทนที่ด้วยเปลือกหอย เท่ากับร้อยละ 9 โดยมวลของซีเมนต์ในสูตรปกติ

2.สูตร 85-0-15 (เปลือกหอย 15%) ลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จากการแทนที่ด้วยเปลือกหอย เท่ากับร้อยละ 13.5 โดยมวลของซีเมนต์ในสูตรปกติ

3.สูตร 80-0-20 (เปลือกหอย 20%) ลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จากการแทนที่ด้วยเปลือกหอย เท่ากับร้อยละ 18 โดยมวลของซีเมนต์ในสูตรปกติ

หมายเหตุ: เนื่องจากกระดูกไม่เหมาะสมในการนำมาแทนที่ซีเมนต์ในงานโครงสร้างจึงไม่นำมาวิเคราะห์

5.3 ปริมาณต้นทุนที่ลดลงจากการแทนที่ซีเมนต์ด้วยกระดูกสัตว์และเปลือกหอย

ราคาต้นทุนที่ลดลงจากการแทนที่ด้วยกระดูกสัตว์และเปลือกหอย โดยอ้างอิงจากราคา ปูนงานโครงสร้าง เอสซีจี สูตรไฮบริด (50 กก.) ราคา 150

บาท และราคาคาร์บอนเครดิต 164.78 บาทต่อตัน จากโครงการ T-VER ณ วันที่ 25/4/2567 โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$X = A[(B) + (C)(D)] \quad (2)$$

X หมายถึง ราคาต้นทุนที่สามารถลดได้

A หมายถึง ร้อยละวัสดุทดแทน

B หมายถึง ราคาซีเมนต์/ตัน

C หมายถึง สัดส่วนมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นต่อมวล

D หมายถึง ราคาคาร์บอนเครดิต/ตัน

สามารถสรุปปริมาณต้นทุนที่ลดลงจากการแทนที่ซีเมนต์ด้วยกระดูกสัตว์และเปลือกหอยได้ดังนี้

1. สูตร 90-0-10 (เปลือกหอย 10%) ลดราคาต้นทุนจากการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยเท่ากับ 314.83 บาทต่อตัน

2. สูตร 85-0-15 (เปลือกหอย 15%) ลดราคาต้นทุนจากการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยเท่ากับ 472.24 บาทต่อตัน

3. สูตร 80-0-20 (เปลือกหอย 20%) ลดราคาต้นทุนจากการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยเท่ากับ 629.66 บาทต่อตัน

หมายเหตุ: เนื่องจากกระดูกไม่เหมาะสมในการนำมาแทนที่ซีเมนต์ในงานโครงสร้างจึงไม่นำมาวิเคราะห์

6. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาการลดปริมาณการใช้ซีเมนต์ โดยทดแทนซีเมนต์บางส่วนด้วยกระดูกสัตว์หรือเปลือกหอยซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบและเป็นของเหลือทิ้งจากการบริโภค ในการทดลองครั้งนี้เริ่มจากการนำเปลือกหอยที่เหลือทิ้งจากร้านอาหารทะเลมาทำความสะอาดแล้วนำไปบดให้ละเอียด ส่วนผงกระดูกสัตว์ป่นทำการซื้อมากจากช่องทางอินเทอร์เน็ตซึ่งมีขายทั่วไป โดยควบคุมขนาดของวัสดุโดยการร่อนให้ผ่านตระแกรงเบอร์ 200 และควบคุมความชื้นโดยการอบผงวัสดุทดแทนก่อนนำไปไปแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อผสมมอร์ตาร์ตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ จากนั้นนำมอร์ตาร์ที่ได้ไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด โดยวิธีการผสมและทดสอบมอร์ตาร์ทั้งหมดอ้างอิงจาก ASTM C109 และ ASTM C438-08 นำผลการทดสอบมาวิเคราะห์เปรียบเทียบสรุปผลได้ ดังนี้

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยในอัตราส่วนร้อยละไม่เกิน 20 โดยมวลของซีเมนต์สูตรปกติ สามารถลดปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงถึงร้อยละ 18 โดยที่กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ลดลงไม่เกินร้อยละ 6 ถือว่าไม่มีมีนัยสำคัญ เปลือกหอยแครงจึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสม ในการนำมาแทนที่ซีเมนต์ในการผสมคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้างได้ และยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตจากการลดปริมาณซีเมนต์และจากการขายคาร์บอนเครดิต ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมในปัจจุบันอีกด้วย ส่วนในด้านของกำลังรับแรงดัดจากผลการทดลองได้ค่ากำลังรับแรงดัดที่ลดลงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปกติมากถึงร้อยละ 53 แต่ในงานก่อสร้างนิยมให้คอนกรีตมีหน้าที่รับแรงอัดเท่านั้นโดยมีเหล็กเสริมช่วยรับแรงดึงและแรงดัด ดังนั้นเมื่อคิดในด้านการใช้งานจริงในงานโครงสร้าง พิจารณาเพียงแค่คุณสมบัติในการรับแรงอัดจึงเพียงพอต่อการใช้งาน

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกระดูกสัตว์นั้นส่งผลให้ซีเมนต์มอร์ตาร์สูญเสียกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดมากถึงร้อยละ 43 และ 49 ตามลำดับซึ่งถือว่าส่งผลต่อการรับแรงของซีเมนต์มอร์ตาร์อย่างมีนัยสำคัญ สามารถสรุปได้ว่ากระดูกไม่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ในงานโครงสร้างได้ เนื่องจากเมื่อนำค่ากำลังไปออกแบบเพื่อใช้ในงานโครงสร้าง จะทำให้โครงสร้างมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้วัสดุส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างสิ้นเปลืองโดยไม่จำเป็น

เอกสารอ้างอิง

[1] Architecture2030, The emissions impact of concrete, https://www.materialspalette.org/concrete/ [26 พ.ย. 2566]

[2] Portland Cement Association. Carbon Footprint, https://www.cement.org/docs/default-source/th-paving-pdfs/sustainability/carbon-foot-print.pdf [26 พ.ย. 2566]

[3] Ana,Paul. Cement emissions remain stubbornly high, https://www.iea.org/energy-system/industry/cement [26 พ.ย. 2566]

[4] cpacademy, ประเภทของปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน, https://www.cpacacademy.com [25 พ.ย. 2566]

[5] Marieb, E.N., Human Anatomy & Physiology, 4th ed. Menlo Park, California: Benjamin/Cummings Science Publishing. (1998).

[6] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, ลักษณะของหอยแครง, https://www.foodnetworksolution.com [26 พ.ย. 2566]

[7] Penny, Zariyantey. A short review on cockle shells as biomaterials in the context of bone scaffold fabrication. Sains Malaysiana 48(7) (2019): 1539-1545.

มาตรฐานอ้างอิง

[8] ASTM C 109: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars

[9] ASTM C 778-06: Standard Specification for Standard Sand

[10] ASTM C348-08: Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars