

การศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยนางรมจากจังหวัดสุราษฎร์ธานีและผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัด A Study on the Replacement of Cement with Oyster Shells from Surat Thani Province and Its Effect on Compressive Strength

กิตติภูมิ ทศนสุวรรณ¹ และ อริสมันต์ แสงธงทอง^{2*}

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา กองวิศวกรรมไฟฟ้าและโยธา กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช จ.สระบุรี

*Corresponding author; E-mail address: bas_kate_007@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบธาตุในเปลือกหอยนางรม อนุภาคพื้นผิวของผงเปลือกหอยนางรม และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรมซึ่งนำมาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ โดยดำเนินการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของเปลือกหอยนางรมด้วยวิธี X-ray Fluorescence และเปรียบเทียบพื้นผิวอนุภาคระหว่างผงปูนซีเมนต์ ผงเปลือกหอยนางรมที่ไม่ผ่านการเผา และผงเปลือกหอยนางรมที่ผ่านการเผา ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นทดสอบกำลังรับแรงอัดในการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมในอัตราส่วนร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน BS 1881 จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในเปลือกหอยนางรม พบว่าเปลือกหอยนางรม มีองค์ประกอบของธาตุหลักเหมือนกับปูนซีเมนต์ ซึ่งประกอบไปด้วย แคลเซียม (Ca) ร้อยละ 87.3 ซิลิกอน (Si) ร้อยละ 5.7 เหล็ก (Fe) ร้อยละ 3.7 และอะลูมิเนียม (Al) ร้อยละ 1.0 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคลเซียมในปูนซีเมนต์และเปลือกหอยนางรมพบว่า เปลือกหอยนางรมมีปริมาณแคลเซียมมากกว่าปูนซีเมนต์ ร้อยละ 8.4 และจากการวิเคราะห์พื้นผิวอนุภาค พบว่า ผงเปลือกหอยนางรมหลังผ่านกระบวนการเผา โครงสร้างผลึกของผงเปลือกหอยนางรมมีการเปลี่ยนแปลงจากแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งมีการจัดเรียงอนุภาคคล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์มากขึ้นแต่ยังคงมีช่องว่างระหว่างอนุภาคที่มากกว่า ซึ่งจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรมในอัตราส่วนร้อยละ 25 และร้อยละ 50 เทียบกับคอนกรีตปกติ พบว่า คอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรมที่ผ่านการเผา (BOC) ให้กำลังรับแรงอัดลดลงร้อยละ 14 และ ร้อยละ 65 ตามลำดับ และคอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรมที่ไม่ผ่านการเผา (NOC) ให้กำลังรับแรงอัดลดลงร้อยละ 40 และร้อยละ 79 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อทดแทนปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงเปลือกหอยนางรมที่ผ่านการเผาให้ผลกำลังรับแรงอัดสูงกว่าแบบไม่เผา โดยในปริมาณร้อยละ 25 (BOC25) ยังคงสามารถรับกำลังรับแรงอัดในระดับที่ยอมรับได้ ทั้งนี้หากวิเคราะห์ในเชิงสิ่งแวดล้อมการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมเป็นการลดใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และช่วยลดปัญหาขยะอินทรีย์ได้อีกด้วย

คำสำคัญ: คอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรม, ผงเปลือกหอยนางรม, ผงเปลือกหอยนางรมเผา, ขยะอินทรีย์

Abstract

This study aims to investigate the elemental compositions of oyster shell, particle morphology of oyster shell powder, and the compressive strength of concrete incorporating oyster shell powder as a partial replacement for Portland cement. The analysis included elemental composition using X-ray Fluorescence, as well as a comparative examination of particle surfaces among cement powder, non-burned oyster shell powder, and burned oyster shell powder, which was heated at 900°C for 5 hours. Concrete samples were prepared by replacing cement with oyster shell powder at 25% and 50% by weight, and compressive strength tests were conducted at 7, 14, and 28 days of curing age in accordance with BS 1881 standards. Elemental analysis revealed that oyster shells contain key elements similar to Portland cement, including calcium (Ca) 87.3%, silicon (Si) 5.7%, iron (Fe) 3.7%, and aluminum (Al) 1.0%. The calcium content in oyster shells was 8.4% higher than that found in cement. Surface analysis showed that after calcination, the crystalline structure of oyster shell powder transformed from calcium carbonate (CaCO_3) to calcium oxide (CaO), resulting in a particle morphology more closely resembling that found in cement, although a greater degree of interparticle voids remained. Compressive strength tests demonstrated that concrete incorporating burned oyster shell powder, Burned Oyster-shell Concrete (BOC) showed strength reductions of 14% and 65% at 25% and 50% replacement levels, respectively. In comparison, Non-burned Oyster-shell Concrete (NOC) resulted in greater reductions of 40% and 79%, respectively. These findings indicate that replacing Portland cement type I with burned oyster

shell powder yields better compressive strength performance than using unburned powder. At 25% replacement, the compressive strength of BOC concrete remains within an acceptable range. The use of oyster shell powder as a partial cement replacement offers significant environmental benefits by utilizing industrial waste and reducing cement consumption.

Keywords: Oyster Shell Concrete, Grounded Oyster Shell, Burned Oyster Shell, Organic Waste

1. คำนำ

จังหวัดสุราษฎร์ธานีเป็นฐานการผลิตหอยนางรมที่มีนัยสำคัญต่อเศรษฐกิจภาคใต้ของประเทศไทย และเป็นที่ตั้งของ กองบิน 7 กองทัพอากาศ ซึ่งถือเป็นหน่วยงานยุทธศาสตร์หลักของกองทัพอากาศในการปฏิบัติการกิจด้านความมั่นคงของชาติในพื้นที่ภาคใต้ อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงหอยนางรมได้ก่อให้เกิดขยะเปลือกหอยนางรมปริมาณมหาศาลซึ่งเป็นภาระในการจัดการและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หากไม่มีแนวทางการจัดการที่เหมาะสม โดยข้อมูลปัจจุบันบ่งชี้ว่ามีปริมาณขยะเปลือกหอยนางรมสะสมจำนวนมากในพื้นที่ จ.สุราษฎร์ธานี ส่วนใหญ่ถูกกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบ อันเป็นแนวทางที่อาจก่อให้เกิดมลพิษต่อดินและแหล่งน้ำใต้ดินในระยะยาว [1] อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อทัศนียภาพ รวมถึงเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของแมลงและสัตว์พาหะนำโรค ซึ่งขัดต่อหลักการพัฒนาที่ยั่งยืน บริบทของการจัดการของเสียและการแสวงหาวัสดุทดแทนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การพิจารณาถึงคุณสมบัติของหอยนางรมจึงมีความสำคัญ หอยนางรมมีพฤติกรรมการสะสมโลหะหนักจากสภาพแวดล้อมทางทะเล ซึ่งเป็นประเด็นที่ต้องคำนึงถึงในด้านความปลอดภัยทางอาหาร การนำเปลือกหอยนางรมมาใช้เป็นส่วนประกอบในคอนกรีตสามารถเป็นแนวทางในการจัดการความเสี่ยงนี้ได้ [2] โดยกระบวนการทางเคมีและกายภาพของการแข็งตัวของปูนซีเมนต์จะดำเนินการ กักเก็บ และตรึงโลหะหนัก [3] เหล่านี้ในไว้ภายในโครงสร้างคอนกรีตอย่างมีประสิทธิภาพ ลดโอกาสในการชะล้างและปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นการเปลี่ยนของเสียที่มีศักยภาพในการก่อมลพิษให้กลายเป็นส่วนประกอบที่มีคุณค่าในวัสดุก่อสร้าง

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้วัสดุชีวภาพที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมสูง อาทิเช่น เปลือกหอย กระดุกสัตว์ และเปลือกไข่ไก่ [4-5] โดยมีการศึกษาผงเปลือกหอยชนิดต่าง ๆ ทั้งที่ผ่านกระบวนการเผาและไม่ผ่านกระบวนการเผา ดังแสดงในตารางที่ 1 ทดแทนผงปูนซีเมนต์โดยผลิตเป็น คอนกรีตบล็อก คอนกรีตไหลตัวได้ มอร์ตาร์ ซึ่งจากการทดสอบ พบว่า การใช้วัสดุทดแทนในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการทำงาน [6-7] ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้ผงเปลือกหอยนางรม เป็นวัสดุทดแทนบางส่วนของผงปูนซีเมนต์ในคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 2 และได้ค่ากำลังรับแรงอัดเทียบเท่าการใช้ผงปูนซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 3 ทั้งนี้การใช้วัสดุชีวภาพเป็นการการใช้ของเหลือทิ้งให้เกิดประโยชน์ ลดการใช้หินปูน ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตปูนซีเมนต์ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางกายภาพ

ตารางที่ 1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอยชนิดต่าง ๆ [8]

Materials	Chemical Composition											Reference
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO ₂	LOI	
Portland Cement	19.01	4.68	66.89	0.81	0.09	1.17	3.2	3.66	0.08	2.48	4.68	Zeyad et al. (2019)
Cockle	1.6	0.92	51.56	1.43	0.08	0.06	-	-	-	-	41.84	Olivia et al. (2015)
	0.38	0.65	-	51.91	-	-	0.05	-	-	-	41.8	Olivia et al. (2017)
Marsh	0.39	0.28	67.7	-	-	-	0.02	-	-	-	42.7	Lertwattanarak et al. (2012)
Mussel	0.55	0.03	87.21	0.49	0.5	0.04	0.05	-	0.09	-	-	Felipe-Sese et al. (2011)
Oyster	0.55	0.03	87.21	0.49	0.5	0.04	0.05	-	0.09	-	-	Kuo et al. (2013)
	4.6	1.1	86.8	-	-	-	-	-	-	-	-	Li et al. (2015)
Winkles	27.2	6.42	52.1	0.82	0.26	0.25	4.64	0.26	-	0.14	-	Umoh et al. (2012)
	26.26	8.79	55.53	0.4	0.25	0.2	4.82	0.18	0.05	0.07	-	Etuk et al. (2015)
Snail	0.6	0.51	51.09	0.69	1.2	0.12	0.56	0.19	0.21	0.02	40.51	Zaid et al. (2012)
	13.41	4.95	57.95	0.19	0.22	0.02	3.8	0.12	0.01	0.01	-	Etuk et al. (2015)

ตารางที่ 2 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอยนางรม [9]

Reference	Component (%)												Ignition Loss
	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SiO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	
Yang et al. (2003)	51.06	2	0.51	0.5	0.09	0.18	0.58	0.6	0.2	0.06	0.02	0.02	44.16
Yoon et al. (2004)	52.96	0.62	0.78	-	-	0.17	0.93	-	0.32	0.03	0.01	-	44.02
Etuk et al. (2012)	57.95	13.41	0.19	4.95	-	0.01	0.22	0.12	3.8	0.02	0.01	0.01	18.6
Bunyamin & Mukhlis (2020)	51.56	1.6	1.43	0.92	-	-	0.08	-	-	0.06	-	-	41.25

ตารางที่ 3 กำลังรับแรงอัดของเปลือกหอยนางรมที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ [8]

References	Percentage of Cement Replacement	Mix Proportion	Compressive Strength (ksc)	
			7 days	28 days
Olivia et al. (2015)	Control	1:0.355:1.27:1.92	326.30	369.13
	2%		-	314.48
	4%		321.21	365.05
	6%		-	294.29
	8%		-	311.62
Olivia et al. (2017)	Control	1:0.36:1.62:1.41	344.66	387.49
	4% (Blood cockle)		341.60	367.09
	4% (Marsh clam)		346.70	407.88
Umoh et al. (2012)	0% , 0% NaNO ₃	1:0.6:2:4	169.98	215.36
	30% , 0% NaNO ₃		148.88	175.59
	30% , 1% NaNO ₃		174.06	205.57
	30% , 2% NaNO ₃		202.21	229.43
	30% , 3% NaNO ₃		182.53	206.39
Abinaya et al. (2016)	0%	-	214.14	387.49
	2.50%		224.33	407.88
	5%		234.53	428.27
	7.50%		219.24	407.88
	10.00%		219.24	402.78
Hazulina et al. (2013)	Control	1:0.54:2.5:1.35	387.49	458.87
	5%		303.87	367.09
	10%		254.93	316.11
	15%		305.91	367.09
	25%		244.73	280.42
	50%		101.97	132.56
Zaid et al. (2014)	Control	1:0.44:1.45:2.79	209.14	282.97
	5%		218.42	321.41
	10%		159.28	248.81
	15%		148.37	224.74
	20%		141.33	210.87
	Control	1:0.54:2.5:1.35	382.39	458.87
	5%		300.81	367.09
	10%		254.93	336.50
	15%		305.91	367.09
	25%		244.73	275.32
	50%		203.94	132.56

การพัฒนาคอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรมจาก จ.สุราษฎร์ธานี จึงมีความสอดคล้องกับเป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตาม ยุทธศาสตร์ชาติและยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ ในการสนับสนุนการพัฒนา สิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน [10-12] รวมถึงหลักการ BCG Model (Bio-Circular-Green Economy) ซึ่งเป็นกรอบแนวคิดเชิงยุทธศาสตร์ระดับชาติในการ ขับเคลื่อนการพัฒนาเศรษฐกิจอย่างยั่งยืน ซึ่งประกอบด้วย

1) Bio Economy (เศรษฐกิจชีวภาพ) คือ การนำทรัพยากรชีวภาพที่มี อยู่ในท้องถิ่น (เปลือกหอยนางรม) มายกระดับมูลค่าและพัฒนาเป็น ผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2) Circular Economy (เศรษฐกิจหมุนเวียน) คือ การนำของเสีย จากกระบวนการผลิตและบริโภคกลับมาใช้ประโยชน์ในระบบเศรษฐกิจ ลดปริมาณของเสีย และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ

3) Green Economy (เศรษฐกิจสีเขียว) คือ การดำเนินกิจกรรมทาง เศรษฐกิจที่ให้ความสำคัญกับการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การอนุรักษ์ ทรัพยากรธรรมชาติ และการสร้างความยั่งยืนในระยะยาว

ด้วยความสำคัญเชิงยุทธศาสตร์ของจังหวัดสุราษฎร์ธานีในฐานะที่ตั้ง ของกองบิน 7 กองทัพอากาศ รวมถึงปัญหาการฝังกลบขยะเปลือกหอย นางรมในพื้นที่ การส่งเสริมการวิจัย พัฒนา และการนำคอนกรีตผสมผง เปลือกหอยนางรมไปประยุกต์ใช้ จึงมิได้เป็นเพียงการแก้ไขปัญหเฉพาะ หน้าของการจัดการของเสีย หากแต่เป็นการดำเนินงานเชิงยุทธศาสตร์ที่ สอดคล้องกับทิศทางการพัฒนาประเทศ สนับสนุนยุทธศาสตร์ชาติและ ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศด้านการพัฒนาสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน โดยมี จ.สุราษฎร์ธานี เป็นพื้นที่นำร่องในการบูรณาการความร่วมมือระหว่างภาค ส่วนต่าง ๆ เพื่อขับเคลื่อนเป้าหมายดังกล่าวไปสู่การปฏิบัติอย่างเป็น รูปธรรม

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 น้ำ และวัสดุผสม โดยวัสดุสำคัญในการศึกษาอีกประการ หนึ่ง คือ ผงเปลือกหอยนางรมที่นำมาทดแทนการใช้ผงปูนซีเมนต์ จากพื้นที่ จ.สุราษฎร์ธานี โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ในการศึกษาจะใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ที่สามารถหาได้โดยทั่วไปในพื้นที่ศึกษา และมีใช้งานอย่าง แพร่หลายทั่วทั้งประเทศไทย

2.1.2 น้ำ

เนื่องจากพื้นที่ทำการทดลองอยู่ในพื้นที่ อ.มวกเหล็ก จ.สระบุรี ซึ่งลักษณะทางภูมิศาสตร์ถูกล้อมรอบด้วยภูเขาหินปูน น้ำที่ใช้ในการศึกษา จึงมีแร่ธาตุที่มาจาก การละลายของหินปูน มักเรียกว่า น้ำกระด้าง (Hard Water) เนื่องจากมีแคลเซียมและแมกนีเซียมสูง จึงอาจส่งผลต่อค่ากำลังรับ แรงอัดของคอนกรีตได้ ทำให้ต้องมีการปรับคุณสมบัติของน้ำให้มีความเป็น กลาง ก่อนนำมาใช้งาน [13]

2.1.3 วัสดุผสมรวม

ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้วัสดุผสมรวมที่ทำได้ในพื้นที่ จ.สระบุรี โดยมี การควบคุมขนาดทั้งวัสดุผสมรวมหยาบและมวลรวมละเอียด วัสดุผสมรวม หยาบใช้หินคลุกคละขนาด และวัสดุผสมรวมละเอียดใช้ทรายคละขนาด โดยร่อนผ่านตะแกรงอิงตามเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C33: Standard Specification for Concrete Aggregates [14]

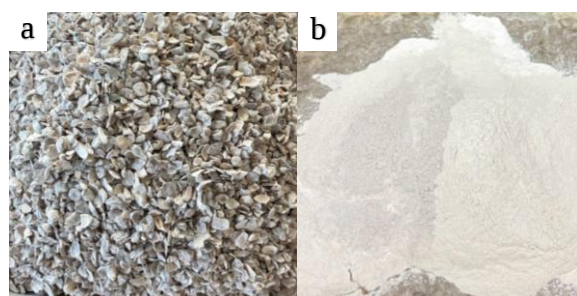
2.1.4 เปลือกหอยนางรม

วัสดุสำคัญที่ใช้ในการศึกษา คือ เปลือกหอยนางรม โดยเลือกใช้จาก พื้นที่ จ.สุราษฎร์ธานี ซึ่งเป็นพื้นที่อุตสาหกรรมการส่งออกหอยนางรมขนาด ใหญ่ จึงประสบปัญหาด้านการกำจัดเปลือกหอยนางรมที่ปัจจุบันดำเนินการ กำจัดด้วยวิธีการฝังกลบ จากการศึกษาที่ผ่านมา ขั้นตอนการเตรียมเปลือก หอยนางรมเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุประสานทดแทนปูนซีเมนต์จะมีความ คล้ายคลึงกันโดยมีกระบวนการดังต่อไปนี้ [15]

1) การทำความสะอาด (Cleaning): เปลือกหอยนางรมเบื้องต้นจะถูก นำมาแช่ในน้ำสะอาดที่มีความเป็นกลาง (pH 7) เป็นระยะเวลา 7 วัน เพื่อชะล้างสิ่งสกปรก คราบอินทรีย์วัตถุจำพวกเนื้อเยื่อที่ติดค้าง และเกลือ ทะเลที่เกาะติดบริเวณพื้นผิว เมื่อครบกำหนดเวลาจะดำเนินการขัดผิว เปลือกหอยด้วยแปรงลวด เพื่อกำจัดเศษเพรียง ปูนซีเมนต์ หรือวัสดุอื่น ๆ อาทิเช่น เชือกไนลอน ที่อาจปนเปื้อน

2) การทำให้แห้ง (Drying): ภายหลังจากทำความสะอาดเปลือกหอย จะถูกนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อน (Oven) ที่อุณหภูมิควบคุมประมาณ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นในเปลือกหอยให้ เหลือน้อยที่สุด อันเป็นการเตรียมพร้อมสำหรับขั้นตอนการบดย่อย

3) บดหยาบ (Crushing): เปลือกหอยนางรมที่ผ่านการอบแห้งจะถูก นำไปบดด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion Testing Machine เพื่อลด ขนาดเบื้องต้น จากนั้นดำเนินการบดซ้ำด้วยค้อนทุบ (Hammer Crushing) เพื่อให้เปลือกหอยมีขนาดอนุภาคประมาณ 2-3 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1a ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการเผา ทั้งนี้เปลือกหอยนางรมที่ใช้เป็น วัตถุดิบของคอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรมที่ไม่ผ่านการเผาจะถูก ดำเนินการบดละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 1b



รูปที่ 1 เปลือกหอยนางรมบดหยาบ(a) และผงเปลือกหอยนางรม(b)

4) การเผา (Calcination/Burning): เปลือกหอยที่ถูกบดหยาบแล้วจะ ถูกนำไปเผาในเตาเผา (Furnace) ที่อุณหภูมิควบคุม 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิดังกล่าว องค์ประกอบหลักของ

เปลือกหอย แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) [7] จะเกิดการสลายตัวทางความร้อน (Thermal Decomposition) เปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) [2] ตามสมการที่ (1)



5) การบดละเอียดหลังการเผา (Fine Grinding after Calcination): ผลจากการเผาเปลือกหอยนางรม (Shell Ash) ที่ได้จะมีบางส่วนจับตัวกันเป็นก้อนขนาดเล็ก ดังนั้นจึงต้องดำเนินการนำเปลือกหอยไปบดละเอียดด้วยเครื่องบด (Grinder) โดยผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 200 หรือขนาดช่องเปิด 75 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1b เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคผงเปลือกหอยให้มีความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ อันจะส่งผลดีต่อปฏิกิริยาการก่อตัวเมื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนผงปูนซีเมนต์

2.2 อัตราส่วนผสม

จากการศึกษางานวิจัยในอดีต ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า ผงเปลือกหอยนางรมมีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุประสานทดแทนปูนซีเมนต์ได้ทั้งหมดสำหรับงานมอร์ตาร์ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตได้อีกด้วย [16-17]

ตารางที่ 4 ส่วนผสมคอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรม [9]

Authors	Replacement Rate (%)	Unit weight (kg)				
		Cement	Oyster Shell	Water	Sand	Gravel
Yang et al. (2005)	0	1.00	0.00	0.45	1.81	2.51
	10	1.00	0.18	0.45	1.63	2.49
	20	1.00	0.36	0.45	1.45	2.47
Yang et al. (2010)	0	1.00	0.00	0.45	1.86	2.62
	10	1.00	0.18	0.45	1.67	2.62
	20	1.00	0.33	0.45	1.38	2.76
Eo & Yi. (2015)	0	1.00	0.00	0.50	2.34	2.93
	30	1.00	0.50	0.50	1.64	2.93
	50	1.00	0.83	0.50	1.17	2.93
Hong et al. (2024)	0	1.00	0.00	0.50	2.00	3.00
	10	1.00	0.20	0.50	1.80	3.00
	20	1.00	0.40	0.50	1.60	3.00
	30	1.00	0.60	0.50	1.40	3.00
	40	1.00	0.80	0.50	1.20	3.00
งานวิจัยนี้	0	1.00	0.00	0.50	2.85	3.30
	25	0.75	0.25	0.50	2.85	3.30
	50	0.50	0.50	0.50	2.85	3.30

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ผงเปลือกหอยนางรมทดแทนปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ในอัตราส่วนการทดแทนที่ร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนัก โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมผงเปลือกหอยนางรมทั้งที่ผ่านกระบวนการเผา (Burned Oyster-shell Concrete: BOC) และที่ไม่ผ่านกระบวนการเผา (Non-burned Oyster-shell Concrete: NOC) เทียบกับคอนกรีตปกติ (Normal Concrete: NC) ซึ่งใช้เป็นตัวควบคุม โดยคอนกรีตทุกส่วนผสมได้รับการ

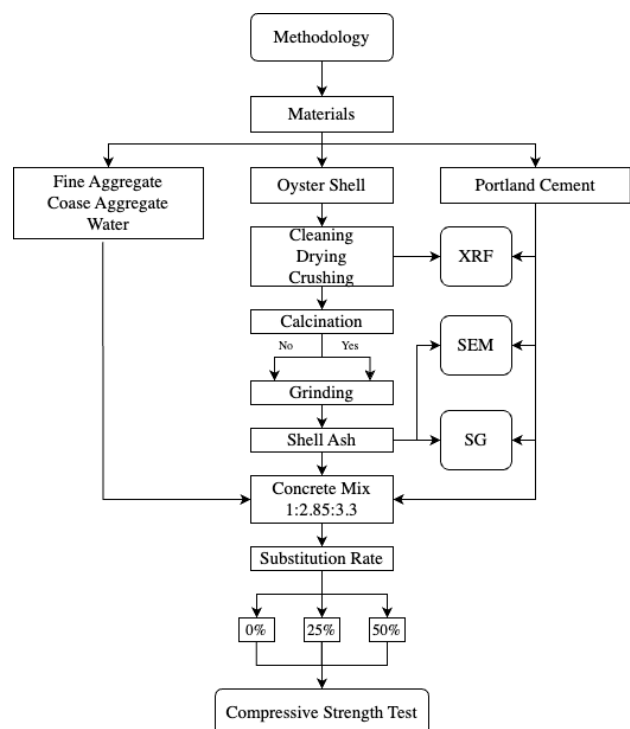
ออกแบบให้มีกำลังอัดเป้าหมายที่ 240 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน รายละเอียดอัตราส่วนผสมของคอนกรีตแต่ละประเภท ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรมแต่ละตัวอย่าง

Concrete	Materials (kg)				
	Cement	Shell Ash	Water	Sand	Gravel
NC	1	0	0.5	2.85	3.3
BOC25	0.75	0.25	0.5	2.85	3.3
BOC50	0.5	0.5	0.5	2.85	3.3
NOC25	0.75	0.25	0.5	2.85	3.3
NOC50	0.5	0.5	0.5	2.85	3.3

2.3 การทดสอบ

การวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ระยะ เพื่อประเมินศักยภาพของผงเปลือกหอยนางรมในการใช้ทดแทนผงปูนซีเมนต์ในคอนกรีต โดยระยะที่ 1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเปลือกหอยนางรมเทียบกับผงปูนซีเมนต์ เพื่อเข้าใจถึงศักยภาพด้านองค์ประกอบทางเคมี ระยะที่ 2 วิเคราะห์พื้นผิวอนุภาคและค่าความถ่วงจำเพาะของผงเปลือกหอยนางรมเผาและไม่เผาเทียบกับผงปูนซีเมนต์ ระยะที่ 3 ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทุกรูปแบบ เพื่อประเมินความสามารถในการทดแทนปูนซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้



รูปที่ 2 แผนภูมิแสดงวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.3.1 การทดสอบ X-ray Fluorescence

องค์ประกอบทางเคมีของผงปูนซีเมนต์และผงเปลือกหอยนางรมจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพที่ไม่ทำลายตัวอย่าง โดยใช้รังสีเอกซ์ปฐมภูมิเพื่อกระตุ้นการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทุติยภูมิที่มีพลังงานจำเพาะต่อธาตุนั้น ๆ เพื่อระบุชนิดและปริมาณธาตุองค์ประกอบในผงปูนซีเมนต์และผงเปลือกหอยนางรม โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของร้อยละโดยน้ำหนักของสารประกอบออกไซด์

2.3.2 การส่องขยาย Scanning Electron Microscopy

พื้นผิวผงปูนซีเมนต์และผงเปลือกหอยนางรมจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนสแกนพื้นผิวดตัวอย่าง เพื่อสร้างภาพที่มีกำลังขยายสูงและให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างสามมิติในระดับจุลภาค

2.3.3 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ

ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity: SG) ของผงปูนซีเมนต์และผงเปลือกหอยนางรมได้รับการทดสอบตามมาตรฐาน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตและประเมินความแตกต่างของคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุทั้งสองชนิด ตามมาตรฐาน ASTM C188: Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement [18]

2.3.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดำเนินการตามมาตรฐาน BS EN 12390-3 (Testing Hardened Concrete — Part 3: Compressive Strength of Test Specimens) [19] โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ 15x15x15 cm บ่มในสภาวะควบคุม และนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดเมื่ออายุครบ 7, 14, และ 28 วัน

3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

3.1 ธาตุองค์ประกอบ

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยวิธี XRF ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่า ผงปูนซีเมนต์ประกอบด้วยธาตุหลักคือ แคลเซียม (Ca), ซิลิกอน (Si), และอะลูมิเนียม (Al) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการก่อตัวของสารประกอบซีเมนต์ไฮเดรต (Cement Hydrate Compounds) อาทิ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ผ่านกระบวนการไฮเดรชัน (Hydration Process) โดยสารประกอบเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาความแข็งแรงของซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste)

ในทางกลับกัน แม้ว่าผงเปลือกหอยนางรมจะมีปริมาณแคลเซียมสูงถึงร้อยละ 87.3 ซึ่งบ่งชี้ถึงศักยภาพในการเป็นแหล่งของแคลเซียมคาร์บอเนต

(CaCO₃) หรือแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ภายหลังกระบวนการเผา (Calcination) แต่ปริมาณซิลิกอนและอะลูมิเนียมกลับต่ำกว่าผงปูนซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญ ข้อจำกัดดังกล่าวมีความสำคัญในเชิงกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เนื่องจากซิลิกอนและอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบหลักที่จำเป็นสำหรับการก่อตัวของโครงสร้าง C-S-H และ C-A-H ซึ่งเป็นช่วงหลักที่ให้ความแข็งแรงแก่คอนกรีต การขาดสมดุลขององค์ประกอบเหล่านี้ในผงเปลือกหอยนางรมจึงส่งผลโดยตรงต่อศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและพัฒนาความแข็งแรงเมื่อนำไปใช้ทดแทนปูนซีเมนต์

ตารางที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในปูนซีเมนต์และเปลือกหอยนางรม

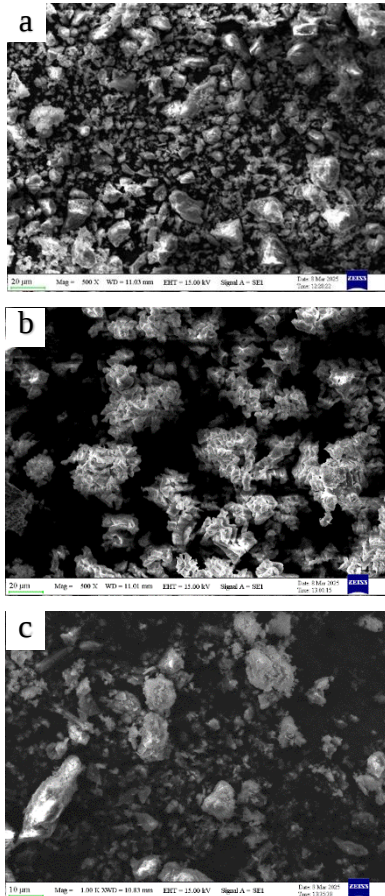
ธาตุองค์ประกอบ	ผงปูนซีเมนต์	ผงเปลือกหอยนางรม
แมกนีเซียม (Mg)	0.34%	0.56%
อะลูมิเนียม (Al)	2.29%	1.03%
ซิลิกอน (Si)	10.27%	5.71%
ซัลเฟอร์ (S)	2.51%	0.36%
คลอรีน (Cl)	0.02%	0.14%
โพแทสเซียม (K)	0.66%	0.36%
แคลเซียม (Ca)	78.89%	87.30%
ไทเทเนียม (Ti)	0.24%	0.15%
โครเมียม (Cr)	0.01%	0.02%
แมงกานีส (Mn)	0.05%	0.03%
เหล็ก (Fe)	4.53%	3.71%
ทองแดง (Cu)	0.02%	ไม่พบ
สังกะสี (Zn)	0.06%	0.10%
อาร์เซนิก (As)	6.59 PPM	ไม่พบ
สตรอนเชียม (Sr)	0.09%	0.34%
เซอร์โคเนียม (Zr)	0.01%	0.01%
แคดเมียม (Cd)	ไม่พบ	0.17%
โมลิบดีนัม (Mo)	0.01%	ไม่พบ

ในประเด็นด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การตรวจพบอาร์เซนิก (As) ในผงปูนซีเมนต์ แม้จะมีปริมาณต่ำ ควรได้รับการควบคุมคุณภาพเพื่อป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพในระยะยาว ทั้งนี้การไม่พบอาร์เซนิกในเปลือกหอยนางรม จึงถือว่าเป็นข้อได้เปรียบในแง่ความปลอดภัยในการนำมาใช้ แต่ตรวจพบแคดเมียม (Cd) ในเปลือกหอยนางรม ทั้งนี้หากมีการนำเปลือกหอยนางรมมาใช้ในการคอนกรีตอย่างแพร่หลาย จะสามารถควบคุมปริมาณแคดเมียม โดยกลไกการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ (Cement Hydration) จะมีส่วนสำคัญในการกักเก็บและตรึงแคดเมียมไว้ภายในโครงสร้างผลึกของสารประกอบซีเมนต์ไฮเดรต (Cement Hydrate Compounds) ซึ่งจะช่วยลดศักยภาพในการชะล้างและปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับการปล่อยทิ้งเปลือกหอยนางรมโดยตรง การเกิดพันธะทางเคมีหรือการถูกกักเก็บทางกายภาพภายในเมทริกซ์คอนกรีต จะจำกัดการเคลื่อนที่ของแคดเมียม

3.2 พื้นผิวของอนุภาค

3.2.1 อนุภาคของผงปูนซีเมนต์

พบว่า ผงปูนซีเมนต์ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular Shape) และมีความหลากหลายของขนาด (Particle size Distribution) ตั้งแต่ระดับไมโครเมตรลงไปถึงระดับนาโนเมตร อนุภาคส่วนใหญ่มักมีลักษณะเป็นผลึกที่มีขอบเขตไม่ชัดเจน (Poorly Defined Crystal Morphology) และมีการเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่ม (Agglomeration) ในลักษณะต่าง ๆ ทั้งแบบหลวมและแบบแน่นดังแสดงในรูปที่ 3a



รูปที่ 3 พื้นผิวอนุภาคของผงปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (a) ผงเปลือกหอยนางรม ไม่เผา (b) และผงเปลือกหอยนางรมเผา (c)

การเกาะรวมตัวนี้เป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคขนาดเล็ก อาทิเช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Forces) ในส่วนพื้นผิวของอนุภาคมีความขรุขระ และมีร่องรอยของขอบผลึกที่แตกหักหรือไม่สมบูรณ์ ปรากฏอยู่ ช่องว่างที่สังเกตได้ส่วนใหญ่เป็นช่องว่างระหว่างอนุภาคที่เกิดจากการเรียงตัวของอนุภาคที่ไม่เป็นระเบียบ (Inter-particle Voids) ขนาดและรูปร่างของช่องว่างเหล่านี้มีความแตกต่างกันไปตามลักษณะการเกาะรวมตัวของอนุภาค ทั้งนี้ไม่พบรูพรุนที่มีลักษณะเป็นรูเปิดเดี่ยว ๆ ที่ชัดเจนบนพื้นผิวของอนุภาคผงปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ ยังสามารถสังเกตเห็นอนุภาคที่มีรูปร่างคล้ายเกล็ด (Flaky Particles) หรืออนุภาคที่มีลักษณะเป็นแท่ง (Rod-shaped Particles) ปะปนอยู่ ซึ่งอาจเป็นตัวแทนของแร่ธาตุอื่น ที่เป็นส่วนประกอบในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ อาทิ อะไลต์ (Alite –

C_3S), บีไลต์ (Belite – C_2S), ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate – C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite – C_4AF)

3.2.2 อนุภาคของผงเปลือกหอยนางรมไม่เผา

ผงเปลือกหอยนางรมไม่เผามีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่มีรูปร่างไม่แน่นอนและมีความหลากหลาย สังเกตได้ว่าอนุภาคส่วนใหญ่มักมีลักษณะเป็นแผ่นบางหรือคล้ายเกล็ด ที่มีการซ้อนทับกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความพรุนสูง (High Porosity) และมีช่องว่างระหว่างอนุภาคเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 3b

พื้นผิวของอนุภาคมีความขรุขระ และมีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็กจำนวนมากเกาะรวมกัน (Agglomeration of Fine Crystallites) ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงโครงสร้างผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต ในรูปแบบต่าง ๆ อาทิ แคลไซต์ (Calcite) หรืออะราโกไนต์ (Aragonite) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของเปลือกหอยนางรม ช่องว่างที่ปรากฏมีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันไป ซึ่งเป็นผลมาจากการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบของอนุภาคผงเปลือกหอยนางรม

3.2.3 อนุภาคของผงเปลือกหอยนางรมเผา

ผงเปลือกหอยนางรมเผามีการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับผงเปลือกหอยนางรมไม่เผา โดยอนุภาคส่วนใหญ่มักมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน แต่มีความพรุนภายในอนุภาคเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด รูพรุนเหล่านี้มีขนาดและรูปร่างที่หลากหลาย กระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของอนุภาค และบางส่วนทะลุผ่านภายในอนุภาค ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (Spongy Structure) หรือมีรูพรุน (Porous Texture) ดังแสดงในรูปที่ 3c

นอกจากนี้ยังพบว่าขอบของอนุภาคมีความคมชัดน้อยลง และบางส่วนมีการเชื่อมติดกัน (Sintering) เป็นกลุ่มขนาดเล็ก ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิสูงในกระบวนการเผาแคลไซน์ ช่องว่างระหว่างอนุภาคยังคงปรากฏอยู่ แต่ลักษณะของการเรียงตัวอาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของอนุภาคหลังการเผา ในส่วนพื้นผิวของอนุภาคมีความขรุขระมากขึ้น และสังเกตเห็นโครงสร้างที่เป็นผลึกขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยม (Angular Crystallites) ซึ่งอาจเป็นผลึกของแคลเซียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นใหม่จากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต รูพรุนที่เกิดขึ้นภายในอนุภาคอาจเป็นผลมาจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระหว่างกระบวนการเผาแคลไซน์

3.2.4 พื้นผิวจำเพาะและการดูดซึมน้ำของคอนกรีต

ผงเปลือกหอยนางรมมีลักษณะทางกายภาพที่ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าผงปูนซีเมนต์ จึงมีความต้องการปริมาณน้ำผสมที่มากขึ้นเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคและการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์อย่างสมบูรณ์ หากการออกแบบส่วนผสมไม่พิจารณาถึงความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้นนี้ จะส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระสำหรับการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/c) สูงขึ้น ซึ่ง

เป็นปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่การลดลงของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตามหลักการของความสัมพันธ์ระหว่าง w/c และความแข็งแรงของคอนกรีต

3.2.5 การยึดเกาะระหว่างอนุภาคของคอนกรีต

ลักษณะพื้นผิวของผงปูนซีเมนต์ที่มีความขรุขระในระดับจุลภาค ส่งเสริมการยึดเกาะเชิงกล (Mechanical Interlocking) กับสารประสานซีเมนต์ที่เกิดจากการไฮเดรชันและพื้นผิวของมวลรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าผงเปลือกหอยนางรม ในทางตรงกันข้าม รูปทรงอนุภาคแผ่นบางของผงเปลือกหอยนางรม และแนวโน้มการรวมตัวของอนุภาคดังกล่าว อาจลดพื้นที่ผิวสัมผัสที่มีประสิทธิภาพสำหรับการสร้างพันธะทางกายภาพและทางเคมีกับเมทริกซ์ซีเมนต์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการยึดเกาะโดยรวมลดลง

3.2.6 ความพรุนในโครงสร้างของคอนกรีต

ผงเปลือกหอยนางรมมีลักษณะโครงสร้างที่มีความพรุนสูงกว่าผงปูนซีเมนต์ จึงมีแนวโน้มที่จะส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมมีปริมาณช่องว่าง (Void Content) โดยรวมเพิ่มขึ้น ช่องว่างเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นจุดอ่อนในโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีต เป็นจุดเริ่มต้นของการแตกร้าว ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่การลดลงของกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 7 ความถ่วงจำเพาะของผงเปลือกหอยนางรมแต่ละการศึกษาต่าง ๆ [9]

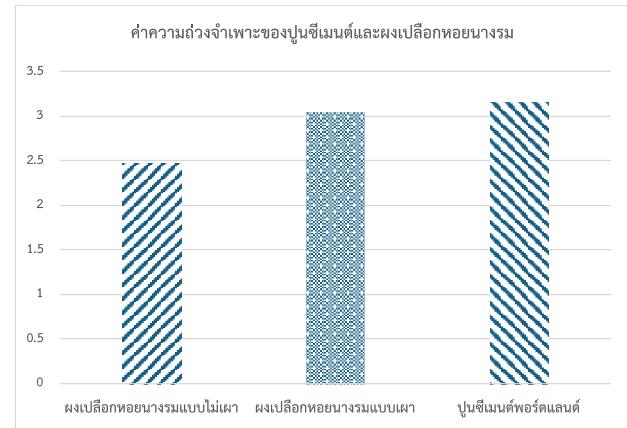
Author	Specific Gravity	Country
Hong & Choundhury (2024)	2.17	Taiwan
N. D. Binag (2016)	3.09	Philippines
Eo & Yi (2015)	2.66	South Korea
Lertwattanaruk et al. (2012)	2.65	Thailand
Yang et al. (2010)	2.48	South Korea
Yang et al. (2005)	2.39	South Korea
H. Yoon et al. (2004)	2.41	South Korea
G. -L. Yoon et al. (2003)	2.59	South Korea
งานวิจัยนี้ (non-burned)	2.47	Thailand
งานวิจัยนี้ (burned)	3.05	Thailand

3.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของผงปูนซีเมนต์เทียบกับผงเปลือกหอยนางรม

ค่าความถ่วงจำเพาะของผงปูนซีเมนต์ ได้ค่าที่ 3.15 ซึ่งสอดคล้องกับค่าทั่วไปของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแร่ธาตุซิลิเกตและอะลูมินาของแคลเซียมที่มีความหนาแน่นค่อนข้างสูง ในส่วนผงเปลือกหอยนางรมไม่เผา มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำที่สุดที่ 2.47 ซึ่งเป็นผลมาจากองค์ประกอบหลักที่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าแร่ธาตุในปูนซีเมนต์ ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับประเทศอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 7 นอกจากนี้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็น

แผ่นบางซ้อนทับกันอย่างหลวม ๆ และมีความพรุนระหว่างอนุภาคสูงทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะโดยรวมต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 3

การเพิ่มขึ้นของค่าความถ่วงจำเพาะของผงเปลือกหอยนางรมภายหลังการเผาแคลไซน์ จาก 2.47 เป็น 3.05 เป็นผลมาจากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและเพิ่มความหนาแน่นของอนุภาคโดยรวม ค่าความถ่วงจำเพาะที่เพิ่มขึ้นทำให้ผงเปลือกหอยนางรมเผามีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับผงปูนซีเมนต์มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ค่าความถ่วงจำเพาะของผงปูนซีเมนต์และผงเปลือกหอยนางรม

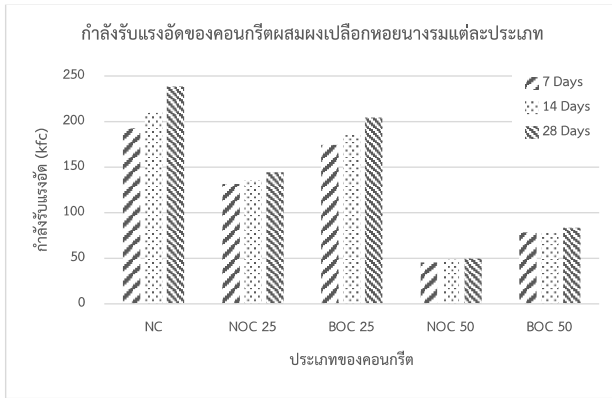
3.4 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

3.4.1 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่า คอนกรีตปกติ (NC) คอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรมไม่เผา (BOC) และคอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรมเผา (NOC) ให้ค่ากำลังรับแรงอัดแตกต่างกันตามปริมาณผงเปลือกหอยนางรม โดย NC, NOC25, BOC25, NOC50, และ BOC25 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน 239, 144, 205, 50, และ 84 ksc ตามลำดับ แสดงว่าการบ่มคอนกรีตปกติให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดและตรงตามมาตรฐาน แต่การผสมผงเปลือกหอยนางรมส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง โดยการผสมผงเปลือกหอยนางรมเผาในอัตราส่วน 25% (BOC25) มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าการผสมผงเปลือกหอยนางรมไม่เผา (NOC25) ในอัตราส่วนเดียวกันอย่างมีนัยยะสำคัญ การเพิ่มอัตราส่วนการผสมผงเปลือกหอยนางรมเป็น 50% ส่งผลให้กำลังอัดลดลงอย่างมากในทั้งสองกรณี ดังแสดงในรูปที่ 5

3.4.2 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่มต่างกัน

คอนกรีตทุกประเภทมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มขึ้นแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทและปริมาณของผงเปลือกหอยนางรมที่ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ โดยที่อัตราส่วนผงเปลือกหอยนางรมที่เท่ากัน การใช้ผงเปลือกหอยนางรมเผามีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นได้มากกว่าผงเปลือกหอยนางรมไม่เผา ดังแสดงในรูปที่ 5 ทั้งนี้การเพิ่มอัตราส่วนการทดแทนเป็น 50% ส่งผลให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดตามอายุการบ่มลดลงในทั้งสองกรณี



รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรมแต่ละประเภท

3.4.3 การลดลงของกำลังรับแรงอัดคอนกรีตเนื่องจากการดูดซึมน้ำของผงเปลือกหอยนางรมที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ผงเปลือกหอยนางรมมีอัตราการดูดซึมน้ำสูงกว่าผงปูนซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญ โดยลักษณะโครงสร้างพื้นผิวที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มขึ้นของผงเปลือกหอยนางรม ส่งผลให้เกิดการดูดซับและกักเก็บน้ำผสมไว้ภายในอนุภาค เมื่อมีการใช้ผงเปลือกหอยนางรมทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น ภายใต้ปริมาณน้ำผสมคงที่ ปริมาณน้ำอิสระที่สามารถเข้าร่วมในกระบวนการไฮเดรชันกับอนุภาคซีเมนต์จึงลดลง กลไกการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบซีเมนต์ (อาทิ ไตรแคลเซียมซิลิเกต - C_3S และไดแคลเซียมซิลิเกต - C_2S) กับน้ำ เพื่อก่อตัวเป็นสารประกอบซีเมนต์ไฮเดรตหลัก ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($C-S-H$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) จึงดำเนินไปอย่างไม่สมบูรณ์ อันเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่ไม่เพียงพอต่อการสร้างพันธะเคมีที่แข็งแรงภายในโครงสร้างซีเมนต์ ซึ่งนำไปสู่การลดลงโดยตรงของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมผงเปลือกหอยนางรมในอัตราส่วนสูง

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษา พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรมทั้งในรูปแบบที่ผ่านการเผา (BOC) และไม่ผ่านการเผา (NOC) ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง โดยการใช้ BOC ในอัตราส่วนร้อยละ 25 ยังคงให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ยอมรับได้ คือ 205 ksc มีค่าลดลงร้อยละ 14 จากคอนกรีตปกติ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เป็นร้อยละ 50 กำลังรับแรงอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จึงควรพิจารณาปรับลดอัตราการแทนที่ของผงเปลือกหอยนางรม หรือเลือกใช้คอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรมในงานที่ไม่ต้องการกำลังรับแรงอัดสูง

วัสดุที่มี $CaCO_3$ หรือ CaO สูงชนิดอื่น ๆ อาทิเช่น เปลือกไข่ เปลือกหอย และกระดูกสัตว์ ได้รับการศึกษาและแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุเติมเต็ม (Filler) หรือวัสดุประสานรอง (Supplementary Cementitious Material - SCM) เมื่อใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ในปริมาณที่จำกัด โดยทั่วไปไม่เกินร้อยละ 20-25 โดยมวล การใช้งานในอัตราส่วนดังกล่าวสามารถช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้ ในขณะที่ยังคงรักษา

สมรรถนะทางวิศวกรรมที่สำคัญของคอนกรีตให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ [1,4-5,7]

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแสดงให้เห็นว่า เปลือกหอยนางรมมีปริมาณแคลเซียมสูง เป็นองค์ประกอบหลัก แต่มีปริมาณซิลิกอนและอะลูมิเนียมต่ำกว่าปูนซีเมนต์ ซึ่งแสดงถึงความไม่สมดุลขององค์ประกอบทางเคมีที่จำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยตรงเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ หากไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีเพิ่มเติม ผงเปลือกหอยนางรมจะพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ต่ำกว่าการใช้ผงปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวอนุภาคของผงเปลือกหอยนางรมเผยให้เห็นถึงความพรุนที่สูงกว่าและรูปร่างที่ไม่เป็นระเบียบเมื่อเทียบกับผงปูนซีเมนต์ ลักษณะดังกล่าวส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในโครงสร้างคอนกรีตมากขึ้น ซึ่งนำไปสู่ความพรุนโดยรวมที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ อัตราการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าของผงเปลือกหอยนางรมยังลดปริมาณน้ำอิสระที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดภาวะขาดน้ำในส่วนผสมคอนกรีต ส่งผลเสียต่อคุณสมบัติการไหลตัวและการกระจายตัว หากไม่มีการปรับสัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอย่างเหมาะสม ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตจะลดลง และส่งผลกระทบต่อพัฒนาที่กำลังรับแรงอัด

แม้จะมีข้อจำกัดด้านศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยตรงเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ แต่การใช้ผงเปลือกหอยนางรมที่มีขนาดอนุภาคละเอียดในปริมาณที่เหมาะสม สามารถทำหน้าที่เป็นฟิลเลอร์ (Filler) เข้าไปเติมเต็มช่องว่างในโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีต ส่งผลให้ความหนาแน่นโดยรวมเพิ่มขึ้น และอาจส่งผลดีต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดในระยะยาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของผงเปลือกหอยนางรมเผา (BOC) หากมีการควบคุมสัดส่วนของส่วนผสมและการบ่มอย่างเหมาะสม

ในคอนกรีตที่ผสมผงเปลือกหอยนางรมในปริมาณมาก การบ่มในน้ำที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเสริมการพัฒนากำลังรับแรงอัด เนื่องจากลักษณะที่เป็นผงละเอียดและความพรุนของผงเปลือกหอยนางรมต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นในการก่อตัวเป็นเฟสผล โดยพบว่าอายุการบ่มที่นานขึ้นสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ผงเปลือกหอยนางรมเผาสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในคอนกรีตได้ในอัตราส่วนที่จำกัด โดยยังคงรักษาระดับกำลังรับแรงอัดให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานที่ไม่ต้องการกำลังรับแรงอัดสูง อาทิเช่น คอนกรีตสำหรับงานที่ไม่รับน้ำหนัก หรือผลิตภัณฑ์บล็อกก่อสร้าง นอกจากนี้ ในมิติของความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม การนำเปลือกหอยนางรมมาใช้ยังช่วยลดปริมาณของเสียอันตรายจากภาคอุตสาหกรรม และมีศักยภาพในการตรึงโลหะหนัก อาทิเช่น แคดเมียม ซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงของการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมทางน้ำและดินในระยะยาว อันเป็นผลพลอยได้เชิงบวกจากการใช้เปลือกหอยนางรมทดแทนปูนซีเมนต์

5. ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้การนำเปลือกหอยนางรมมาใช้ในงานคอนกรีตอย่างมีประสิทธิภาพและได้คุณสมบัติที่ดียิ่งขึ้น ขอเสนอแนะแนวทางดังต่อไปนี้

5.1 ปรับลดอัตราส่วนผสมคอนกรีต

จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณผงเปลือกหอยนางรมในส่วนผสมส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ยังคงรักษาระดับกำลังอัดที่ต้องการ ควรดำเนินการทดลองเพิ่มเติมโดยปรับลดอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงเปลือกหอยนางรม ในอัตราส่วนร้อยละ 5 ถึง ร้อยละ 20 ตามลำดับ หรือปรับสัดส่วนของส่วนผสมคอนกรีตโดยรวม เพื่อพัฒนาสูตรคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานผงเปลือกหอยนางรม ซึ่งการทดสอบในงานวิจัยนี้ได้ช่วยกำหนดช่วงปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริงทางวิศวกรรม

5.2 ตรวจสอบคอนกรีตด้วยวิธี Petrographic Analysis of Concrete

ตรวจสอบคอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรมในสถานะแข็งด้วยวิธี Petrographic Analysis ตามมาตรฐาน ASTM C856 / C856M: Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete เพื่อระบุองค์ประกอบและคุณสมบัติของคอนกรีตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ รวมถึงอธิบายลักษณะพื้นผิวอนุภาคของผงเปลือกหอยนางรมที่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัด [20]

5.3 พิจารณาการใช้สารผสมเพิ่ม (Admixtures)

การใช้สารผสมเพิ่ม อาทิเช่น สารลดน้ำ (Water-reducing Admixture) อาจช่วยปรับปรุงความสามารถในการทำงานของคอนกรีตที่ผสมผงเปลือกหอยนางรม โดยยังคงรักษาสัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

5.4 ศึกษาศักยภาพของการใช้งานร่วมกับวัสดุพอซโซลาน

เนื่องจากคอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรมแบบเผาส่งแสงแวววาวที่ติดกับผิวไม่เหมาะในด้านกำลังรับแรงอัด จึงควรศึกษาการใช้คอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรมแบบเผาร่วมกับวัสดุพอซโซลานอื่น ๆ เพื่อเพิ่มศักยภาพในการพัฒนากำลังอัดในระยะยาว

5.5 ศึกษาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิต

ในกระบวนการผลิตผงเปลือกหอยนางรมยังต้องใช้พลังงานความร้อนเพื่อเปลี่ยน CaCO_3 เป็น CaO จึงยังคงปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เช่นเดียวกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ จึงควรมีการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณ รวมถึงการปล่อยสารประกอบอื่น ๆ เพื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมในการใช้งานอย่างแพร่หลาย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอกำแพงคอย จังหวัดสระบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เผาส่งเปลือกหอยนางรมซึ่งเป็นส่วนสำคัญในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Klathae, T., Yingchaloenkitkhajorn, K., Jantakool, K., & Abdulmatin, A. (2022). Non-Burnt Ground Oyster Shell Waste Interlocking Block. *Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal*, 14(2), 358-371.

[2] Seesanong, S., Seangarun, C., Boonchom, B., Laohavisuti, N., Boonmee, W., Thompho, S., & Rungrojchaipon, P. (2024). Low-Cost and Eco-Friendly Calcium Oxide Prepared via Thermal Decompositions of Calcium Carbonate and Calcium Acetate Precursors Derived from Waste Oyster Shells. *Materials*, 17(15), 3875.

[3] Windom, H. L., & Smith, R. G. (1972). Distribution of iron, magnesium, copper, zinc, and silver in oysters along the Georgia coast. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 29(4), 450-452.

[4] Paruthi, S., Khan, A. H., Kumar, A., Kumar, F., Hasan, M. A., Magbool, H. M., & Manzar, M. S. (2023). Sustainable cement replacement using waste eggshells: A review on mechanical properties of eggshell concrete and strength prediction using artificial neural network. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02160.

[5] Palomino-Guzmán, E. R., González-López, A., Olmedo-Montoya, J., Sanchez-Echeverri, L. A., & Tovar-Perilla, N. J. (2024). A Sustainable Approach Using Beef and Pig Bone Waste as a Cement Replacement to Produce Concrete. *Sustainability*, 16(2), 701.

[6] Seo, J. H., Park, S. M., Yang, B. J., & Jang, J. G. (2019). Calcined oyster shell powder as an expansive additive in cement mortar. *Materials*, 12(8), 1322.

[7] Abinaya, S., & Venkatesh, S. P. (2016). An effect on oyster shell powder's mechanical properties in self compacting concrete. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol*, 5(6), 11785-11789.

[8] Bamigboye, G. O., Nworgu, A. T., Odetoan, A. O., Kareem, M., Enabulele, D. O., & Bassey, D. E. (2021). Sustainable use of seashells as binder in concrete production: Prospect and challenges. *Journal of Building Engineering*, 34, 101864.

[9] Hong, Y. M., & Choudhury, S. R. (2024). The Substitution Effect of the Fine Aggregate in Concrete with Oyster Shell. *Materials*, 17(24), 6148.

[10] กองทัพอากาศ. (2563). *ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (พ.ศ.2561 - 2580) (ฉบับปรับปรุง พ.ศ.2563)*. www.rtaf.mi.th/Document/Publication/RTAF%20Strategy_Final_04122563.pdf

[11] คณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2560). *ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580)*. กรุงเทพฯ: สำนักนายกรัฐมนตรี.

[12] Maolanont, T., & Pochanart, P. (2023). The BCG Economic Model in Practice: A Case Study of Thai Eastern Eco-

- Industrial Land. *International Journal of Sustainable Development & Planning*, 18(12).
- [13] Zuo, Z. C., & Bennett, T. (2021). The chemical and mechanical effects of calcium carbonate precipitation for cement-based materials exposed to carbonated brine. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 104, 103221.
- [14] ASTM C33/C33M-23 (2023) "Standard Specification for Concrete Aggregates," ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [15] Bellei, P., Torres, I., Solstad, R., & Flores-Colen, I. (2023). Potential Use of Oyster Shell Waste in the Composition of Construction Composites: A Review. *Buildings*, 13(6), 1546.
- [16] Zhang, Z. J., Liu, J. B., Li, B., Yu, G. X., & Li, L. (2019). Experimental study on factors affecting the physical and mechanical properties of shell lime mortar. *Construction and Building Materials*, 228, 116726.
- [17] Chen, Z., Chen, W., Mai, C., Shi, J., Xie, Y., & Hu, H. (2021). Experimental study on the compressive behaviors of brick masonry strengthened with modified oyster shell ash mortar. *Buildings*, 11(7), 266.
- [18] ASTM C188-17 (2017) "Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement," ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [19] Standard, B. (2009). Testing hardened concrete. *Compressive strength of test specimens, BS EN*, 12390-3.
- [20] ASTM C856/C856M-20. (2020). Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.