ST-19

ผลกระทบของผงเปลือกหอยนางรมเผาต่อระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

Effect of Calcined Oyster Shell on Setting Time and Compressive Strength of Fly Ash Geopolymer

ไพฑูรย์ นาแซง[1] ชัยชาญ ยุวนะศิริ[2] และวีระวัฒน์ วรรณกุล[3]
Phaithun Nasaeng[1], Chaichan Yuwanasiri[2], and Weerawat Wannakul[3]
[1,2,3] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
อีเมล: phaithun.nas@neu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของผงเปลือกหอยนางรมเผาต่อระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ วัสดุตั้งต้นหลักคือเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนในประเทศไทย วัสดุทดแทนใช้ผงเปลือกหอยนางรมเผาแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก สารละลายอัลคาไลใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต กำหนดอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 0.60 และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 1.00 สำหรับทุกตัวอย่าง ทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัด จากผลการศึกษาพบว่าระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณผงเปลือกหอยนางรมเผาเพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อตัวอย่างถูกบ่มในสภาวะความร้อนสูง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการบ่มแบบปกติกำลังอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ผสมผงเปลือกหอยนางรมเผามีการพัฒนากำลังดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม

คำหลัก: ผงเปลือกหอยนางรมเผา, เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์, ระยะเวลาการก่อตัว, กำลังอัด

Abstract

The objective of this research was to study the effect of calcined oyster shells on setting time and compressive strength of fly ash geopolymer. The main synthesis material was fly ash from the thermal power plants in Thailand. Calcined oyster shells were used as the substitute material for partial replacement of fly ash at the rates of 0, 10, and 20 by weight. Sodium hydroxide solution with a concentration of 10 M and sodium silicate were used as alkali solutions. A liquid to binder ratio of 0.60 and a sodium hydroxide to sodium silicate solution ratio of 1.00 were used for all samples. The setting time and compressive strength of geopolymer paste were properties tested. From the results of the study, it was found that the setting time of geopolymer paste decreased with an increase in calcined oyster shell content. The compressive strength results showed a

decreasing trend when the sample was cured in high heat conditions. However, in normal curing conditions, the compressive strength of the fly ash geopolymer containing calcined oyster shell was significantly improved compared to the control sample.

Keywords: calcined oyster shell, fly ash geopolymer, setting time, compressive strength

บทนำ

อุตสาหกรรมอาหารทะเลสำเร็จรูปเป็นธุรกิจที่มีการเติบโตอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความต้องการของผู้บริโภคอาหารทะเลมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นทำให้ผู้ผลิตและผู้จัดจำหน่ายอาหารทะเลต้องเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของประชาชน จึงทำให้มีขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายเองได้ในธรรมชาติ ได้แก่ เปลือกหอยนางรม ซึ่งได้มีการนำไปกองทิ้งไว้เป็นจำนวนมาก ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและเป็นขยะมูลฝอยในชุมชน ปัจจุบันมีการนำเปลือกหอยที่กองทิ้งไว้ไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น การทำเครื่องประดับและของตกแต่งบ้านเป็นบางส่วน นอกจากนี้ในการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาวัสดุก่อสร้างมีงานวิจัยทั้งในระดับชาติและระดับนานาชาติที่นำเอาเปลือกหอยนางรมไปใช้เป็นสารซีเมนต์ธรรมชาติเพื่อทดแทนการใช้งานวัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ จากการศึกษาของ Naqi และคณะ (2020) พบว่าการใช้ผงเปลือกหอยนางรมเผาเป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์จะช่วยปรับปรุงกำลังอัดของมอร์ต้าร์ได้ทั้งอายุต้นและอายุปลาย เนื่องจากผงเปลือกหอยนางรมเผาอุดมด้วยแคลเซียมออกไซด์ช่วยเพิ่มกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลในเรื่องของความแข็งแรง

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่มีลักษณะคล้ายกับการใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ สังเคราะห์ได้จากการนำวัสดุผงละเอียดที่มีส่วนประกอบของซิลิกาและอะลูมินาซึ่งอยู่ในรูปอสัณฐานผสมกับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตแล้วบ่มด้วยความร้อน จากนั้นความร้อนจะกระตุ้นปฏิกิริยาทำให้ซิลิกอนและอะลูมิเนียมเกิดปฏิกิริยาและเกิดการรวมตัวแบบควบแน่นหรือโพลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับการเชื่อมกันของโมเลกุลหินที่เกิดขึ้นในธรรมชาติจึงทำให้จีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติเด่นสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานคอนกรีตได้ (Davidovits, 1994) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติเด่นกว่าวัสดุเชื่อมประสานแบบดั้งเดิมหลายประการ ได้แก่ ค่ากำลังอัดสูงในช่วงอายุต้น ความสามารถการซึมผ่านน้ำต่ำ การหดตัวต่ำ ความคืบต่ำ ทนไฟ ทนทาน ต่อสภาวะการแข็งและการละลายของน้ำสลับกัน ทนทานต่อการสัมผัสสารละลายซัลเฟตและการกัดกร่อนของสารละลายกรด เป็นต้น (Duxson et al., 2007) ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่ที่น่าสนใจและควรศึกษาพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างหรือวัสดุทางเลือกในอนาคต แต่อย่างไรก็ตามในการพัฒนาความแข็งแรงจำเป็นจะต้องใช้พลังงานความร้อนสูงจึงทำให้ต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสารเชื่อมประสานแบบเดิม หากต้องการใช้งานในอุณหภูมิปกติจำเป็นต้องใช้ระบบการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันแบบเดิมเข้ามาร่วมด้วย จากงานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ (2018) ได้ศึกษาผลกระทบของการใช้วัสดุที่อุดมไปด้วยแคลเซียมออกไซด์ 3 ชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ต่อการพัฒนากำลังของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ในสภาวะการบ่มแบบปกติ ซึ่งพบว่าเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีการก่อตัวเร็วขึ้น การใช้ปูนซีเมนต์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับเถ้าลอยทำให้ตัวอย่างที่ทดสอบมีการพัฒนากำลังที่ดีขึ้นมากกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยเพียงชนิดเดียว เนื่องจากแคลเซียมไอออนเพิ่มเติมจากปูนซีเมนต์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอยและสร้างผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาภายในเมทริกซ์จีโอโพลิ

เมอร์ส่งผลให้มีการพัฒนาความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น จากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุผสมเพิ่มที่ช่วยให้ทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้นเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ลดขั้นตอนที่อาจจะยุ่งยากต่อการใช้งานของจีโอโพลิเมอร์ และเมื่อวัสดุชนิดนั้นเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์แล้ว การนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่จะเป็นการช่วยแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมและอาจจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตลงด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการประยุกต์ใช้ผงเปลือกหอยนางรมเผาในการสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์ร่วมกับเถ้าลอย โดยทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณผงเปลือกหอยนางรมเผาต่อระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ทำการออกแบบส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์โดยใช้ผงเปลือกหอยนางรมเผาแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่ยังไม่แข็งตัว ได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัวต้นและปลาย จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างด้วยความร้อนและแบบปกติเพื่อศึกษาการพัฒนากำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณผงเปลือกหอยนางรมเผาต่อระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ในสภาวะการบ่มด้วยความร้อนและการบ่มแบบปกติ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1.1 วัสดุผงละเอียดสำหรับสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์แสดงดังภาพที่ 1 ได้แก่ เถ้าลอย (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เปลือกหอยนางรม (COS) จากพื้นที่ตำบลอ่างศิลา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี นำมาล้างให้สะอาดแล้วตากให้แห้งจากนั้นนำไปเผาในเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แล้วนำมาบดด้วยลูกบอลเหล็กจนมีลักษณะเป็นผงละเอียด และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ตามมาตรฐาน มอก.15-2555 (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2555)

1.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์

1.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ที่มีปริมาณซิลิกาออกไซด์ร้อยละ 30.24 โซเดียมออกไซด์ร้อยละ 12.53 และน้ำร้อยละ 57.23 โดยน้ำหนัก

(ก) เถ้าลอย (ข) ผงเปลือกหอยนางรมเผา (ค) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ภาพที่ 1 ลักษณะของวัสดุผง

2. การออกแบบส่วนผสม

2.1 ออกแบบส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ควบคุม โดยกำหนดอัตราส่วนเถ้าลอยต่อของเหลวเท่ากับ 0.60 และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.00

2.2 กำหนดปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเปลือกหอยนางรมเผาในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก โดยอัตราส่วนผสมแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นใช้ปูนซีเมนต์แทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นตัวอย่างเปรียบเทียบในลักษณะการใช้วัสดุที่มีแคลเซียมออกไซด์สูงที่ใช้กันโดยทั่วไป

3. การเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์

3.1 ทำการเตรียมส่วนผสมของวัสดุผงตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ในภาชนะแบบปิดสนิท แล้วทำการเขย่าให้เถ้าลอยเข้ากันกับวัสดุผสมเพิ่มจนมีสีที่สม่ำเสมอ จากนั้นผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยเริ่มผสมวัสดุสารตั้งต้นกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เวลา 5 นาที เพื่อให้สามารถชะซิลิกาและไอออนของอะลูมินา หลังจากนั้นเทสารละลายโซเดียมซิลิเกตลงในหม้อผสมแล้วทำการผสมต่อเป็นเวลา 5 นาที

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ชื่อตัวอย่าง	น้ำหนักของวัสดุที่ใช้ (กรัม)				
	FA	COS	OPC	NaOH	NS
100FA	1200	-	-	360	360
10COS	1080	120	-	360	360
20COS	960	240	-	360	360
20OPC	80	240	-	360	360

3.2 เตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม.^{3} เทเข้าแบบตามมาตรฐานโดยใช้เกรียงเหล็กตักจีโอโพลิเมอร์เพสต์ใส่แบบหล่อตามมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109/C109M-20b, 2020) เมื่อเทจีโอโพลิเมอร์เพสต์เข้าแบบเสร็จทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที แล้วห่อด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3 การบ่มตัวอย่างแบบกระตุ้นด้วยความร้อนนำตัวอย่างพร้อมแบบหล่อเข้าตู้อบเพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการถอดแบบหล่อแล้วห่อตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติก และบ่มต่อที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ

3.4 การบ่มตัวอย่างแบบทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องนำตัวอย่างที่ห่อด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการถอดแบบหล่อแล้วห่อตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติก และบ่มต่อที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ

4. วิธีการทดสอบ

4.1 ทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นและปลายของจีโอโพลิเมอร์เพสต์โดยใช้เครื่องมือไวแคต ตามมาตรฐาน ASTM C191 (ASTM C191-19, 2019) โดยนำเสนอผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง

4.2 ทำการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 7 และ 28 วัน โดยใช้เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine, UTM) ขนาด 1,000 กิโลนิวตัน ตามมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109/C109M-20b, 2020)

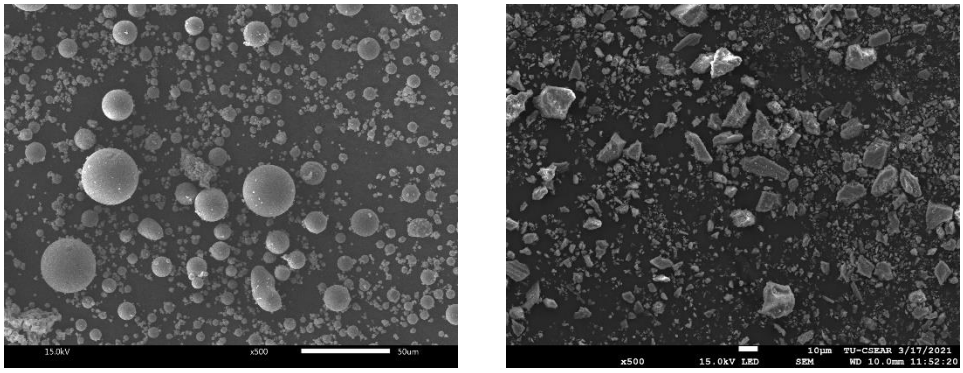
ผลการวิจัย

1. ลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัสดุ

คุณสมบัติทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของวัสดุตั้งต้นแสดงในตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ร้อยละ 27.5 อะลูมินาออกไซด์ร้อยละ 14.3 เฟอร์ริกออกไซด์ร้อยละ 13.6 และแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 25.5 เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ASTM C618 (ASTM C618-19, 2019) จัดเป็นเถ้าถ่านหินชนิด C สำหรับผงเปลือกหอยนางรมเผาองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ แคลเซียมออกไซด์มีอยู่ร้อยละ 85.53 ซึ่งมาจากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีอยู่ในเปลือกหอยที่เป็นของแข็งห่อหุ้ม ลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยและผงเปลือกหอยนางรมเผามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 และ 2.62 ตามลำดับ สำหรับความละเอียดของเถ้าลอยและผงเปลือกหอยนางรมเผามีร้อยละค้างตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับ 25.3 และ 24.7 ลักษณะของวัสดุผงและภาพถ่ายขยายกำลังสูงแสดงดังภาพที่ 2 พบว่าอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะทางกายภาพคล้ายลูกปืนเป็นก้อนกลมตัน ผิวเรียบ มีรูพรุนน้อยและมีลักษณะคละกันดี ในส่วนของผงเปลือกหอยนางรมเผาพบว่ามีลักษณะเป็นแท่งยาวๆ ก้อนเหลี่ยม คละด้วยก้อนกลม มีส่วนที่ใหญ่มากกว่าเศษเล็กๆ พื้นผิวหยาบและเรียบปะปนกัน

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยและผงเปลือกหอยนางรมเผา

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	
	FA	COS
SiO_2	27.50	9.04
CaO	25.50	85.53
Al_2O_3	14.30	0.85
Fe_2O_3	13.60	0.83
SO_3	6.33	0.75
MgO	2.47	1.45
Na_2O	2.04	0.62
K_2O	1.85	0.26
TiO_2	0.33	0.09
P_2O_5	0.32	0.12
Specific gravity	2.61	2.62
Retained on a 325-mesh sieve, (%)	25.3	24.7
Specific surface area (cm^2/g)	2719	4960



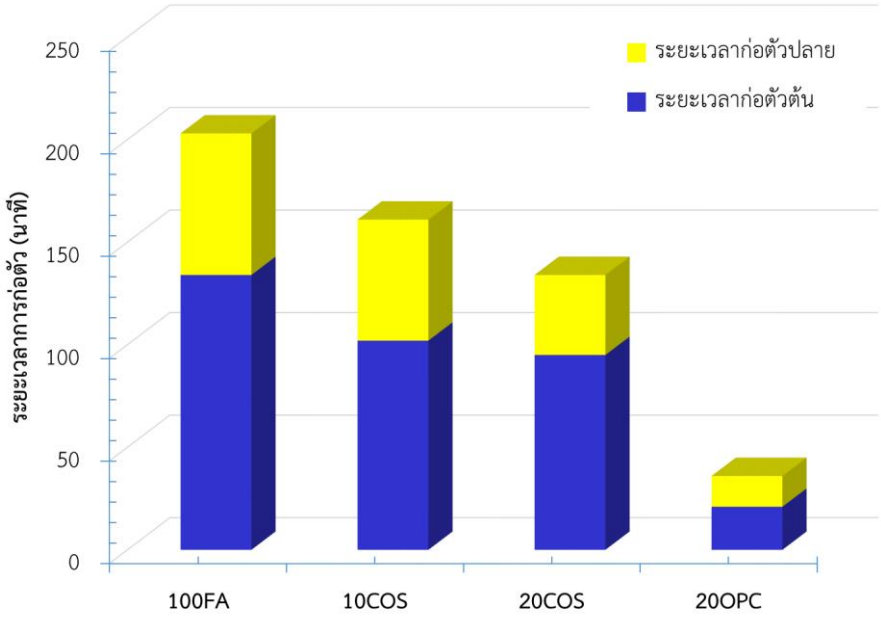
(ก) เถ้าลอย (ข) ผงเปลือกหอยนางรมเผา

ภาพที่ 2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง 500 เท่าของเถ้าลอยและผงเปลือกหอยนางรม

2. ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

จากภาพที่ 3 แสดงผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์พบว่าระยะเวลาการก่อตัวมีค่าลดลงเมื่อปริมาณผงเปลือกหอยนางรมเผาเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ โดยระยะเวลาการก่อตัวต้นของตัวอย่าง 100FA, 10COS, 20COS และ 20OPC มีค่าเท่ากับ 134, 102, 95 และ 21 นาที ตามลำดับ และมีระยะเวลาการก่อตัวปลายเท่ากับ 203, 161, 134 และ 36 นาที ตามลำดับ แสดงให้ว่าการเติมผงเปลือกหอยนางรมเผาในส่วนผสมของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์จะช่วยเร่งปฏิกิริยาทำให้มีการก่อตัวเร็วมากขึ้นเมื่อเปรียบกับตัวอย่างควบคุม (100FA) ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้นในตัวอย่างที่มีผงเปลือกหอยนางรมเผาและปูนซีเมนต์อาจทำให้เกิดเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate gel, C-S-H) คล้ายกับปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำควบคู่ไปกับการเกิดเจลโซเดียมอะลูมิเนตซิลิเกตไฮเดรต (Sodium aluminate silicate hydrate gel, N–A–S–H) ทำให้มีระยะเวลาการก่อตัวที่ลดลงอย่างชัดเจน (Saha & Rajasekaran, 2017) ผลการวิจัยครั้งนี้สอดคล้องกับผลวิจัยของ Pangdaeng และคณะ (2014) ที่ศึกษาพบว่าการเติมปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงทำให้ปริมาณแคลเซียมในระบบจีโอโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น โดยแคลเซียมที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้มีไซต์นิวเคลียสพิเศษตกตะกอนและสามารถละลายในน้ำ ซึ่งเพิ่มอัตราการก่อตัวและทำให้ตัวอย่างแข็งตัวอย่างรวดเร็ว (Lee & Van Deventer, 2002)

เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายของตัวอย่างที่เติมผงเปลือกหอยนางรมเผาอัตราส่วนร้อยละ 20 (20COS) และตัวอย่างที่เติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนเดียวกัน (20OPC) พบว่าตัวอย่าง 20COS มีอัตราการก่อตัวที่ช้ากว่าทั้งระยะเวลาก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลาย แม้ว่าในอัตราส่วนผสมของ 20COS จะมีปริมาณแคลเซียมที่มากกว่าตัวอย่าง 20OPC เมื่อพิจารณาตามปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในตารางที่ 2 อาจเป็นเพราะผงเปลือกหอยนางรมเผามีความเป็นผลึกสูง (Yang & Jang, 2020) ทำให้สารละลายอัลคาไลสามารถชะละลายแคลเซียมอิออน (Ca^{2+}) ได้น้อย ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำที่มีอยู่ในสารละลายจึงทำให้แคลเซียมออกไซด์ละลายออกมาได้มากกว่า ผลการวิจัยครั้งนี้สอดคล้องกับผลวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ (2018) ที่พบว่าวัสดุที่สามารถปล่อยแคลเซียมออกไซด์ออกมาได้มากกว่าจะส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์สามารถก่อตัวได้ภายในระยะเวลาที่สั้น นอกจากนี้ยังมีการปล่อยความร้อนในระหว่างเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่าด้วย (Criado et al., 2014)



ภาพที่ 3 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

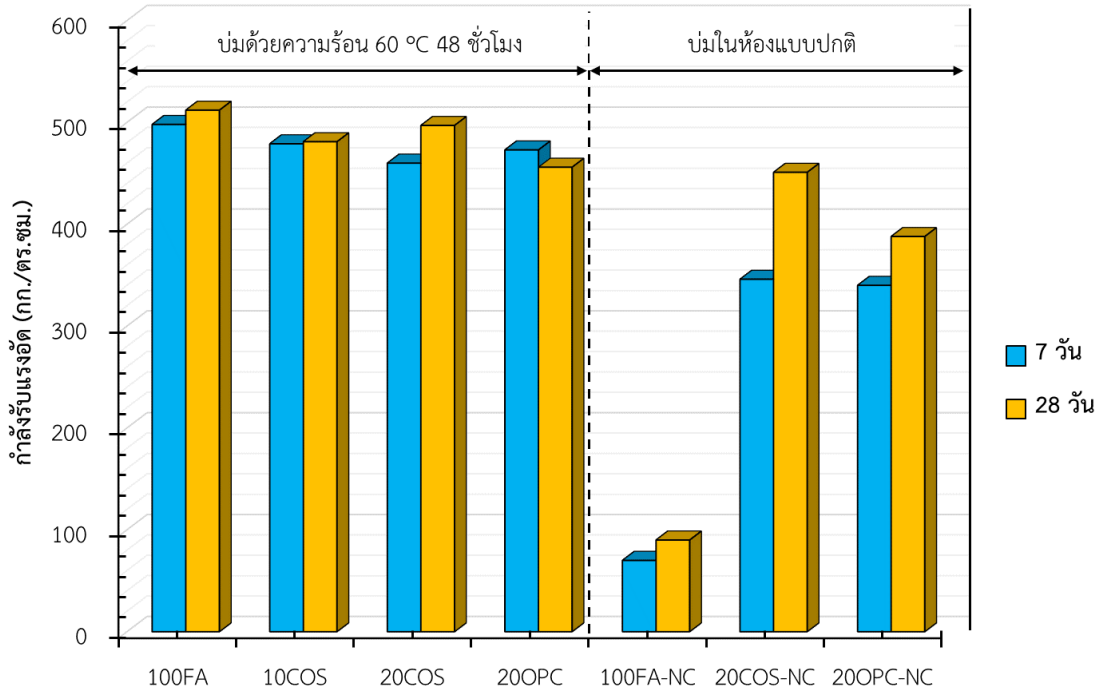
3. กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ผลกระทบของปริมาณการใช้ผงเปลือกหอยนางรมเผาต่อกำลังอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์แสดงดังตารางที่ 3 จากข้อมูลพบว่ากำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ผงเปลือกหอยนางรมเผาเช่นเดียวกับการเติมปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอยู่ในช่วงร้อยละ 5 – 11 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการกระตุ้นด้วยความร้อนทำให้กระบวนการควบแน่นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากเกินไปอาจจะส่งผลทำให้โครงข่ายของเมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์เริ่มต้นไม่ดีและเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนากำลัง (Chindaprasirt et al., 2018) นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่ได้จากแคลเซียมออกไซด์ที่ละลายในสารละลายด่างอาจจะเกิดขึ้นแบบไม่สมบูรณ์และมีโอกาสเปลี่ยนเป็นด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ไม่แข็งแรง (Lee & Van Deventer, 2002) โดยต่างจากการบ่มตัวอย่างในอุณหภูมิห้องปกติ จากภาพที่ 4 พบว่าในการศึกษาครั้งนี้ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยล้วน (100FA-NC) มีการพัฒนากำลังต่ำทั้งในช่วงอายุ 7 และ 28 วัน ในขณะที่การเติมผงเปลือกหอยนางรมเผาในอัตราส่วนผสมร้อยละ 20 (20COS-NC) ทำให้จีโอโพลิเมอร์มีการพัฒนากำลังอัดที่ดีขึ้นอย่างเด่นชัด โดยที่อายุ 7 และ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 394 และ 401 ตามลำดับ เช่นเดียวกับการเติมปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนเท่ากัน (20OPC-NC) ทำให้การพัฒนากำลังดีขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม เนื่องจากในกระบวนการชะละลายของผงเปลือกหอยนางรมเผาและปูนซีเมนต์มีอิออนของแคลเซียมเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยอิออนเหล่านี้ทำหน้าที่ปรับสมดุลประจุในโครงข่ายของจีโอโพลิเมอร์ และมีส่วนช่วยทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (Saha & Rajasekaran, 2017; Ahmari et al., 2012; Mahmoodi et al., 2021) ส่งผลให้ตัวอย่างเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ผสมผงเปลือกหอยนางรมเผาและปูนซีเมนต์มีการพัฒนากำลังอัดและโครงสร้างภายในดีขึ้น จากรายงานวิจัยของ Safari และคณะ (Safari et al., 2020) เชื่อว่าปริมาณออกไซด์ของซิลิกาและอะลูมินาที่มีอยู่ในวัสดุตั้งต้นมี

ผลกระทบต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง การเพิ่มระยะเวลาบ่มร้อนโดยใช้อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียสช่วยเร่งปฏิกิริยาและเพิ่มกำลังอัดให้สูงขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุสารตั้งต้นที่มีปริมาณแคลเซียมสูงเป็นสารตั้งต้นร่วมเป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถเร่งการก่อตัวและช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์ (Pangdaeng et al., 2014; Chindaprasirt et al., 2018)

ตารางที่ 3 กำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มในสภาวะแตกต่างกัน

ชื่อตัวอย่าง	กำลังอัดเมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 60° (กก./ซม.^{2})		กำลังอัดเมื่อบ่มแบบปกติ (กก./ซม.^{2})	
	อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน	อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน
100FA	498	512	70	90
10COS	479	481	-	-
20COS	460	497	346	451
20OPC	473	456	340	388



ภาพที่ 4 กำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วันของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการตรวจสอบผลกระทบของการใช้ผงเปลือกหอยนางรมเผาต่อระยะเวลาการก่อตัวและการพัฒนากำลังอัดภายใต้สภาวะการบ่มด้วยความร้อนและการบ่มแบบปกติของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ สรุปได้ดังนี้

1. การเพิ่มปริมาณผงเปลือกหอยนางรมเผาในส่วนผสมทำให้ระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายลดลง เช่นเดียวกับส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์พบว่ามีการก่อตัวที่รวดเร็วเนื่องจากปริมาณแคลเซียมที่ละลายได้ดีกว่าเหมาะสำหรับใช้ในงานวัสดุซ่อมแซม

2. การพัฒนากำลังของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่บ่มด้วยความร้อนมีแนวโน้มลดลงทั้งในตัวอย่างที่ผสมผงเปลือกหอยนางรมเผาและปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามในสภาวะการบ่มแบบปกติพบว่าการเติมผงเปลือกหอยนางรมเผาและปูนซีเมนต์ในส่วนผสมมีส่วนช่วยทำให้ตัวอย่างเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุเหลือทิ้งให้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้

ข้อเสนอแนะ

1. ในการใช้งานจริงต้องมีการศึกษาในเรื่องจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรม เพื่อทดสอบความสามารถในการทำงานได้ ระยะเวลาการก่อตัว การสูญเสียค่ายุบตัวและการพัฒนากำลังในช่วงอายุที่มากขึ้น

2. ควรมีการศึกษาเรื่องความคงทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายกรดและการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟต เพราะการใช้ผงเปลือกหอยนางรมทำให้มีปริมาณแคลเซียมที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายได้เพิ่มขึ้นอย่างมาก

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และทุนสนับสนุนงานวิจัยจากมหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

เอกสารอ้างอิง

Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V., & Zhang, L. (2012). Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. *Construction and Building Materials*, *35*, 718–729. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.044

ASTM C109/C109M-20b. (2020). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)*. ASTM International.

ASTM C191-19. (2019). *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. ASTM International.

ASTM C618-19. (2019). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International.

Chindaprasirt, P., Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Horpibulsuk, S., Poowancum, A., & Injorhor, B. (2018). Effect of calcium-rich compounds on setting time and strength development of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature. *Case Studies in Construction Materials*, *9*, e00198. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00198

Criado, Y. A., Alonso, M., Abanades, J. C., & Anxionnaz-Minvielle, Z. (2014). Conceptual process design of a CaO/Ca(OH)2thermochemical energy storage system using fluidized bed reactors. *Applied Thermal*

Engineering, *73*(1), 1087–1094. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.065

Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cements. *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 131–149.

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, *42*(9), 2917–2933. https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z

Lee, W. K. W., & Van Deventer, J. S. J. (2002). The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *211*(2–3), 115–126. https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00239-X

Mahmoodi, O., Siad, H., Lachemi, M., Dadsetan, S., & Sahmaran, M. (2021). Development of normal and very high strength geopolymer binders based on concrete waste at ambient environment. *Journal of Cleaner Production*, *279*, 123436. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123436

Naqi, A., Siddique, S., Kim, H. K., & Jang, J. G. (2020). Examining the potential of calcined oyster shell waste as additive in high volume slag cement. *Construction and Building Materials*, *230*, 116973. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116973

Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2014). Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. *Materials and Design*, *53*, 269–274. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.018

Safari, Z., Kurda, R., Al-Hadad, B., Mahmood, F., & Tapan, M. (2020). Mechanical characteristics of pumice-based geopolymer paste. *Resources, Conservation and Recycling*, *162*(July), 105055. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105055

Saha, S., & Rajasekaran, C. (2017). Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, *146*, 615–620. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.139

Yang, B., & Jang, J. G. (2020). Environmentally benign production of one-part alkali-activated slag with calcined oyster shell as an activator. *Construction and Building Materials*, *257*, 119552. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119552

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2555). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. In *มอก. เล่ม 1-2555*.