



อิทธิพลของความร้อนต่อสมบัติทางกายภาพของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมรีไซเคิลเป็นส่วนผสม

ธวัชชัย โทอินทร์ สุบรร ผลกะสิ และ เทอดเกียรติ วิชัยโย

สาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

แสงสุรีย์ พังแดง*

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม

พีร์นิธิ อักษร

ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 3143 4921 อีเมล: saengsuree@npu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.07.005

รับเมื่อ 21 กันยายน 2563 แก้ไขเมื่อ 23 กุมภาพันธ์ 2564 ต่อบรับเมื่อ 24 มีนาคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 7 กรกฎาคม 2565

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาความสามารถในการทนไฟของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวกระตุ้นและใช้มวลรวมจากวัสดุรีไซเคิล การเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจะใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเกลือเท่ากับ 0.86 และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 1.00 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวอย่างที่มีการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และกลุ่มที่ 2 ไม่มีการบ่มร้อน ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลที่อายุ 28 วัน ได้แก่ ค่ากำลังรับแรงอัด สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความต้านทานการซัดสี และความสมบูรณ์ของตัวอย่าง นอกจากนี้ยังได้ทดสอบความสามารถในการทนไฟ โดยทำการเผาในเตาที่อุณหภูมิเท่ากับ 200, 400 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัด สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความต้านทานการซัดสี และความสมบูรณ์ของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น และการเผาที่ 200 องศาเซลเซียส กำลังรับแรงอัดยังคงมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเผา นอกจากนี้ยังพบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส ไม่เหมาะแก่การใช้งานที่ต้องรับกำลังและการยึดเหนี่ยวสูง

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต วัสดุรีไซเคิล การทนไฟ ความร้อน



Influence of Heat on Physical Property of Geopolymer Concrete Containing Recycled Aggregates

Tawatchai Tho-In, Suban Phonkasi and Thoetkiat Wichaiyo

Department of Civil Technical Education, Faculty of Technical Education Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Khon Kaen, Thailand

Saengsuree Pangdaeng*

Division of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom, Thailand

Preenithi Akson

Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 3143 4921, E-mail: saengsuree@npu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.07.005

Received 21 September 2020; Revised 23 February 2021; Accepted 24 March 2021; Published online: 7 July 2022

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research paper presents the heat resistance of geopolymer concrete containing recycled material by firing at maximum to 600 degree Celsius. Geopolymer concrete made by using the liquid to fly ash ratio of 0.86 and a ratio of sodium hydroxide to sodium silicate solution was 1.00. Geopolymer concrete samples were categorized into two groups: hot cured at 60 degree Celsius for 48 h and without hot curing. At the age of 28 days, the mechanical test was performed to determine the compressive strength, coefficient of thermal conductivity, abrasion resistance, and the uniformity of the samples. The sample heating was furnace at temperature of 200, 400 and 600 degree Celsius for 2 h with a rising rate of 5 degree Celsius/minute. The results found that the compressive strength, coefficient of thermal conductivity, abrasion resistance, and the uniformity of the sample relatively decrease when firing temperature increased. And firing at 200 degree Celsius, geopolymer concrete can maintain strength by showing the equally compressive strength to unfiring. In addition, it was found that temperature over than 600 degree Celsius significantly negative affect to geopolymer concrete which further unsuitable for high strength and bonding applications.

Keywords: Geopolymer Concrete, Recycled Concrete, Fire Resistance, Heat

Please cite this article as: T. Tho-In, S. Phonkasi, T. Wichaiyo, S. Pangdaeng, and P. Akson, "Influence of heat on physical property of geopolymer concrete containing recycled aggregates," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 1, pp. 154-167, Jan.-Mar. 2023 (in Thai).

1. บทนำ

ความเสียหายจากไฟไหม้เป็นสิ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้กับโครงสร้างคอนกรีต สิ่งที่ต้องพิจารณาคือความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สิน โครงสร้างคอนกรีตที่สามารถทนทานต่อความร้อนจากไฟไหม้ได้เป็นสิ่งที่จะต้องศึกษา โครงสร้างคอนกรีตที่สามารถต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นได้นานเท่าใด ประสิทธิภาพในการช่วยชีวิตย่อมมากขึ้นตามไปด้วย

วัสดุจีโอโพลีเมอร์เป็นวัสดุทางเลือกที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในรูปของการเป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ [1], [2] เป็นผลจากการชะละลายของสารประกอบซิลิกา และอะลูมินาจากวัสดุอนินทรีย์ที่อยู่ในสถานะอสัณฐาน ด้วยสารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ [3] เกิดเป็นโครงสร้างเททราฮีดรอล (Tetrahedral) ของซิลิกอนและอะลูมินา ล้อมรอบออกซิเจนอะตอม [4], [5] นอกจากการใช้งานวัสดุจีโอโพลีเมอร์ในงานก่อสร้างแล้วยังมีการใช้เป็นวัสดุยึดเหนี่ยวระหว่างกรวดซีเมนต์ เช่น การป้องกันกรวดกร่อนของสารเคลือบเหล็ก การเคลือบเพื่อทนไฟ หรืองานโพนและเซรามิกที่ความร้อนไม่สูง รวมไปถึงใช้เพื่อการกักสารกัมมันตภาพรังสี สารที่เป็นพิษ และฉนวนกันความร้อน [6] โดยปกติการเตรียมจีโอโพลีเมอร์จะทำการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ก่อนหลังจากที่บรรจุลงแบบหล่อแล้วประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการพัฒนากำลังที่ดี [7], [8]

นอกจากการที่วัสดุจีโอโพลีเมอร์ถูกพัฒนาเพื่อเป็นวัสดุทางเลือกแล้วการพัฒนาวัสดุรวมก็เป็นสิ่งที่สำคัญ เพื่อเป็นการช่วยชะลอการใช้วัสดุธรรมชาติ เช่น การใช้เศษคอนกรีตหรือเศษวัสดุจากการก่อสร้าง เนื่องจากเศษวัสดุเหล่านี้มีจำนวนมากถึงร้อยละ 40 [8] หลายประเทศเริ่มใช้เศษคอนกรีตแล้ว เช่น จีน เกาหลี เยอรมนี ฮอนแลนด์ และญี่ปุ่น โดยสามารถใช้ประโยชน์จากเศษคอนกรีตได้สูงถึงร้อยละ 56 [9] โดยผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากสามารถให้สมบัติด้านกำลังและความทนทานที่ใกล้เคียงกับการใช้วัสดุรวมธรรมชาติ [10], [11]

เศษแก้วเป็นขยะอีกประเภทหนึ่งที่พบได้บ่อยทั้งในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ยานยนต์ และบรรจุภัณฑ์ ไม่ว่าจะเกิด

จากการทุบทิ้ง ทำลาย อุบัติเหตุ หรือแม้กระทั่งไม่มีความเหมาะสมในการใช้งาน เป็นปัญหาลักษณะเดียวกับเศษคอนกรีตแต่ในปริมาณที่น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม การนำเศษแก้วเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ดังนั้นการนำเศษแก้วมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต ไม่ว่าจะเป็นการบดละเอียดเพื่อแทนปูนซีเมนต์หรือเถ้าลอย การย่อยเพื่อใช้เป็นมวลรวมเนื่องจากมีความต้านทานแรงเฉือนที่สูง [12], [13] และจากการที่แก้วมีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกา จึงมีความพยายามที่จะทำการชะละลายซิลิกาที่มีอยู่เพื่อเป็นการเพิ่มซิลิกาออสสำหรับสร้างพันธะยึดเหนี่ยวในกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน [14] รวมถึงการใช้ผงแก้วละเอียดสำหรับงานที่ต้องการลดช่องว่างในเจล [15]

ดังนั้น ในการศึกษาที่มุ่งเน้นถึงความสามารถในด้านต้านทานความร้อนของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษแก้วย่อย และเศษคอนกรีตย่อยเป็นมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ตามลำดับ ทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความต้านทานการขีดสีและความสมบูรณ์ของตัวอย่างเมื่อผ่านการเผาในห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิ 200, 400 และ 600 องศาเซลเซียส

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

2.1.1 เถ้าลอย (Fly Ash; FA)

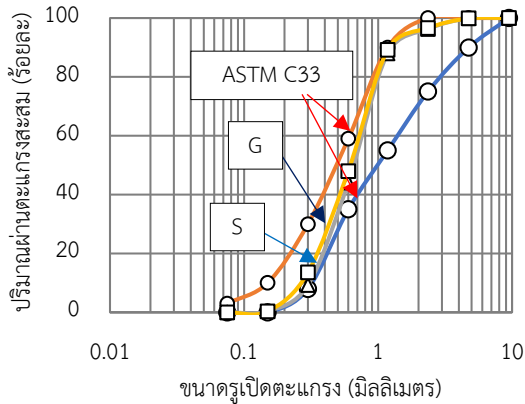
เถ้าลอยได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง อนุภาคค่อนข้างกลมและกลวง ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 21.65 ไมครอน ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 55 ค่าความละเอียด 2,250 ซม²/กรัม (Blaine Fineness) ความถ่วงจำเพาะ 2.23 และเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่า เป็นเถ้าลอยประเภทแคลเซียมสูงตามลักษณะการจำแนกตามมาตรฐาน ASTM C618 [16] แสดงดังตารางที่ 1

2.1.2 มวลรวมละเอียด

1) ทรายแม่น้ำ (Local River Sand; S) ใช้ทรายแม่น้ำซี มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.93 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.63 และมีค่ามอดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.81

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย (ร้อยละ)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃	P ₂ O ₅	BaO	LOI
35.86	15.05	2.34	17.16	1.58	3.12	17.31	5.94	0.30	0.17	0.10


รูปที่ 1 การกระจายขนาดคละของมวลรวมละเอียด

2) เศษแก้วย่อย (Crushed Container Glass; G) ได้จากการย่อยเศษขวดแก้วสีน้ำตาล มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.21 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.53 และมีค่ามอดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.78 โดยขนาดคละของมวลรวมละเอียดแสดงดังรูปที่ 1

2.1.3 มวลรวมหยาบ

1) เศษคอนกรีตย่อย (Crushed Recycled Concrete; C) ได้จากการย่อยก้อนตัวอย่างคอนกรีตธรรมดาที่มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 35–40 เมกกะปาลกาล ที่อายุ 28 วัน ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 5.57 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.43

2) หินปูนย่อย (Crushed Limestone; L) ใช้หินปูนย่อยช่วงขนาด 9.0–12.5 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว) ที่มีขายในท้องตลาด มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.65 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.68

2.1.4 สารละลายต่าง (Alkali Solution)

ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, NH) ความเข้มข้นเท่ากับ 8, 12 และ 16 โมลาร์ (Molar; M) ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃, NS) ที่ประกอบไปด้วย

Na₂O Si₂O และ H₂O ในปริมาณร้อยละ 13.73, 32.17 และ 54.10 ตามลำดับ เป็นสารกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชัน (Polymerization Reaction)

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

2.2.1 จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสด

ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตใช้มวลรวมละเอียดเป็นทรายแม่น้ำและเศษแก้วย่อย ในขณะที่มวลรวมหยาบเป็นหินปูนย่อยและเศษคอนกรีตย่อย เปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตธรรมดา สัดส่วนผสมที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2 การเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสด เริ่มจากการผสมเถ้าลอยและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 5 นาที เติมนมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบพร้อมกัน แล้วผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นเติมนสารละลายโซเดียมซิลิเกตและผสมเป็นเวลา 5 นาที

2.2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

นำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสดหล่อในแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร แล้วปล่อยให้ที่อุณหภูมิห้อง (25–28 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ได้ในแต่ละส่วนผสมถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ทำการบ่มร้อน (Temperature Curing; T) ในตู้ควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ทำการแกะแบบและหุ้มพลาสติกอีกครั้งก่อนนำเข้าห้องบ่ม และกลุ่มที่ 2 ไม่ทำการบ่มร้อน (Ambient Temperature Curing; A) แกะแบบหล่อเมื่ออายุได้ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นหุ้มด้วยพลาสติก แล้วนำเข้าห้องบ่มจนอายุครบ 28 วัน โดยห้องบ่มทำการควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 22–25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 50

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (1 ลบ.ม.)

ตัวอย่าง	เถ้าลอย (กิโลกรัม)	มวลรวม (กิโลกรัม)				สารละลายต่าง (กิโลกรัม)			
		S	G	L	C	NH 8 M	NH 12 M	NH 16 M	NS
8SLA*	450	675		1100		193			193
12SLA	450	675		1100			193		193
16SLA	450	675		1100				193	193
8SCA	450	675			1100	193			193
12SCA	450	675			1100		193		193
16SCA	450	675			1100			193	193
8GLA	450		675	1100		193			193
12GLA	450		675	1100			193		193
16GLA	450		675	1100				193	193
8GCA	450		675		1100	193			193
12GCA	450		675		1100		193		193
16GCA	450		675		1100			193	193
8SLT**	450	675		1100		193			193
12SLT	450	675		1100			193		193
16SLT	450	675		1100				193	193
8SCT	450	675			1100	193			193
12SCT	450	675			1100		193		193
16SCT	450	675			1100			193	193
8GLT	450		675	1100		193			193
12GLT	450		675	1100			193		193
16GLT	450		675	1100				193	193
8GCT	450		675		1100	193			193
12GCT	450		675		1100		193		193
16GCT	450		675		1100			193	193

* หมายถึง จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีทรายแม่น้ำ (S) หินปูนย่อย (L) และใช้ NH 8 โมลาร์ เป็นส่วนผสม แล้วไม่มีการบ่มร้อน (A)

** หมายถึง จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีทรายแม่น้ำ (S) หินปูนย่อย (L) และใช้ NH 8 โมลาร์ เป็นส่วนผสม แล้วทำการบ่มร้อน (T) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

2.3 การทดสอบ

การทดสอบสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเมื่ออายุครบ 28 วัน แบ่งเป็น 2 กรณี 1) ไม่มีการเผา (ควบคุม) และ 2) ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 200, 400 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยตัวอย่างจะถูกเผาภายในเตาเผาระบบปิดที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการและคงที่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนจะปล่อยให้เย็นตามธรรมชาติ

2.4 กำลังรับแรงอัด

การหาค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) และอัตราการให้แรงมีค่าเท่ากับ 0.35 เมกกะปาสคาลต่อวินาที ตามมาตรฐาน ASTM C39 [17]

2.5 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity Coefficient; K)

ทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง ISOMET 2114 ภายในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ 28–30 องศาเซลเซียส โดยมีหน่วยเป็นวัตต์/เมตร.เคลวิน

2.6 ความสมบูรณ์

การหาค่าความสมบูรณ์ของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเป็นการทดสอบสมบัติของตัวอย่างแบบไม่ทำลายโดยการวัดความเร็วคลื่นความถี่สูงที่ส่งผ่านเข้าไปในตัวอย่างหรือเรียกว่า Ultra-pulse Velocity Test (UPV) ตัวอย่างที่มีความแน่นจะมีค่า UPV สูง ในการศึกษาค้างนี้ใช้เครื่อง Ultra-Sonic Scope, Model No: MIN-005-1-50 ของ Marui & CO., LTD: Japan ในการหาค่า UPV โดยมีหน่วยเป็น เมตร/วินาที

2.7 ความต้านทานการขัดสี

ความสามารถต้านทานการขัดสีเป็นการวิเคราะห์จากปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียเมื่อตัวอย่างผ่านการทดสอบโดยใช้เครื่อง Rotating-Cutter Drill Press with Double Load ตามมาตรฐานการทดสอบ (ASTM C944/C944M-20) [18]

3. ผลการทดลอง

3.1 กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทั้งก่อนและหลังการเผา ที่อายุ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 3

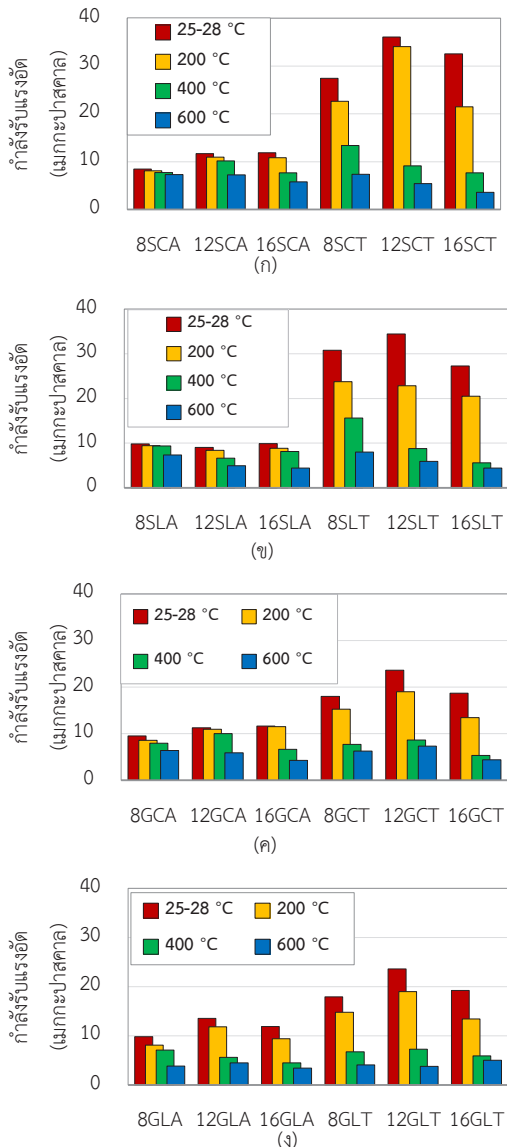
3.1.1 ก่อนการเผา

ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าอยู่ระหว่าง 8.47–13.53 และ 17.92–36.04 เมกกะปาสกาล สำหรับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่ม A และ T ตามลำดับ ดังรูปที่ 2 ในขณะที่การกระตุ้นด้วยความร้อนแก่จีโอพอลิเมอร์ในช่วงแรกสามารถเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดได้สูงถึง 3 เท่า เนื่องจากความร้อนสามารถกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน [19] ความเข้มข้นของ NH เท่ากับ 12 โมลาร์ ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้ง A และ T ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 36.04

ตารางที่ 3 ค่ากำลังรับแรงอัดตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (เมกกะปาสกาล)			
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	25-28	200	400	600
8SLA	9.85	9.42	9.36	7.32
12SLA	9.02	8.38	6.62	4.96
16SLA	9.88	8.84	8.16	4.42
8SCA	8.47	8.08	7.70	7.28
12SCA	11.69	10.93	10.18	7.26
16SCA	11.88	10.81	7.68	5.79
8GLA	9.80	8.13	7.09	3.85
12GLA	13.53	11.81	5.65	4.51
16GLA	11.88	9.43	4.51	3.42
8GCA	9.54	8.59	7.94	6.40
12GCA	11.26	10.97	10.02	5.86
16GCA	11.63	11.51	6.61	4.28
8SLT	30.77	23.73	15.58	8.02
12SLT	34.42	22.84	8.77	5.89
16SLT	27.29	20.50	5.62	4.40
8SCT	27.42	22.61	13.40	7.38
12SCT	36.04	34.09	9.14	5.44
16SCT	32.52	21.49	7.66	3.59
8GLT	17.92	14.77	6.72	4.09
12GLT	23.62	18.98	7.28	3.79
16GLT	19.24	13.44	5.90	5.06
8GCT	18.02	15.26	7.70	6.27
12GCT	23.60	19.02	8.66	7.33
16GCT	18.66	13.43	5.30	4.39

เมกกะปาสกาล (12SCT) ดังรูปที่ 2 (ก) เนื่องจากการชะละลายซิลิกาอะลูมินาจากแก้วลอยได้ในปริมาณที่เหมาะสมทำให้เกิดประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่สมบูรณ์ [20] อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น NH ที่มากเกินไป (NH = 16 โมลาร์) ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณของซิลิกาอะลูมินาที่มีมากเกินไปจากการชะละลายทำให้เกิดการก่อตัวเร็ว [21] เช่น 16SCT (32.52 เมกกะปาสกาล), 16SLT (27.29 เมกกะปาสกาล), 16GCT (18.66 เมกกะปาสกาล)



รูปที่ 2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด

และ 16GLT (19.24 เมกะปาสคาล) มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่า 12SCT (36.04 เมกะปาสคาล), 12SLT (34.42 เมกะปาสคาล), 12GCT (23.26 เมกะปาสคาล) และ 12GLT (23.62 เมกะปาสคาล) ตามลำดับ แม้ว่า 12SLA, 16SLA, 12SCA, 16SCA, 12GCA และ 16GCA มีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ NH สูงขึ้น แต่เป็นการเพิ่มขึ้นที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การลดลงของค่ากำลังรับแรงอัด

เมื่อไม่มีการบ่มร้อนจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกัน มีความเป็นไปได้ว่าการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เฟสที่มีกรก่อตัวแบบค่อยเป็นค่อยไป ทำให้ความสามารถในการรับกำลังของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตขึ้นตรงต่อความแข็งแรงของเฟสเป็นหลัก [22] ในทางตรงกันข้ามเมื่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีการบ่มร้อนพื้นที่ภายในโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์มีความทึบแน่นทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสและผิวของมวลรวมละเอียด (Interfacial Transition Zone; ITZ) ได้ดี อย่างไรก็ตาม การยึดเหนี่ยวบริเวณ ITZ ของเศษแก้วไม่ดีเนื่องจากมีผิวที่เรียบทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่า ตัวอย่างเช่น ระหว่าง 12SLT (34.42 เมกะปาสคาล) และ 12GLT (23.26 เมกะปาสคาล) ดังรูปที่ 2 (ข) และรูปที่ 2 (ง) ตามลำดับ นอกจากนี้ เศษคอนกรีตย่อยและเศษหินปูนย่อยที่ใช้เป็นมวลรวมหยาบมีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกันอย่างน้อยมีนัยสำคัญ เช่น 8SCA (8.47 เมกะปาสคาล) และ 8SLA (9.42 เมกะปาสคาล) 8GCA (9.54 เมกะปาสคาล) และ 8GLA (9.80 เมกะปาสคาล) อาจเนื่องจาก NH มีความเข้มข้นต่ำ และการที่มวลรวมหยาบมีขนาดที่เล็ก (4.5–9.5 มม.) ทำให้การแตกร้าวน้อย หรือไม่มีทั้งก่อนและระหว่างการผสม ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมมีขนาดเล็กโอกาสเกิดรอยร้าวภายในน้อยทำให้ไม่เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของมวลรวมส่งผลให้ปริมาณเฟสไม่เพียงพอ

3.1.2 หลังจากการเผา

จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตผ่านการเผามีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ทำการบ่มร้อนมีสัดส่วนการลดลงของค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่ไม่มีการบ่มร้อน เช่น ตัวอย่าง 12SCT และ 12SLT กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 36.04 และ 34.42 เมกะปาสคาล ตามลำดับ หลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส กำลังรับแรงอัดลดลงร้อยละ 85 และ 83 ดังรูปที่ 2 (ก) และรูปที่ 2 (ข) ตามลำดับ เนื่องจากค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงแสดงถึงความทึบแน่นของก้อนตัวอย่างง่ายต่อการสะสมของความร้อนส่งผลให้เกิดความเค้น และความเครียดสะสมเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ [23], [24] นอกจากนี้ ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงมากเมื่อผ่านการ

เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เช่น 12GLT และ 12GCT ลดลงร้อยละ 69.22 และ 63.31 ดังรูปที่ 2 (ค) และรูปที่ 2 (ง) ตามลำดับ เมื่อมวลรวมหยาบเป็นเศษคอนกรีตกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงต่ำกว่าการใช้หินปูนย่อยหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เช่น 16SCA (ร้อยละ 51.26), 16SLA (ร้อยละ 55.26), 16GCA (ร้อยละ 63.20), และ 16GLA (ร้อยละ 71.21) เนื่องจากหินปูนย่อยมีความหนาแน่นมากกว่าเศษคอนกรีตย่อยทำให้มีการสะสมของความชื้นภายใน

3.2 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity Coefficient; K)

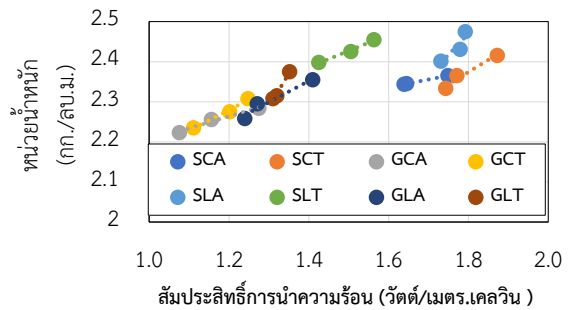
ก่อนตัวอย่างก่อนการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนถูกอบในตู้อบอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อเป็นการควบคุมปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในก้อนตัวอย่าง และผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ตัวอย่าง	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (วัตต์/เมตร.เคลวิน)			
		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		25-28	200	400	600
8SLA	2401	1.731	1.222	1.030	0.894
12SLA	2431	1.779	1.252	1.040	0.848
16SLA	2475	1.792	1.106	0.975	0.865
8SCA	2345	1.645	1.196	0.980	0.765
12SCA	2344	1.639	1.222	1.022	0.818
16SCA	2365	1.749	1.210	1.011	0.809
8GLA	2258	1.240	1.110	0.799	0.671
12GLA	2295	1.271	1.105	0.821	0.708
16GLA	2355	1.410	1.113	0.770	0.733
8GCA	2223	1.076	0.996	0.698	0.561
12GCA	2256	1.156	0.969	0.725	0.580
16GCA	2284	1.275	0.847	0.658	0.645
8SLT	2398	1.425	1.100	0.943	0.811
12SLT	2425	1.505	1.111	1.008	0.881
16SLT	2455	1.563	1.222	1.059	0.902

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (ต่อ)

ตัวอย่าง	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (วัตต์/เมตร.เคลวิน)			
		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		25-28	200	400	600
8SCT	2365	1.771	1.105	0.875	0.821
12SCT	2333	1.743	1.223	1.029	0.839
16SCT	2416	1.872	1.211	1.003	0.905
8GLT	2315	1.320	1.100	0.806	0.752
12GLT	2375	1.352	1.115	0.814	0.724
16GLT	2308	1.310	1.116	0.701	0.652
8GCT	2235	1.111	0.899	0.777	0.621
12GCT	2308	1.248	1.055	0.679	0.620
16GCT	2275	1.202	0.995	0.737	0.635

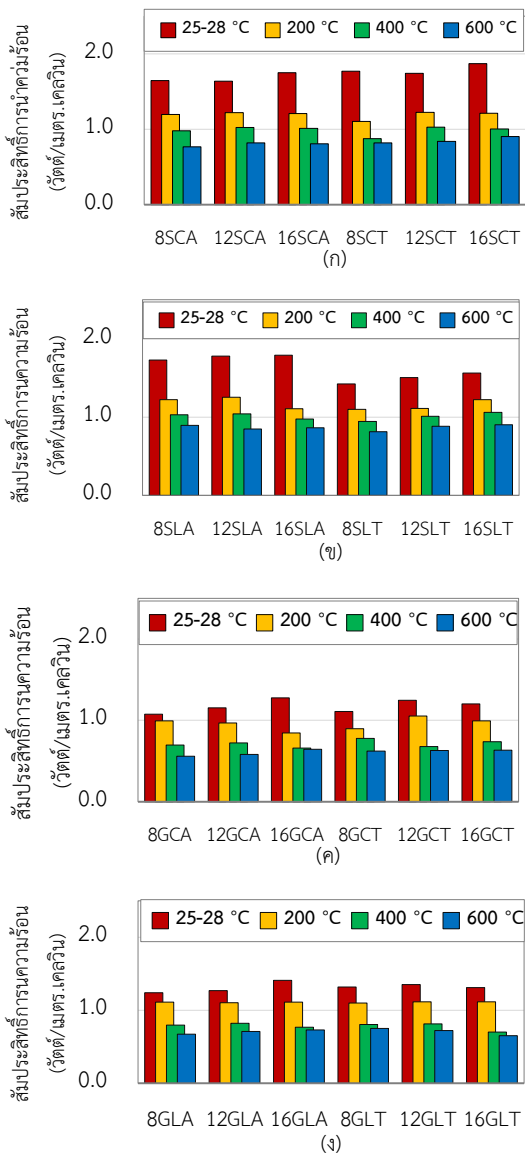


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

3.2.1 ก่อนการเผา

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามหน่วยน้ำหนัก ดังรูปที่ 3 และมีค่าอยู่ในช่วง 1.0-2.5 วัตต์/เมตร.เคลวิน ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ของคอนกรีตธรรมดา [25] ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 1.872 (16SCT) และ 1.076 (8GCA) วัตต์/เมตร.เคลวิน ดังรูปที่ 4 (ก) และรูปที่ 4 (ค) ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมประเภทเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกัน และจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษแก้ว



รูปที่ 4 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเฉลี่ยต่ำสุด ดังรูปที่ 4 (ง) เมื่อมีการบ่มร้อน การใช้ทราย และเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูงกว่าการใช้ทรายและหินปูนย่อย เนื่องจากความทึบแน่นของตัวอย่างสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น [26]

3.2.2 หลังการเผา

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าลดลงเมื่อผ่านการ

เผาที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าสูงมากเมื่อผ่านการเผาที่ 200 องศาเซลเซียส เนื่องจากก่อนทำการเผาตัวอย่างยังมีความชื้นอยู่ภายใน ถึงแม้ว่าจะมีการอบเพื่อขับความชื้นออกก็ตาม ทำให้ความชื้นที่มีอยู่ภายในเกิดการนำความร้อนได้และเมื่อผ่านการเผา ความชื้นที่มีอยู่ภายในถูกขับออกมามากขึ้นทำให้เกิดช่องว่างขึ้นภายใน การเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปริมาณความชื้นที่อยู่ภายในถูกขับออกมาหมด เกิดเป็นช่องว่างตัวกลางในการนำความร้อนจึงมีเพียงจีโอพอลิเมอร์เฟสและพื้นที่ ITZ เท่านั้น รูปที่ 4 (ก) และรูปที่ 4 (ข) แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ ITZ มีผลต่อค่าการนำความร้อนเนื่องจากเศษแก้วมีผิวเรียบและความชื้นภายในถูกขับออกไปทำให้เกิดช่องว่างขึ้นที่ ITZ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลง ดังรูปที่ 4 (ค) และรูปที่ 4 (ง) สำหรับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่มีเศษแก้วเป็นส่วนผสมพบว่า เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่ามากกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีเศษแก้วเป็นส่วนผสม นอกจากนั้นการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ เป็นไปได้ว่าการนำความร้อนเกิดขึ้นภายในเนื้อของเฟสเป็นส่วนใหญ่และจากการคงที่ปริมาณถ้ำลอยและสารละลายต่างทำให้ได้ลักษณะเฟสไม่ต่างกัน

3.3 ความสมบูรณ์

การตรวจสอบความสมบูรณ์ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตใช้วิธีการหาค่าอัตราเร็วของคลื่นความถี่สูงที่ผ่านตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5

3.3.1 ก่อนการเผา

การทดสอบความสมบูรณ์ของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตใช้ค่า UPV ในการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของตัวอย่างจากการทดสอบพบว่า ค่า UPV อยู่ระหว่าง 2635-4114 เมตรต่อวินาที โดยค่า UPV ต่ำสุดและสูงสุดได้แก่ 8GCT และ 16SLT ดังรูปที่ 5 (ข) และรูปที่ 5 (ค) ตามลำดับ จีโอพอลิเมอร์

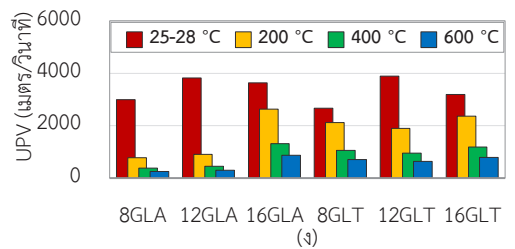
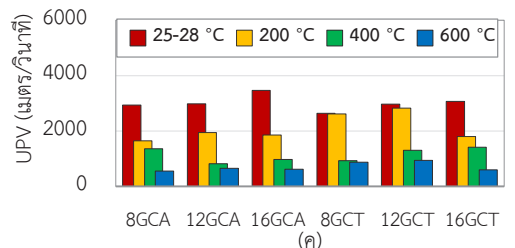
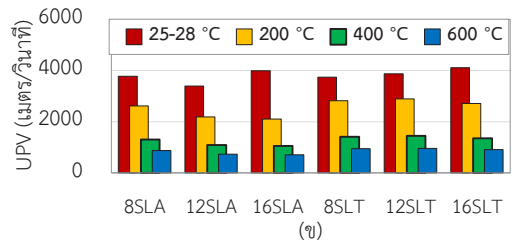
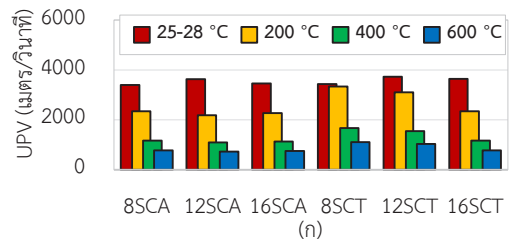
ตารางที่ 5 ค่า UPV ของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ตัวอย่าง	UPV (เมตร/วินาที)			
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	25-28	200	400	600
8SLA	3779.33	2615.34	1307.67	871.78
12SLA	3399.25	2187.57	1093.78	729.19
16SLA	3993.80	2101.17	1050.59	700.39
8SCA	3395.14	2348.17	1174.09	782.72
12SCA	3628.10	2190.13	1095.07	730.04
16SCA	3457.50	2267.21	1133.61	755.74
8GLA	2996.82	773.80	386.90	257.93
12GLA	3818.18	911.24	455.62	303.75
16GLA	3633.17	2629.09	1314.55	876.36
8GCA	2938.78	1646.76	823.38	548.92
12GCA	2977.12	1946.58	973.29	648.86
16GCA	3463.44	1859.65	929.82	619.88
8SLT	3746.29	2821.94	1410.97	940.65
12SLT	3872.65	2889.00	1444.50	963.00
16SLT	4113.64	2715.00	1357.50	905.00
8SCT	3432.20	3340.53	1670.27	1113.51
12SCT	3731.51	3100.15	1550.08	1033.38
16SCT	3645.21	2345.18	1172.59	781.73
8GLT	2665.20	2121.97	1060.98	707.32
12GLT	3890.35	1901.62	950.81	633.87
16GLT	3189.16	2360.53	1180.27	786.84
8GCT	2634.50	2619.19	1309.59	873.06
12GCT	2971.70	2831.23	1415.61	943.74
16GCT	3068.84	1801.28	900.64	600.43

คอนกรีตมีค่า UPV เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NH [27] และ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายและหินปูนย่อยมีค่า UPV สูงที่สุด เนื่องจากความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่าง เพสต์และมวลรวม [28] อย่างไรก็ตาม 12SLA, 16GLA และ 16SCA มีค่า UPV ต่ำ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการบ่มที่อุณหภูมิห้อง และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเพสต์และมวลรวมไม่ติจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตที่สามารถแยกคุณภาพออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่ 1 คุณภาพต่ำ กลุ่มที่ 2 คุณภาพปานกลางหรือปกติ และกลุ่มที่ 3 คุณภาพดี ตามลำดับ [29] ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คุณภาพจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตแยกตาม มาตรฐาน [29]

ตัวอย่าง	คุณภาพ	ตัวอย่าง	คุณภาพ	ตัวอย่าง	คุณภาพ
8SLA	ดี	8GLA	ปกติ	16SLT	ดีมาก
12SLA	ปกติ	12GLA	ดี	8SCT	ปกติ
16SLA	ดี	16GLA	ดี	12SCT	ดี
8SCA	ดี	8GCA	ต่ำ	16SCT	ปกติ
12SCA	ปกติ	12GCA	ต่ำ	16GLT	ปกติ
16SCA	ปกติ	16GCA	ดี	8GCT	ต่ำ
8SLT	ดี	8GLT	ต่ำ	12GCT	ต่ำ
12SLT	ดี	12GLT	ดี	16GCT	ดี



รูปที่ 5 ผลการทดสอบ UPV

3.3.2 หลังการเผา

จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตผ่านการเผาทำให้ความสมบูรณ์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5 โดยค่า UPV ลดลงมากเมื่ออุณหภูมิการเผาเปลี่ยนจาก 200 เป็น 400 องศาเซลเซียส และหลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ค่า UPV ของ 8GCT และ 12GCT มีสัดส่วนการลดลงต่ำกว่าสัดส่วนผสมอื่นทั้งหมด โดยลดลงร้อยละ 0.58 และ 4.73 ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่เหลือมีค่า UPV ลดลงระหว่างร้อยละ 24.67–47.40 และหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ค่า UPV มีค่าต่ำกว่า 1000 เมตรต่อวินาทีทั้งหมด ถือว่าเป็นคอนกรีตที่คุณภาพต่ำมาก [29]

3.4 ความต้านทานการขัดสี

การทดสอบความสามารถในการต้านทานการขัดสีของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเป็นการตรวจสอบจากค่าน้ำหนักที่สูญเสียจากการขัดสี และแสดงดังตารางที่ 7

3.4.1 ก่อนการเผา

จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่มีและมีการบ่มร้อนมีการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีอยู่ร้อยละ 0.1–0.43 เฉลี่ยร้อยละ 0.22 และร้อยละ 0.11–0.33 เฉลี่ยร้อยละ 0.18 ตามลำดับ ตัวอย่าง 12SCA และ 16GCA สามารถต้านทานการขัดสีได้สูงสุดและต่ำสุด ตามลำดับ จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าการใช้เศษแก้ว เช่น 8SCA (ร้อยละ 0.13), 8GCA (ร้อยละ 0.25), 12GCA (ร้อยละ 0.24), และ 12GLA (ร้อยละ 0.19) เพราะการยึดเกาะกันระหว่างเพสต์และเศษแก้วไม่ดี ซึ่งพบได้จากการหลุดออกของเศษแก้วในระหว่างที่ทำการทดสอบ

3.4.2 หลังการเผา

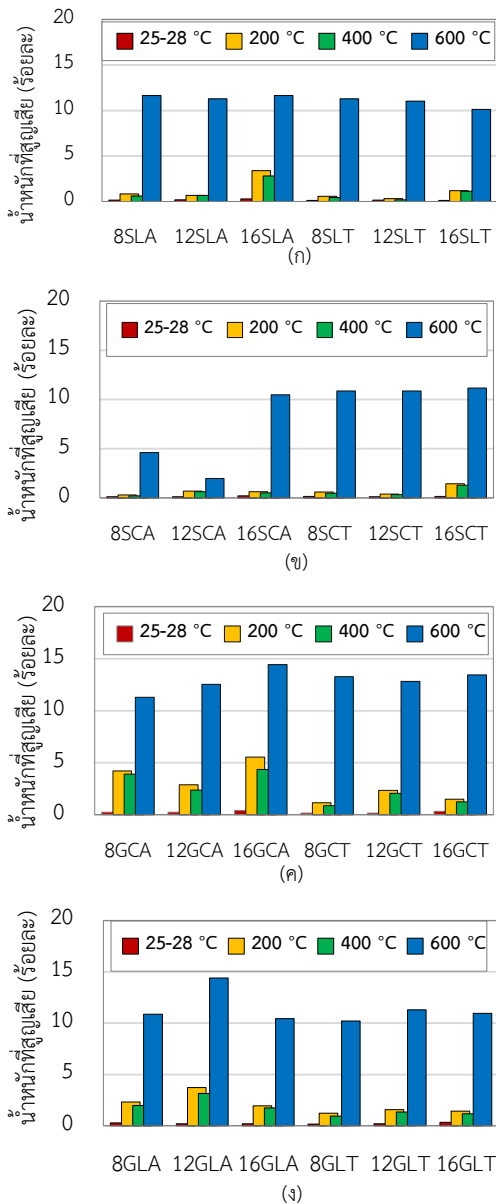
จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความต้านทานการขัดสีลดลงเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีเศษแก้วสามารถต้านทานการขัดสีต่ำกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่มีทรายแม่น้ำ และมีค่าน้ำหนักที่สูญเสียมากที่สุดคือ 16GCA (ร้อยละ 14.43) และ 12GLA (ร้อยละ 14.41) ดังรูปที่ 6 (ค) และรูปที่ 6 (ง) ตามลำดับ น้ำหนักที่สูญเสียเมื่อผ่านการเผา

ตารางที่ 7 น้ำหนักที่สูญเสียจากการขัดสี (ร้อยละ)

ตัวอย่าง	น้ำหนักที่สูญเสีย (ร้อยละ)			
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	25–28	200	400	600
8SLA	0.15	0.84	0.60	11.65
12SLA	0.18	0.68	0.67	11.27
16SLA	0.27	3.37	2.80	11.63
8SCA	0.13	0.30	0.22	4.61
12SCA	0.11	0.70	0.64	1.99
16SCA	0.22	0.62	0.52	10.47
8GLA	0.27	2.31	1.96	10.87
12GLA	0.19	3.71	3.16	14.41
16GLA	0.18	1.96	1.73	10.43
8GCA	0.25	4.21	3.89	11.28
12GCA	0.24	2.88	2.37	12.54
16GCA	0.43	5.54	4.37	14.43
8SLT	0.11	0.56	0.45	11.27
12SLT	0.14	0.31	0.19	11.04
16SLT	0.13	1.19	1.13	10.10
8SCT	0.16	0.60	0.49	10.86
12SCT	0.12	0.40	0.34	10.86
16SCT	0.14	1.44	1.30	11.17
8GLT	0.15	1.22	0.95	10.20
12GLT	0.21	1.57	1.33	11.30
16GLT	0.33	1.44	1.17	10.95
8GCT	0.17	1.14	0.87	13.26
12GCT	0.15	2.35	2.05	12.81
16GCT	0.33	1.49	1.24	13.43

ที่อุณหภูมิ 200 และ 400 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่การเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสามารถต้านทานการขัดสีได้สูงกว่าการเผาที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นไปได้ว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เกิดการกระตุ้นเถ้าลอยที่เหลือกลับมาทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีอยู่ภายในโพรงของเจล [24]

นอกจากนั้นหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่า น้ำหนักที่สูญเสียจากการขัดสีมีค่าสูงมาก ทั้งนี้ เนื่องจากผิวของตัวอย่างมีความเปราะ และเกิดการแตกขึ้นเป็นจำนวนมาก



รูปที่ 6 ผลการทดสอบความต้านทานการซัดสี

มากและขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 7(ก)-(ข) เพราะการหดตัวอย่างรุนแรงเนื่องจากความร้อน

4. อภิปรายผลและสรุป

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีเศษแก้ว และเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมสามารถ



รูปที่ 7 ผิวตัวอย่างหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

สรุปได้ดังนี้

- 1) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 12 โมลาร์ เหมาะสมในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต
- 2) ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีการบ่มร้อนมีค่าประมาณ 2.5 เท่าของค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่มีการบ่มร้อน
- 3) ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความสมบูรณ์ และความสามารในการต้านทานการซัดสีมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น
- 4) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้น
- 5) คุณสมบัติด้านกำลังและความทนทานจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตลดลงชัดเจนเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และมีคุณภาพต่ำสุดเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น ศูนย์วิจัย

และฝึกอบรมระบบขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมโยธา คณะครุศาสตร์ อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, and J. S. J. van Deventer, "The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete,'" *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 12, pp. 1590–1597, 2007.
- [2] G. Ellis, "Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 9, pp. 1489–1498, 2004.
- [3] P. Duxson and J. L. Provis, "Designing precursors for geopolymer cements," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 91, no. pp. 3864–3869, 2008.
- [4] J. Davidovits, "Geopolymers: Inorganic polymeric new materials," *Journal of Thermal Analysis*, vol. 37, no. pp. 1633–1656, 1991.
- [5] J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications*, 4 ed., France: Institute Geopolymer, Saint-Quentin, 2015.
- [6] G. Roviello, L. Ricciotti, C. Ferone, F. Colangelo, and O. Tarallo, "Fire resistant melamine based organic-geopolymer hybrid composites," *Cement and Concrete Composites*, vol. 59, no. pp. 89–99, 2015.
- [7] S. Mesgari, A. Akbarnezhad, and J. Z. Xiao, "Recycled geopolymer aggregates as coarse aggregates for portland cement concrete and geopolymer concrete: Effects on mechanical properties," *Construction and Building Materials*, vol. 236, Art. no. 117571, 2020.
- [8] A. Noushini and A. Castel, "The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 464–477, 2016.
- [9] K. Cochran, T. Townsend, D. Reinhart, and H. Heck, "Estimation of regional building-related C&D debris generation and composition: Case study for Florida, US," *Waste Management*, vol. 27, no. 7, pp. 921–931, 2007.
- [10] A. Akbarnezhad and Z. S. M. Nadoushani, "A computational method for selection of optimal concrete recycling strategy," *Magazine of Concrete Research*, vol. 67, no. 11, pp. 543–558, 2015.
- [11] P. Zhu, M. Hua, H. Liu, X. Wang, and C. Chen, "Interfacial evaluation of geopolymer mortar prepared with recycled geopolymer fine aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 259, Art. no. 119849, 2020.
- [12] J. Tan, J. Cai, X. Li, J. Pan, and J. Li, "Development of eco-friendly geopolymers with ground mixed recycled aggregates and slag," *Journal of Cleaner Production*, vol. 256, pp. 120369, 2020.
- [13] M. P. Bilondi, M. M. Toufigh, and V. Toufigh, "Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils," *Construction and Building Materials*, vol. 170, pp. 302–313, 2018.
- [14] M. Torres-Carrasco, C. Rodríguez-Puertas, M. d. M. Alonso, and F. Puertas, "Alkali activated slag cements using waste glass as alternative activators. Rheological behaviour," *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*,

- vol. 54, no. 2, pp. 45–57, 2015.
- [15] M. Vafaei and A. Allahverdi, “High strength geopolymer binder based on waste-glass powder,” *Advanced Powder Technology*, vol. 28, no. 1, pp. 215–222, 2017.
- [16] *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM C618-19, 2019.
- [17] *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM C39 / C39M-20, 2020.
- [18] *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method*, ASTM C944 / C944M-19, 2019.
- [19] J. Wang, J. Xie, C. Wang, J. Zhao, F. Liu, and C. Fang, “Study on the optimum initial curing condition for fly ash and GGBS based geopolymer recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 247, pp. 118540, 2020.
- [20] G. Mathew and B.M. Issac, “Effect of molarity of sodium hydroxide on the aluminosilicate content in laterite aggregate of laterised geopolymer concrete,” *Journal of Building Engineering*, vol. 32, pp. 101486, 2020.
- [21] G. F. Huseien, M. Ismail, N. H. A. Khalid, M. W. Hussin, and J. Mirza, “Compressive strength and microstructure of assorted wastes incorporated geopolymer mortars: Effect of solution molarity,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 4, pp. 3375–3386, 2018.
- [22] F. Puertas, S. Martínez-Ramírez, S. Alonso, and T. Vázquez, “Alkali-activated fly ash/slag cements: Strength behaviour and hydration products,” *Cement and Concrete Research*, vol. 301, no. 10, pp. 1625–1632, 2000.
- [23] M. N. S. Hadi, N. A. Farhan, and M. N. Sheikh, “Design of geopolymer concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method,” *Construction and Building Materials*, vol. 140, pp. 424–431, 2017.
- [24] M. Lahoti, K. H. Tan, and E-H. Yang, “A critical review of geopolymer properties for structural fire-resistance applications,” *Construction and Building Materials*, vol. 221, pp. 514–526, 2019.
- [25] P. Bamforth, D. Chisholm, J. Gibbs, and T. Harrison, *Properties of Concrete for Use in Eurocode 2*, UK: The Concrete Centre, 2008.
- [26] Y. Wang, T. Zheng, X. Zheng, Y. Liu, J. Darkwa, and G. Zhou, “Thermo-mechanical and moisture absorption properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete reinforced by polypropylene fibers,” *Construction and Building Materials*, vol. 251, pp. 118960, 2020.
- [27] R. Ghosh, S. P. Sagar, A. Kumar, S. K. Gupta, and S. Kumar, “Estimation of geopolymer concrete strength from ultrasonic pulse velocity (UPV) using high power pulser,” *Journal of Building Engineering*, vol. 16, no. pp. 39–44, 2018.
- [28] T. U. Mohammed and M. N. Rahman, “Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 125, pp. 832–841, 2016.
- [29] *Method of Non-destructive testing of concrete, Part 1, Ultrasonic pulse velocity [CED2: Cement and Concrete]*, IS 13311-1, 1992.