



กำลังรับแรงอัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่เสียหายจากเพลิงไหม้

COMPRESSIVE STRENGTH OF FIRE-DAMAGED GEOPOLYMER CONCRETE-FILLED STEEL TUBULAR COLUMNS

กฤษฎา สุวรรณฉาย¹, อรรถสิทธิ์ ชูแสงศรี¹, วรพล ฮ่อแสงชัย¹, สิริชัย เพชรรุ่ง², ธัญวัฒน์ โพธิศิริ³ และ อัครวัชร เล่นวารี^{1*}

¹หน่วยปฏิบัติการวิจัยโครงสร้างคอมโพสิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

³ศูนย์วิจัยเพื่อความปลอดภัยจากอัคคีภัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Corresponding author: Akhrawat.L@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษา กำลังรับแรงอัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่เสียหายจากเพลิงไหม้ โดยเสาท่อเหล็กเติมด้วยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีพฤติกรรมแบบเสาสั้น และจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้มีส่วนผสมของเถ้าแกลบและเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คิดเป็นร้อยละ 60 และ 40 ตามลำดับ โดยทำการทดสอบเพลิงไหม้เมื่อเสาวัสดุผสมมีอายุ 24 วัน ตามมาตรฐาน ISO-834 เป็นระยะเวลา 90 และ 120 นาที และปล่อยให้อุณหภูมิของเสาวัสดุผสมลดลงในเตาเผา 1 วัน จากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของเสาวัสดุผสมที่อายุ 75 ถึง 85 วัน จากผลการทดสอบพบว่า เสาท่อเหล็กเติมด้วยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดหลังการทดสอบเพลิงไหม้ที่สูงกว่าเสาท่อเหล็กที่เติมด้วยคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในกรณีเผาไฟ 90 นาที แต่ต่ำกว่าเสาท่อเหล็กที่เติมด้วยคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในกรณี 120 นาที

คำสำคัญ: กำลังรับแรงอัด, เสาวัสดุผสม, ท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต, จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต, ความเสียหายจากเพลิงไหม้

ABSTRACT

This paper presents a study on the compressive strength of fire-damaged geopolymer concrete-filled steel tubular columns. The geopolymer concrete-filled steel tubular short columns. The rice husk ash and fly ash were used to replace the ordinary Portland cement by 60 and 40 percent, respectively. At the specimen age of 24 days, fire tests were conducted following the ISO-834 standards for durations of 90 and 120 minutes. The specimens were left naturally air-cooled in the furnace for one day. At the specimen ages from 75 to 85 days, static compression tests were conducted. The test results showed that geopolymer concrete-filled steel tubular columns have higher residual compressive strength than those filled with Portland cement concrete in the case of 90-minute fire exposure. However, the residual compressive strength significantly decreased, resulting in lower performance compared to steel tube columns filled with Portland cement concrete in the case of 120-minute fire exposure.

Keywords: Compressive strength, Composite column, Concrete-filled steel tube, Geopolymer concrete, Fire damage,

Krissada Suwanchai¹, Attasit Chooaengsri¹, Voraphol Horsangchai¹, Sirichai Pethrung², Thanyawat Pothisiri³ and Akhrawat Lenwari^{1*}

¹Composite Structures Research Unit, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand

³Fire Safety Research Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (concrete-filled steel tube columns, CFST) อย่างแพร่หลายในการก่อสร้าง เนื่องจากข้อดีของเหล็กรูปพรรณที่มีน้ำหนักเบา กำลังรับแรงดึงสูง และก่อสร้างได้รวดเร็ว ร่วมกับข้อดีของคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดและมีความต้านทานเพลิงไหม้สูง โดยทั่วไปวัสดุคอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement, OPC) น้ำ และ มวลรวม ซึ่งมีราคาต่ำและสามารถจัดหาได้ง่าย อย่างไรก็ตาม ในแต่ละปีมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณ 1,350 ล้านตัน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 5-7 ของปริมาณการปล่อยก๊าซทั้งหมด [1] ทำให้มีการศึกษาหาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างต่อเนื่อง เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (geopolymer concrete, GPC) ที่ใช้วัสดุที่มีซิลิกอนและอะลูมิเนียมสูง เช่น เถ้าลอย (fly ash, FA) เถ้าแกลบ (rice husk ash, RHA) ทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เชชันกับสารละลายแอลคาไลน์กับออกไซด์ของซิลิกอนและอะลูมิเนียม โดยพบว่ามีคุณสมบัติต้านทานเพลิงไหม้ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ แต่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า [2]

ข้าวเป็นผลผลิตทางการเกษตรหลักของประเทศไทย ในปี ค.ศ. 2017 Prasara และ Gheewala [2] ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืนของเถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้า พบว่าเถ้าแกลบในประเทศไทยมีปริมาณการผลิตที่สูง และการสีข้าวทำให้เกิดเถ้าแกลบประมาณร้อยละ 23 จากน้ำหนักข้าวทั้งหมดที่สี เถ้าแกลบส่วนใหญ่ในประเทศไทยได้ถูกใช้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเถ้าแกลบเป็นของเสียจากการเผาเถ้าเพื่อต้มน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้า

ในปี ค.ศ. 2018 Zhong Tao และคณะ [3] ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย พบว่า เสาท่อเหล็กเติมด้วยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยมีความทนไฟดีกว่าเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยเฉพาะเมื่อใช้ GPC ที่ผ่านการบ่มด้วยความร้อน ในปี ค.ศ. 2020 Katwal และคณะ [4] ได้ทดสอบกำลังรับแรงอัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยในสภาวะเพลิงไหม้พบว่า เสาท่อเหล็กเติมด้วยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความสามารถต้านทานเพลิงไหม้สูงกว่าเสาเหล็กคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเดิม อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเสาท่อเหล็กเติมด้วยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบเป็นส่วนประกอบหลักยังมีอยู่จำกัด โดยเฉพาะการศึกษาพฤติกรรมรับแรงอัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่เสียหายจากเพลิงไหม้

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของเพลิงไหม้ต่อกำลังรับแรงอัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบเป็นส่วนประกอบหลัก โดยในศึกษานี้ได้ทำการทดสอบเสาวัสดุผสมจำนวน 24 ตัวอย่าง ภายใต้แรงกระทำตรงศูนย์ โดยตัวแปรในการทดสอบประกอบด้วย (1) ประเภทของคอนกรีต (OPC และ GPC) (2) ระดับความเสียหายจากการเผาไฟ ภายใต้เพลิงไหม้มาตรฐานไอเอสโอเป็นระยะเวลา 90 และ 120 นาที และ (3) ขนาดของเสาวัสดุผสม

2. รายละเอียดการทดสอบ

2.1 คุณสมบัติของวัสดุ

2.1.1 สารละลายและวัสดุประสาน

เถ้าแกลบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเถ้าแกลบจากบริษัทพีจีทีไบโอเพาเวอร์ จำกัด โดยการเตรียมเถ้าแกลบที่นำมาใช้ในการผสม GPC เริ่มจากการนำเถ้าแกลบมาผ่านตะแกรงเบอร์ 50 แล้วนำไปบดด้วยวิธีการปั่นเป็นระยะเวลา 2 นาที ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยปั่นครั้งละ 0.5 กิโลกรัม จากนั้นทำการทดสอบด้วยตะแกรงเบอร์ 325 โดยเถ้าแกลบที่นำมาใช้จะต้องมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C618-22 [5] รูปที่ 2 แสดงสภาพเถ้าแกลบก่อนและหลังการปั่น

สำหรับเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ จัดเป็นเถ้าลอยชนิดแคลเซียมสูง ตามมาตรฐาน ASTM C618-22 [5] ซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากกว่า 18% โดยมวล ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบและเถ้าลอยที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray fluorescence, XRF) ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตามมาตรฐาน ISO 29581-2 [6] สำหรับปูนซีเมนต์ใช้ในงานโครงสร้าง เอสซีจี สูตรไฮบริด

สารละลายที่ใช้ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โดยในการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเม็ดไข่มุก 99 เปอร์เซ็นต์ นำมาละลายน้ำให้มีความ 10 โมลาร์ และให้สารละลายคายความร้อนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนบรรจุใส่ถัง สำหรับสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นแบบสำเร็จรูปที่พร้อมใช้งานมีความเข้มข้น 10 โมลาร์เช่นกัน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีในเถ้าแกลบและเถ้าลอยจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ [6]

วัสดุ	SiO_2	K_2O	CaO	P_2O_5	MgO	Fe_2O_3	SO_3	Al_2O_3	Na_2O
RHA	92.50%	2.15%	0.63%	0.46%	0.37%	0.28%	0.19%	0.10%	-
FA	31.50%	2.14%	20.90%	0.31%	2.77%	14.00%	5.56%	17.00%	2.88%



รูปที่ 1 เครื่องปั่นเถ้าแกลบที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 2 เถ้าแกลบก่อนและหลังการปั่น

2.1.2 มวลรวม

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.63 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.17 และโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.09 สำหรับมวลรวมหยาบที่ใช้มีขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 3/4 นิ้ว มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.7 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.54 และ โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 7.36 โดยนำไปผสมในสภาพอิ่มตัวผิวหน้าแห้ง (saturated surface dry, ssd)

2.1.3 คอนกรีต

ตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนผสมของ GPC และ OPC ที่ใช้ในงานวิจัย โดยกำหนดให้วัสดุประสาน (binder) มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบมีน้ำหนักเท่ากัน และใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบและเถ้าลอยเท่ากับ 60 : 40 สำหรับ GPC สารละลายที่ใช้ในการเตรียม GPC ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 และ NaOH เท่ากับ 1.0 ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อัตราส่วนของสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7 และ 0.8 สำหรับอัตราส่วนผสม GPC1 และ GPC2 ตามลำดับ โดยมีการผสมน้ำร้อยละ 5 ของน้ำหนักเถ้าแกลบเพื่อเพิ่มความสามารถในการเท ทั้งนี้ OPC มีค่า slump อยู่ในช่วง 80-100 มม. สำหรับ GPC1 และ GPC2 มีการแข็งตัวที่เร็วภายใน 20 นาที หลังจากผสมสารละลาย ทำให้วัดค่า slump ระหว่างการเตรียมวัสดุได้ยาก แต่จากการสังเกตพบว่า ความสามารถในการเทเรียงจากมากไปน้อย คือ OPC GPC2 และ GPC1 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)

ชนิดคอนกรีต	ปูนซีเมนต์	เถ้าแกลบ	เถ้าลอย	ทราย	หิน	w/c	สารละลาย/วัสดุประสาน	NaOH	Na_2SiO_3	น้ำ
OPC	400	-	-	600	1009	0.45	-	-	-	180
GPC1	-	240	160	600	1009	-	0.7	140	140	12 ¹
GPC2	-	240	160	600	1009	-	0.8	160	160	12 ¹

¹น้ำเพิ่มเติมปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักเถ้าแกลบเพื่อเพิ่มความสามารถในการเท

ขั้นตอนในการเตรียมคอนกรีต ประกอบด้วย 1) ผสมแห้งเถ้าแกลบ เถ้าลอย และมวลรวมเข้าด้วยกันเป็นระยะเวลา 5 นาที 2) เตรียมสารละลายโดยนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และน้ำผสมให้เข้ากัน 3) เติมน้ำมวลรวมลงไป ในสารแห้งและผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที 4) เทคอนกรีตลงแบบหล่อที่เตรียมไว้ 5) เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วใช้แผ่นพลาสติกพันคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องจนถึงวันทดสอบ

2.1.4 ท่อเหล็ก

ท่อเหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นท่อเหล็กรูปพรรณกลมกลวงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 107-2566) ชั้นคุณภาพ HS 41 โดยมีหน่วยแรงคราก (f_c) และหน่วยแรงดึงประลัย (f_u) เท่ากับ 235 และ 402 เมกะปาสกาล ตามลำดับ [7]

2.2 ตัวอย่างทดสอบ

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบเสาท่อเหล็กกลมเติมด้วยคอนกรีตจำนวนทั้งหมด 24 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยตัวแปรในการทดสอบประกอบด้วย (1) ประเภทของคอนกรีตเติม: ท่อเหล็กเติมด้วย OPC (CFST) และ ท่อเหล็กเติมด้วย GPC (GFST1 และ GFST2) (2) ระดับความเสียหายจากการเผาไฟภายใต้เพลิงไหม้มาตรฐานไอเอสโอเป็นระยะเวลา 90 และ 120 นาที (90 และ 120) และไม่ผ่านการทดสอบเพลิงไหม้ (RT) และ (3) ขนาดของเสา: ขนาดใหญ่ (L) และ ขนาดเล็ก (S) หมายถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

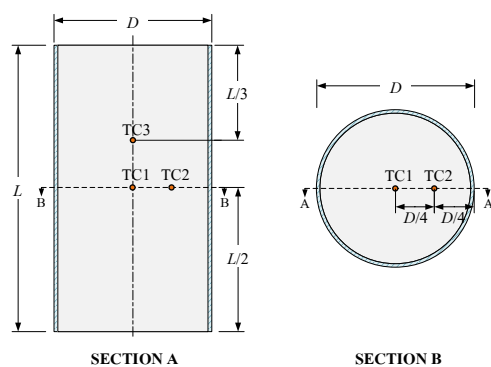
ภายนอกกระบุง (D) เท่ากับ 165 และ 112 มม. ตามลำดับ ความหนาของท่อเหล็กกระบุง (t) เท่ากับ 3.2 มม. และความสูงของเสา (L) ประมาณ 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยทำการทดสอบชิ้นงานละ 2 ตัวอย่าง (A และ B)

ตารางที่ 3 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่าง ทดสอบ	ชิ้นงาน	D (มม.)	t (มม.)	L (มม.)	ชนิด คอนกรีต เดิม	f_c' ของคอนกรีต เดิมที่ 120 วัน (เมกะปาสกาล)	ระยะเวลา เพลิงไหม้ (นาที)	อายุชิ้นงาน (วัน)	
								ทดสอบ เพลิง ไหม้	ทดสอบ กำลัง
CFST-L-RT	A	165	3.15	300	OPC	34.5±4.4 (39.3, 30.8, 33.3)	-	-	120
	B	165	3.15	300					
GFST1-L-RT	A	165	3.15	300	GPC1	23.1±1.0 (23.8, 23.5, 21.9)			
	B	165	3.15	300					
GFST1-S-RT	A	114	3.15	200	GPC1				
	B	114	3.15	200					
GFST2-S-RT	A	114	3.15	200	GPC2	12.1±2.0 (12.1, 10.1, 14.1)			
	B	114	3.15	200					
CFST-L-90	A	165	3.15	302	OPC	20.2±4.1 (17.1,24.9,18.6)	90	24	76
	B	165	3.15	303					
GFST1-L-90	A	165	3.15	303	GPC1	13.3±0.8 (12.4,13.5,14.0)			
	B	165	3.15	303					
GFST1-S-90	A	114	3.15	204	GPC1				
	B	114	3.15	200					
GFST2-S-90	A	114	3.15	202	GPC2	9.9±2.2 (7.6,10.1,12.1)			
	B	114	3.15	203					
CFST-L-120	A	164	3.15	300	OPC	22.6±2.7 (21.1,21.1,25.8)	120	24	85
	B	165	3.15	302					
GFST1-L-120	A	165	3.15	300	GPC1	18.8±1.0 (17.8,19.0,19.8)			
	B	165	3.15	302					
GFST1-S-120	A	112	3.15	203	GPC1				
	B	112	3.15	200					
GFST2-S-120	A	112	3.15	203	GPC2	12.7±1.2 (11.4,12.8,13.9)			
	B	112	3.15	202					

2.3 การทดสอบในเตาเผา

ตัวอย่างเสาท่อนเหล็กเดิมด้วยคอนกรีตได้มีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล (thermocouples, TC) สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งกลางชิ้นงานทดสอบ (TC1) ระยะกึ่งกลางของรัศมีของหน้าตัด (TC2) และระยะ 1 ใน 3 ของความสูงเสาจากด้านบน (TC3) ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยจะทำการติดตั้ง TC3 เฉพาะชิ้นงานทดสอบ A ในตารางที่ 3 โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะเพลิงไหม้ ณ หน่วยปฏิบัติการวิจัยเพื่อความปลอดภัยจากอัคคีภัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Fire Safety Research Unit, Chulalongkorn University, FSRC) ที่อายุคอนกรีต 24 วัน เตาเผาที่ใช้มีขนาด $3.00 \times 3.00 \times 1.00$ เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาจะวัดด้วยเซนเซอร์ภายในเตา 3 ระดับ ที่ 0.5 1.5 และ 2.5 เมตร ในขณะที่ทดสอบได้มีการปิดผิวด้านบนของชิ้นงานด้วยฉนวนเซรามิกซ์ไฟเบอร์ (ceramic fiber) เพื่อควบคุมความร้อนให้ส่งผ่านทางผิวด้านข้างของชิ้นงานเท่านั้น ความร้อนของเตาเผาควบคุมตามมาตรฐานอัคคีภัย ISO-834 [8] โดยทำการทดสอบใช้ระยะเวลา 90 และ 120 นาที หลังจากการทดสอบเพลิงไหม้ตามเวลาที่กำหนดเสร็จสิ้นปล่อยให้ตัวอย่างชิ้นงานเย็นตัวภายในเตาเผาโดยธรรมชาติเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างออกจากเตาเผาเพื่อทำการทดสอบกำลังอัดต่อไป โดยผลการวัดอุณหภูมิจะอภิปรายในหัวข้อที่ 3.1 ของบทความ



รูปที่ 3 ตำแหน่งติดตั้ง thermocouples ในตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4 เตาเผาสำหรับทดสอบในสภาวะเพลิงไหม้



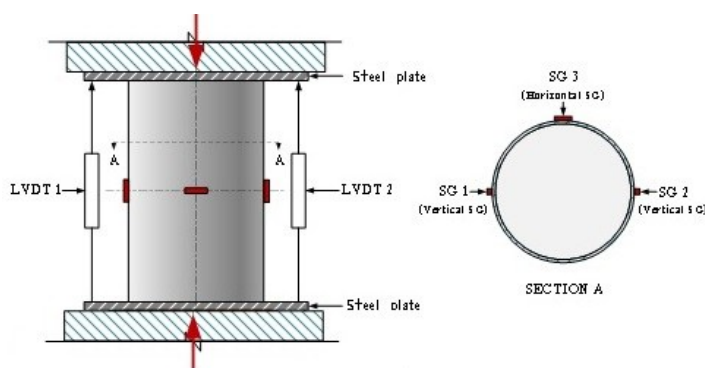
รูปที่ 5 รูปถ่ายชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบเพลิงไหม้ ระยะเวลาทดสอบ 90 นาที



รูปที่ 6 รูปถ่ายชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบเพลิงไหม้ ระยะเวลาทดสอบ 120 นาที

2.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัดของเสาหลังเผาไฟ ได้มีการปรับผิวบนและล่างชิ้นงานให้เรียบและได้ระนาบโดยใช้ capping gypsum และได้มีการติดตั้ง strain gauges (SG) ที่ผิวท่อเหล็กที่กึ่งกลางชิ้นงาน 3 ตำแหน่ง ประกอบด้วย SG แนวตั้ง 2 ตำแหน่ง และ SG แนวนอน 1 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 7 ในการทดสอบกำลังอัดตรงศูนย์ได้ใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) Instron ซึ่งมีกำลังสูงสุด 5,000 กิโลนิวตัน ความเร็วของการทดสอบใช้ 2 กิโลนิวตันต่อวินาที และปรับความเร็วเป็น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที (มม./วินาที) เมื่อแรงอัดมีค่าประมาณร้อยละ 80 ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการคำนวณ



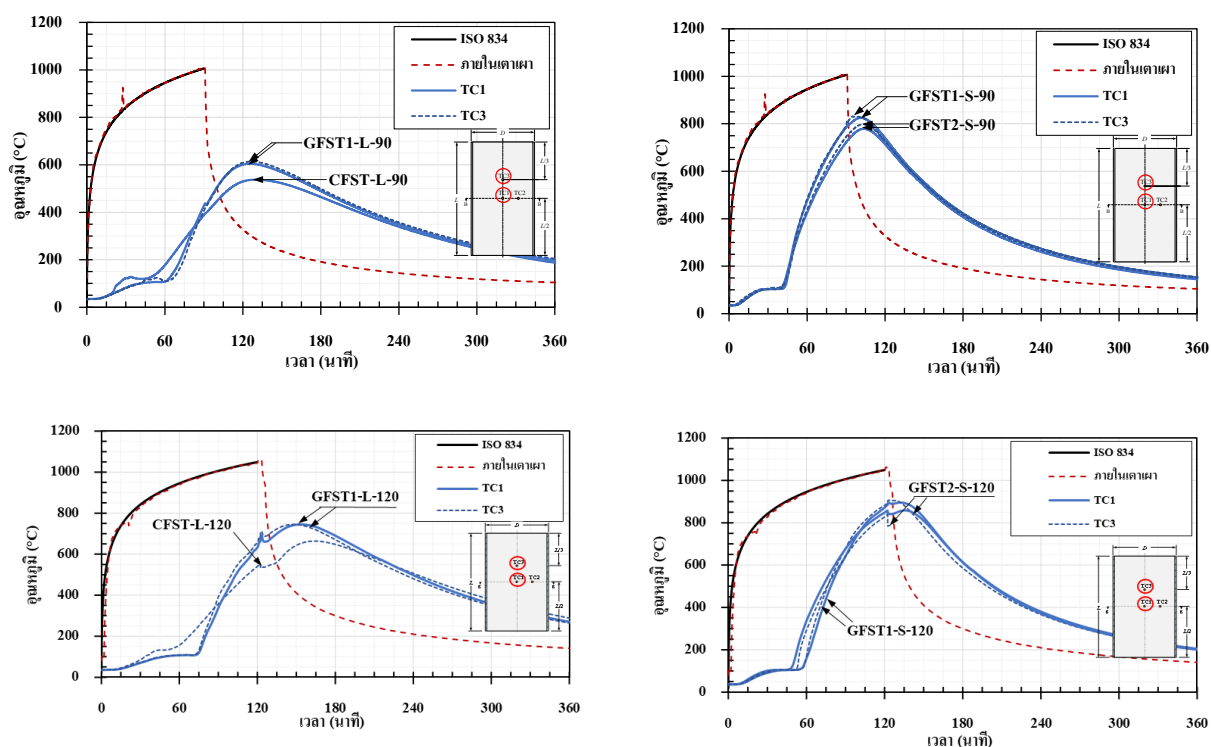
รูปที่ 7 การทดสอบเสาวัสดุผสมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์

3. ผลการทดสอบ

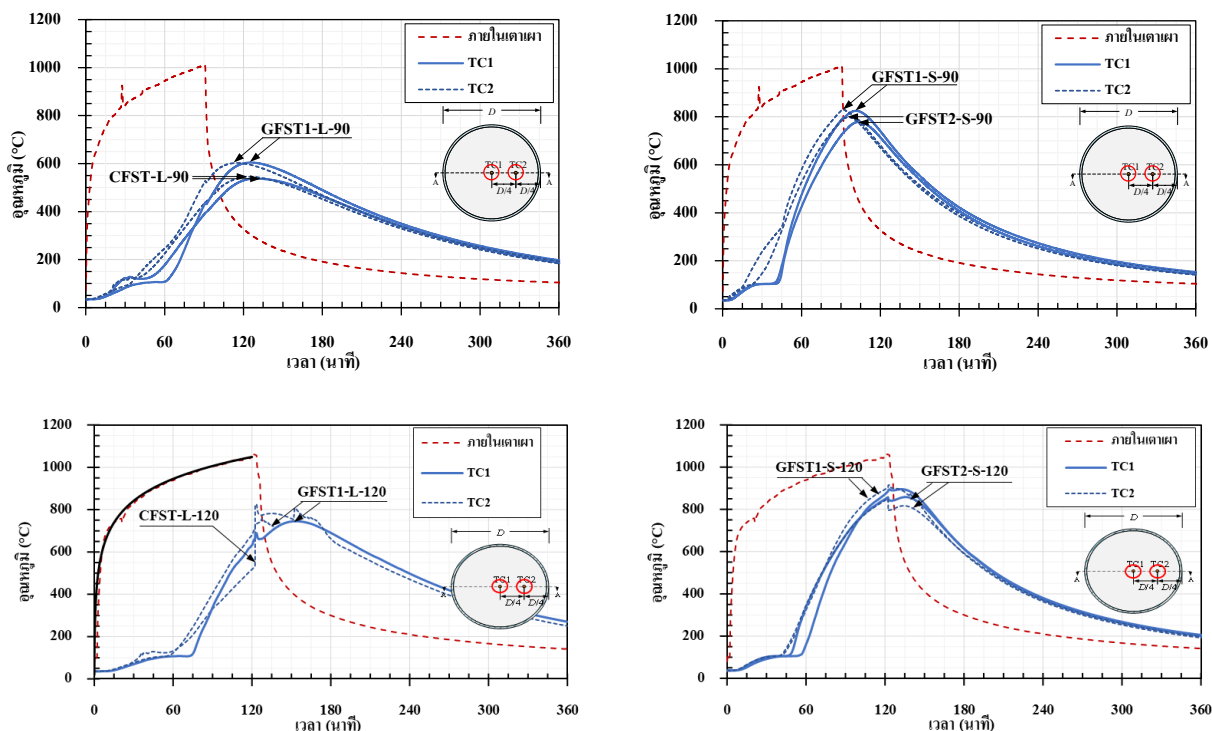
3.1 อุณหภูมิภายในตัวอย่างทดสอบ

รูปที่ 8 แสดงค่าอุณหภูมิในตัวอย่างทดสอบที่ตำแหน่ง TC1 และ TC3 โดยพบว่า อุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งแสดงว่าผลของอุณหภูมิที่เข้าจากทางด้านบนของชิ้นงานมีน้อย และรูปที่ 9 แสดงค่าอุณหภูมิภายในชิ้นงานที่ตำแหน่ง TC1 และ TC2 เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงาน GFST-L กับ CFST-L พบว่า ชิ้นงานที่เติมด้วย GPC มีอุณหภูมิที่สูงกว่าชิ้นงานที่เติมด้วย OPC เช่น ในการ

ทดสอบเพลิงไหม้ 90 นาที ชิ้นงาน GFST1-L อุณหภูมิขึ้นสูงไปถึง 600 องศาเซลเซียส ในขณะที่ชิ้นงาน CFST-L อุณหภูมิขึ้นสูงไปถึง 540 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [9,10] ที่พบว่า อุณหภูมิภายในของ GPC มีค่าต่ำกว่า OPC ในกรณีที่คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่ได้ควบคุมกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสาน (sol/b) ให้เท่ากันแต่ควบคุมปริมาณวัสดุประสาน มวลรวมละเอียดและหยาบของ GPC และ OPC ให้เท่ากัน ในกรณีตัวอย่าง GFST1-S กับ GFST2-S เติมน้ำด้วยโพลิเมอร์คอนกรีตที่อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานแตกต่างกัน พบว่า อุณหภูมิที่กลางชิ้นงาน GFST1-S สูงกว่าชิ้นงาน GFST2-S ในการทดสอบเพลิงไหม้เป็นเวลา 90 และ 120 นาที ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Arjun Raj และคณะ [11] ที่พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานทำให้ค่าการนำความร้อนลดลงเนื่องจากอากาศภายในรูพรุนนำความร้อนต่ำกว่าเนื้อวัสดุ



รูปที่ 8 อุณหภูมิภายในตัวอย่างทดสอบที่ตำแหน่ง TC1 และ TC3 ขณะทดสอบเพลิงไหม้ 90 และ 120 นาที



รูปที่ 9 อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TC1 และ TC2 ของชิ้นงานที่ทดสอบเพลิงไหม้ 90 และ 120 นาที

3.2 กำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 4 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างทดสอบรับแรงอัดตรงศูนย์กลางประกอบด้วย ค่ากำลังรับแรงอัดที่จุดครากคำนวณจากวิธีออฟเซตร้อยละ 0.2 ของการยวบตัว (0.2% offset yield strength) หรือเท่ากับ 0.6 และ 0.4 มม. สำหรับชิ้นงาน L (300 มม.) และ S (200 มม.) ตามลำดับ และค่ากำลังรับแรงอัดประลัยคำนวณจากค่าแรงอัดสูงสุดภายในช่วงร้อยละ 0 ถึง 5 ของการยวบตัว [12] ซึ่งเท่ากับระยะ 15 และ 10 มม. สำหรับชิ้นงาน L และ S ตามลำดับ ทั้งนี้ ตัวอย่างทดสอบ CFST-L บางชิ้นงานมีการระเบิดของวัสดุเติมซึ่งเป็น OPC ในระหว่างการทดสอบเผาไฟ และตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุเติมเป็น GPC พบว่า GPC มีขยายตัวออกภายหลังการเผาไฟระยะเวลา 120 นาที และชิ้นงานเกิดการยวบตัวอย่างรวดเร็วขณะทดสอบกำลังรับแรงอัด ดังแสดงในรูปที่ 10 และ 11



รูปที่ 10 ชิ้นงาน GFST1-S-120-B หลังสภาวะเพลิงไหม้ รูปที่ 11 ชิ้นงาน GFST1-L-120-B ขณะทดสอบกำลังรับแรงอัด

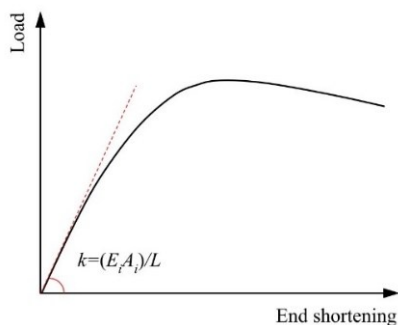
ตารางที่ 4 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดตรงศูนย์

ตัวอย่างทดสอบ	ชิ้นงาน	น้ำหนักชิ้นงาน (กก.)		กำลังรับแรงอัดที่ จุดคราก (กิโลนิวตัน)	กำลังรับแรงอัด ประลัย (กิโลนิวตัน)	สติฟเนส (Stiffness) (กิโลนิวตัน/มม.)
		ก่อนทดสอบ เพลิงไหม้	หลังทดสอบ เพลิงไหม้			
CFST-L-RT	A	17.75	-	1360	1446	340.4
	B	17.70	-	1363	1429	449.1
GFST1-L-RT	A	17.50	-	1157	1193	286.2
	B	17.70	-	1123	1223	230.7
GFST1-S-RT	A	5.75	-	551	611	145.4
	B	5.70	-	499	628	161.0
GFST2-S-RT	A	5.95	-	383	592	111.5
	B	5.95	-	519	661	168.4
CFST-L-90	A	17.80	16.90	700	913	280.0
	B	17.75	16.70	719	849	317.3
GFST1-L-90	A	17.70	16.60	775	853	251.8
	B	17.70	16.65	912	950	201.0
GFST1-S-90	A	6.10	5.55	368	445	89.5
	B	6.00	5.45	325	435	82.1
GFST2-S-90	A	5.95	5.65	378	459	95.8
	B	5.95	5.65	398	442	54.5
CFST-L-120	A ¹	17.85	16.40	737	824	99.8
	B ¹	17.65	16.35	645	786	95.2
GFST1-L-120	A ¹	17.60	15.90	784	850	53.9
	B ^{1,2}	17.80	15.85	258	332	-
GFST1-S-120	A ¹	5.80	5.00	301	396	48.7
	B ¹	6.10	5.05	242	254	37.8
GFST2-S-120	A	6.05	5.45	338	466	94.4
	B	5.95	5.45	420	501	100.6

¹ชิ้นงานกะเทาะของเนื้อคอนกรีตหลังทดสอบเพลิงไหม้

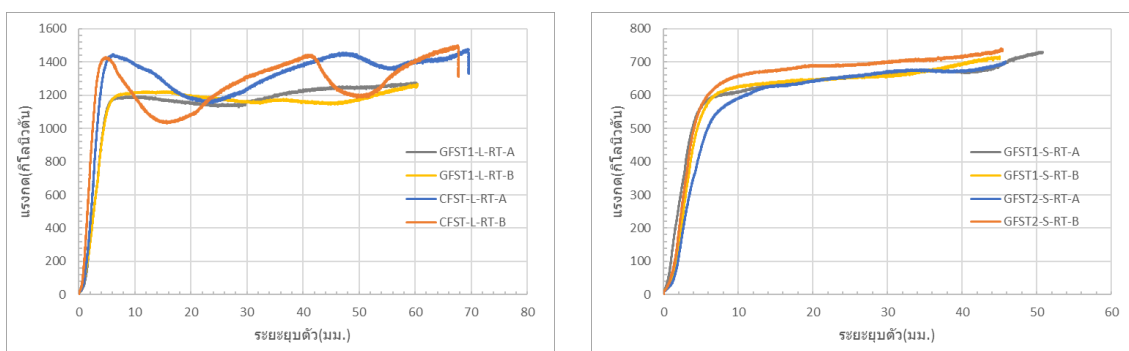
²ชิ้นงานยุบตัวอย่างรวดเร็วขณะทดสอบ

รูปที่ 12 แสดงการคำนวณค่าสติฟเนสช่วงแรก (initial compressive stiffness, k) ในงานวิจัยนี้ โดยคำนวณจากความชันในช่วงต้นของกราฟแรงอัดกับระยะยุบตัวของชิ้นงาน อ้างอิงตามงานวิจัยของ An He และคณะ [13]

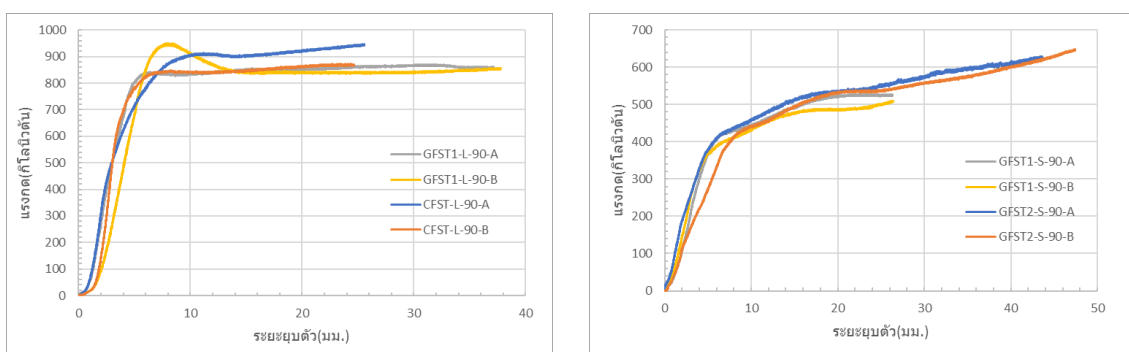


รูปที่ 12 การคำนวณสติฟเนสช่วงแรกภายใต้แรงอัด [13]

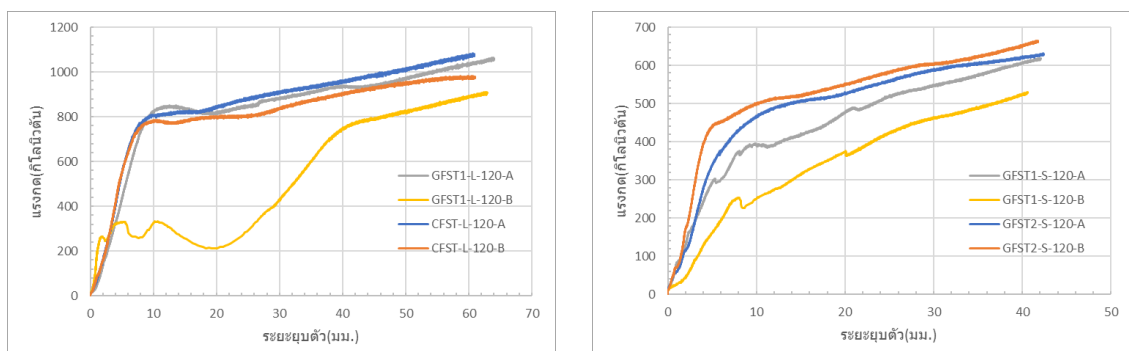
รูปที่ 13-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะยุบตัวของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง หลังเผาไฟระยะเวลา 90 นาที และหลังเผาไฟระยะเวลา 120 นาที ตามลำดับ โดยพบว่า กำลังรับแรงอัดหลังจากผ่านจุดคราก มีกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการรับแรงร่วมกันของวัสดุคอนกรีตเดิมและท่อเหล็ก โดยคอนกรีตเดิมช่วยชะลอการเกิดการโก่งเดาะ (buckling) ของท่อเหล็ก และท่อเหล็กช่วยโอบรัดคอนกรีตเดิมภายใน



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะยุบตัวของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง (ไม่เผาไฟ)



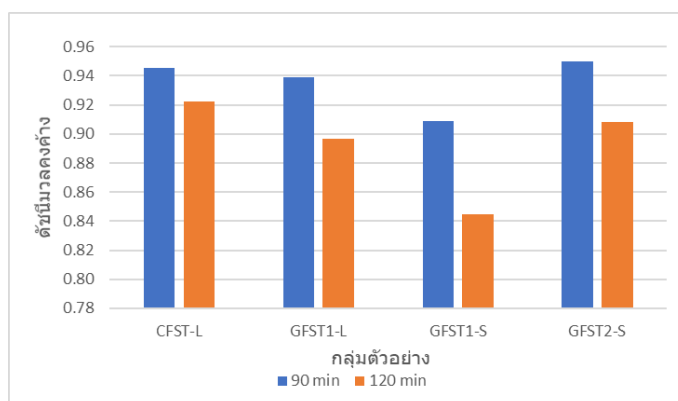
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ของแรงอัดและระยะยุบตัวของชิ้นงานภายหลังจากเผาไฟระยะเวลา 90 นาที



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ของแรงอัดและระยะเวลาของชิ้นงานภายหลังเผาไฟระยะเวลา 120 นาที

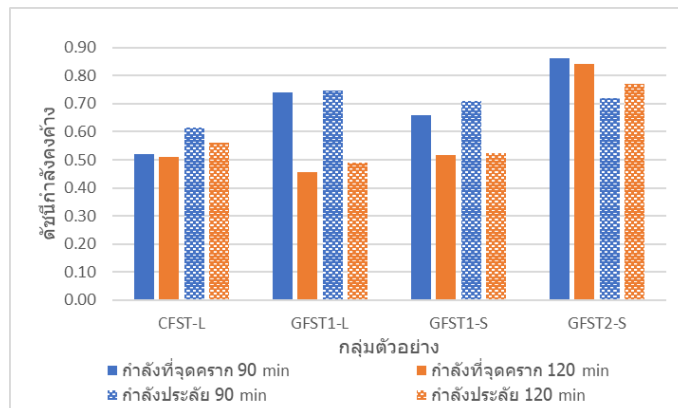
3.3 ดัชนีคงค้างของมวลและกำลังรับแรงอัด

รูปที่ 16 แสดงดัชนีมวลคงค้างหลังจากทดสอบเพลิงไหม้ โดยค่าดัชนีมวลคงค้างคำนวณจากน้ำหนักเฉลี่ยที่วัดหลังการทดสอบเพลิงไหม้ต่อน้ำหนักเฉลี่ยที่วัดก่อนทดสอบเพลิงไหม้ของแต่ละชิ้นงานพบว่า กลุ่มตัวอย่าง GFST1-L CFST-L และ GFST2-S มีการลดลงของมวลที่ใกล้เคียงกัน ในกรณีเผาไฟ 90 นาที แต่ในกรณีเผาไฟ 120 นาที กลุ่มตัวอย่างที่ใช้วัสดุเดิมเป็น GPC มีการลดลงของมวลมากกว่าชิ้นงานที่เดิมด้วย OPC นอกจากนี้ ขนาดของชิ้นงานมีผลต่อการลดลงของมวลหลังเผาไฟ โดยชิ้นงาน GFST1-S มีอุณหภูมิถึงกลางชิ้นงานสูงกว่าชิ้นงาน GFST1-L อย่างมาก และดัชนีมวลคงค้างของชิ้นงาน GFST1-S ต่ำกว่าชิ้นงาน GFST1-L เนื่องจากขนาดชิ้นงานที่เล็กกว่าทำให้อุณหภูมิกระจายสู่ศูนย์กลางชิ้นงาน ทำให้เกิดความเสียหายของเนื้อวัสดุมากกว่า



รูปที่ 16 ดัชนีมวลคงค้างหลังจากทดสอบเพลิงไหม้

รูปที่ 17 แสดงดัชนีกำลังคงค้างที่คำนวณจากกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยหลังสภาวะเพลิงไหม้ต่อกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ไม่ได้ผ่านการทดสอบเพลิงไหม้ โดยพิจารณาทั้งกำลังรับแรงอัดที่จุดครากและกำลังอัดประลัย พบว่า การใช้วัสดุเดิมที่เป็น GPC มีการลดลงของกำลังต่ำกว่าการใช้วัสดุเดิมเป็น OPC ในกรณีเพลิงไหม้ที่ระยะเวลา 90 นาที สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [3] แต่ในกรณีเพลิงไหม้ระยะเวลา 120 นาที การใช้วัสดุเดิมที่เป็น GPC มีแนวโน้มการลดลงของกำลังรับแรงอัดสูงกว่าวัสดุเดิมที่เป็น OPC เนื่องจาก GPC มีขยายตัวออกอย่างมาก ทำให้เกิดรุกรานภายในคอนกรีตภายหลังการเผาไฟระยะเวลา 120 นาที นอกจากนี้ การใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.8 ทำให้เสาวัสดุผสมมีดัชนีกำลังคงค้างสูงกว่ากรณีใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7 หลังการทดสอบเพลิงไหม้ เนื่องจากอัตราส่วนสารละลายที่มากขึ้นช่วยลดการนำความร้อนภายในได้อุณหภูมิสูง



รูปที่ 17 คำนวณกำลังคงค้างหลังจากทดสอบเพลิงไหม้

4. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของเพลิงไหม้ต่อกำลังรับแรงอัดของเสาท่อเหล็กเดิมด้วยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เก่ากลายเป็นส่วนประกอบหลักสำหรับวัสดุประสาน โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดภายใต้แรงกระทำตรงศูนย์กลางของเสาวัสดุผสมภายหลังการเผาไฟตามมาตรฐาน ISO-834 โดยสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. เสาท่อเหล็กที่เดิมด้วย GPC มีค่านีกำลังรับแรงอัดคงค้างภายหลังสภาวะเพลิงไหม้ 90 นาทีสูงกว่าเสาท่อเหล็กที่เดิมด้วย OPC แต่ในกรณีสภาวะเพลิงไหม้ 120 นาที เสาท่อเหล็กที่เดิมด้วย OPC มีค่านีกำลังรับแรงอัดคงค้างสูงกว่า
2. เสาวัสดุผสมขนาดเล็ก (S) มีค่านีมวลคงค้างหลังเผาไฟต่ำกว่าชิ้นงานขนาดใหญ่ (L)
3. เสาวัสดุผสมขนาดเล็ก (S) มีค่านีกำลังรับแรงอัดคงค้างหลังเผาไฟสูงกว่าชิ้นงานขนาดใหญ่ (L)
4. อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานของ GPC ผลต่อค่านีกำลังคงค้างของเสาวัสดุผสมภายหลังเผาไฟ โดยการใช้อัตราส่วนเท่ากับ 0.8 ทำให้เสาวัสดุผสมมีค่านีกำลังคงค้างสูงกว่ากรณีใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7 เนื่องจากอัตราส่วนสารละลายที่สูงขึ้นช่วยลดการนำความร้อนภายใต้อุณหภูมิสูง

ผลประโยชน์ทับซ้อน

บทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้มาจากโครงการวิจัยเรื่อง “การพัฒนาท่อเหล็กเดิมด้วยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในการก่อสร้าง” โดยโครงการนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (6641/2566)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D., Rangan, B., *Factors influencing the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete*, Civil Engineering Dimension, 2004, 6 (2), pp. 88-93.
- [2] Prasara-A, J., Gheewala, S.H., *Sustainable utilization of rice husk ash from power plants: A review*, Journal of Cleaner Production, 2017, 167, pp 1020-1028. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.042>
- [3] Tao, Z., Cao, Y., Pan, Z., Hassan, M.K., *Compressive behaviour of geopolymer concrete-filled steel columns at ambient and elevated temperatures*, International journal of high rise buildings, 2018. 7 (4), pp. 327-342. <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2018.7.4.327>
- [4] Katwal, U., Aziz, T., Tao, Z., Uy, B., Rahme, D., *Tests of circular geopolymer concrete-filled steel columns under ambient and fire conditions*, Journal of Constructional Steel Research, 2022, 196. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107393>
- [5] American Society for Testing and Materials. ASTM C618-22:2022. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*.
- [6] International Organization for Standardization. ISO 29581-2:2010. *Concrete-Chemical analysis by X-ray fluorescence*.
- [7] Thai Industrial Standards Institute. TIS 107:2566. *Carbon Steel Tube for General Structure*.
- [8] International Organization for Standardization. ISO 834:2014. *Fire resistance tests Elements of building construction*.
- [9] Luhar, S., Nicolaidis, D., Luhar, I., *Fire Resistance Behaviour of Geopolymer Concrete: An Overview*, Buildings, 2021, 11(3), pp. 82. <https://doi.org/10.3390/buildings11030082>
- [10] Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., Pothisiri, T., Sata, V., Chindaprasirt, P., *Influence of rice husk ash on mechanical properties and fire resistance of recycled aggregate high-calcium fly ash geopolymer concrete*. Journal of Cleaner Production, 2020. 252. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119797>
- [11] Arjun Raj, P.K., Sarath, D., Nagarajan, P., Shashikala, A.P., *Behaviour of geopolymer concrete at elevated temperature- a comprehensive review*, Materials Today Proceedings, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.521>
- [12] Lam, D., Gardner, L., *Structural design of stainless steel concrete filled columns*, Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(11), pp1275-1282. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.04.012>
- [13] He, A., Liang, Y., Zhao, O., *Behaviour and residual compression resistances of circular high strength concrete-filled stainless steel tube (HCFSSST) stub columns after exposure to fire*, Engineering Structures, 2020, 203. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109897>