

ความทนไฟของคอนกรีตที่ถูกกระตุ้นด้วยต่าง โดยใช้เถ้าลำต้นข้าวโพดและเศษแกรนิต

Fire resistance of alkali-activated concrete produced by corn-stalk ash biomass and granite waste

นิชาภัทร อิงครุเศรษฐ์¹ ภากร ฉั่วประดิษฐ์ภักดิ์² และ พิชชา จองวิวัฒน์สกุล³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาที่ทั่วโลกร่วมมือกันหาแนวทางป้องกัน การลดปริมาณการใช้ซีเมนต์ในคอนกรีตเป็นอีกหนึ่งวิธีในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยการใช้วัสดุปอซโซลานทดแทนการใช้ซีเมนต์ในคอนกรีต เช่น เถ้าลอยถ่านหิน (CFA) อย่างไรก็ตามความนิยมของโรงไฟฟ้าถ่านหินกำลังลดลง อีกหนึ่งทางเลือกทดแทนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นคือการใช้เถ้าชีวมวลจากการเกษตร งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการใช้เถ้าลำต้นข้าวโพด (BCSA) แทนที่บางส่วนใน CFA ด้วยปริมาณร้อยละ 0-40 และศึกษาอิทธิพลของการใช้เศษแกรนิตเป็นมวลรวมละเอียดแทนทรายธรรมชาติ ในคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง โดยศึกษาคุณสมบัติเชิงกล (กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด) และคุณสมบัติการทนไฟ โดยผลการศึกษาพบว่า การใช้ BCSA แทนที่ CFA ด้วยปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดัดมากที่สุด ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าเศษแกรนิตมีคุณสมบัติเป็นมวลรวมละเอียดที่ทดแทนทรายธรรมชาติได้เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยยะสำคัญ นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มปริมาณการแทนที่ BCSA ทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ และการใช้เศษแกรนิตให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยเมื่อเทียบกับการใช้ทรายธรรมชาติ ความเค้นอัดคงค้ำนั้นแนวโน้มที่เกิดขึ้นไม่มีความชัดเจน และค่าความเค้นอัดคงค้ำมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อทดแทนถ่านหินด้วยเถ้าลำต้นข้าวโพด ที่ปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

คำสำคัญ: คอนกรีตที่ถูกกระตุ้นด้วยต่าง, เถ้าลำต้นข้าวโพด, เศษแกรนิต, คุณสมบัติเชิงกล, คุณสมบัติการทนไฟ

Abstract

This research addresses the global warming challenge in the construction industry by exploring sustainable alternatives in concrete production. Cement production, particularly the clinker burning process, is a major source of greenhouse gas

emissions. Reducing cement content in concrete using pozzolanic materials like coal fly ash (CFA) can help mitigate these emissions. However, CFA production from coal-fired power plants is environmentally harmful. This study investigated the use of corn stalk ash (BCSA) as a partial substitute for CFA (0-40%) and granite waste as a replacement for natural sand in alkali-activated concrete. Results showed that 10% BCSA replacement yields the highest compressive and flexural strengths. Granite waste was performed comparably to natural sand, with minimal differences in mechanical properties. Increasing BCSA content increases incineration weight loss, while granite waste reduces weight loss compared to natural sand. Residual compressive strength trends remain inconclusive, with a tendency to increase at 40% BCSA replacement.

Keywords: Alkali-activated concrete, corn stalk ash, granite waste, mechanical properties, fire resistance

1. คำนำ

ในปัจจุบันภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาที่ทั่วโลกร่วมมือกันหาแนวทางป้องกันและแก้ไข การลดปริมาณการใช้ซีเมนต์ในคอนกรีตเป็นอีกหนึ่งวิธีในการป้องกันและแก้ไขภาวะโลกร้อน โดยวิธีที่มีแนวโน้มที่ดีคือการแทนที่การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในคอนกรีตด้วยวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) ซึ่งเป็นการใช้วัสดุที่เป็นของเหลือพลอยได้จากอุตสาหกรรมและเป็นการลดปริมาณขยะมูลฝอยฝังกลบอีกด้วย โดยหนึ่งในวัสดุทดแทนที่มีการใช้งานอยู่แล้วคือ เถ้าลอยถ่านหิน (CFA) โดยข้อดีของ CFA ที่นำมาใช้ทดแทนซีเมนต์คือจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงในระยะยาวแก่คอนกรีต [1] CFA เป็นผลพลอยได้ทั้งที่ได้จากโรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน อย่างไรก็ตามความนิยมของโรงไฟฟ้าถ่านหินในปัจจุบันกำลังลดลง อีกทั้งมีการหันมาผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียนแทน โดยพลังงานหมุนเวียนที่กำลังได้รับความนิยมมากขึ้นคือพลังงานชีวมวล

พลังงานชีวมวลเป็นการผลิตพลังงานด้วยวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรม การเกษตร ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญในหลายประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในประเทศไทย ปัญหาที่ตามมาคือเกิดขยะจากการเกษตรที่เหลือจำนวนมากซึ่งเป็นผลมาจากกิจกรรมการเก็บเกี่ยว เพื่อจัดการกับวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรเหล่านี้ นักวิจัยได้สำรวจศักยภาพในการใช้เถ้าชีวมวลต่างๆ ที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ทางการเกษตรเป็นวัสดุเสริมซีเมนต์มากขึ้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา และหนึ่งในนั้นคือเถ้าลำต้นข้าวโพด (BCSA) แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีการศึกษาที่ยังไม่หลากหลายเกี่ยวกับการใช้ BCSA ในคอนกรีต กระตุ้นด้วยต่าง จึงจำเป็นต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบและขยายความเข้าใจในเรื่องดังกล่าว

นอกจากนี้การหาวัสดุทดแทนทรายธรรมชาติเพื่อมาใช้เป็นมวลรวม ละเอียดก็สามารถช่วยในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ โดยหนึ่งใน วัสดุทดแทนที่มีความเป็นไปได้คือเศษแกรนิตจากอุตสาหกรรม หากสามารถนำมาใช้ทดแทนทรายธรรมชาติได้จะสามารถช่วยลดปริมาณก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ทั้งจากกระบวนการผลิตทรายธรรมชาติและ กระบวนการฝังกลบเศษแกรนิต

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของ BCSA ใน วัสดุที่ถูกระตุ้นด้วยต่าง ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติการทนไฟ อีกทั้งยังเพื่อศึกษาผลของการใช้เศษแกรนิตเป็นวัสดุมวลรวมละเอียดทดแทน ทรายธรรมชาติในวัสดุที่ถูกระตุ้นด้วยต่าง

2. วัสดุและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ สารยึดเกาะ (Binder) เป็นเถ้า 2 ประเภท ได้แก่ เถ้าลอยและเถ้าจากลำต้นข้าวโพด สารละลายต่าง มวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด ซึ่งมวลรวมละเอียดที่นำมาใช้ในการทดสอบ นี้ได้มี การนำเศษแกรนิตจากอุตสาหกรรมมาใช้ทดแทนทรายธรรมชาติเพื่อผลิต วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของ ส่วนผสมมีดังต่อไปนี้

1. สารยึดเกาะ ใช้เป็นเถ้า 2 ประเภทที่แตกต่างกัน โดยเถ้าประเภท แรก คือ เถ้าลอยถ่านหิน (CFA) ที่ได้มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะในจังหวัด ลำปางของประเทศไทย (รูปที่ 1) และเถ้าอีกประเภทที่ถูกนำมาใช้เป็นเถ้า ทดแทนสำหรับ CFA คือ เถ้าลำต้นข้าวโพด (BCSA) ซึ่งเป็นเศษเหลือ ทิ้งที่ได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลแม่กระเทียมในจังหวัดแพร่ ในประเทศไทย (รูปที่ 2) โดยเถ้าทั้งสองชนิดมีองค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพ ดัง ตารางที่ 1 สรุปได้ว่า เถ้าทั้งสองประเภทมีองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 และ CaO เหมือนกัน และองค์ประกอบทางเคมีอย่างอื่นใกล้เคียงกัน แต่ CFA จะมีปริมาณ Al_2O_3 ที่สูงกว่า BCSA

นอกจากนี้การกระจายตัวของอนุภาคของ CFA และ BCSA ถูกแสดง อยู่ในรูปที่ 3 โดยกล่าวได้ว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ย (P_{50}) ของ CFA คือ $5.45 \mu\text{m}$ ในขณะที่ BCSA มีค่าเฉลี่ยที่ใหญ่กว่า โดยมีขนาดอนุภาค $17.7 \mu\text{m}$ โดยสรุปคือ BCSA ประกอบด้วยอนุภาคหยาบกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ CFA

2. มวลรวมละเอียด มีอยู่ 2 ประเภทที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้ คือ ทราย ธรรมชาติ (รูปที่ 4) และ เศษแกรนิต (รูปที่ 5) โดยทรายธรรมชาตินั้นมี ความถ่วงจำเพาะเป็น 2.65 และ โมดูลัสความละเอียด มีค่าเป็น 2.85 และได้ทำการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเศษแกรนิตจากอุตสาหกรรมตาม มาตรฐาน ASTM-C128 (2022) มีค่า 2.64 และทำการวิเคราะห์ขนาดละ ของมวลรวมละเอียด ได้ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเศษแกรนิตจาก อุตสาหกรรมดังรูปที่ 6 และสามารถหาค่า โมดูลัสความละเอียด ได้ค่าเป็น 3.68

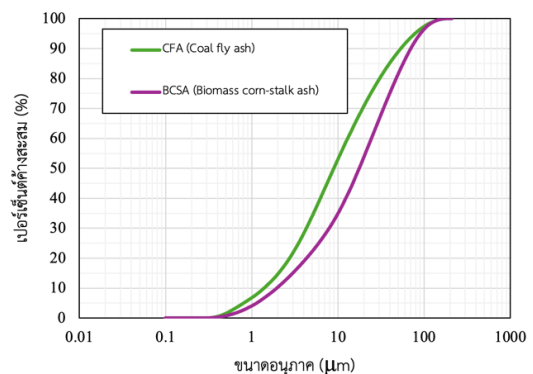
3. หินปูนธรรมชาติ นำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบ
4. สารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ที่มีองค์ประกอบ SiO_2 ร้อยละ 30.0, Na_2O ร้อยละ 14.5 และ H_2O ร้อยละ 55.3
5. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์



รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยถ่านหิน



รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าลำต้นข้าวโพด



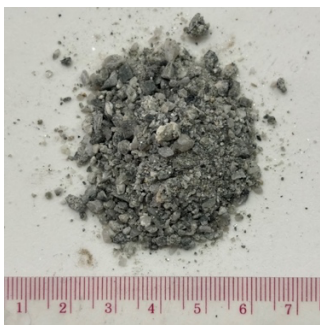
รูปที่ 3 การกระจายตัวของอนุภาคของ CFA และ BCSA

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติของ CFA และ BCSA

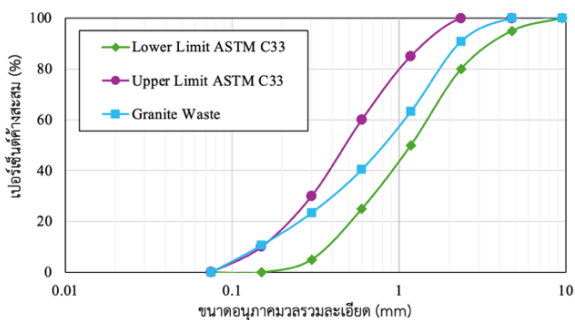
ส่วนประกอบ (%)	CFA	BCSA
ส่วนประกอบทางเคมี		
SiO ₂	33.30	39.00
CaO	23.00	11.70
K ₂ O	2.42	8.00
Al ₂ O ₃	17.70	4.90
Cl	0.03	2.93
P ₂ O ₅	0.28	2.66
Fe ₂ O ₃	13.00	2.55
MgO	2.50	2.55
SO ₃	4.54	2.43
TiO ₂	0.41	0.31
Na ₂ O	2.24	0.26
คุณสมบัติทางกายภาพ		
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	2.30	2.35
ค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้ (%)	0.1	22.1



รูปที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของทรายธรรมชาติ



รูปที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของเศษแกรนิต



รูปที่ 6 การกระจายตัวของอนุภาคเศษแกรนิตจากอุตสาหกรรม

2.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

การออกแบบเพื่อทดสอบผลกระทบของการแทนที่ CFA บางส่วนด้วย BCSA ในคอนกรีตระดับต้นด้วยค่า โดยอัตราส่วนการทดแทนของ BCSA จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 40% โดยเพิ่มปริมาณครั้งละ 10% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้การศึกษาด้านประสิทธิภาพของเศษแกรนิตที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตระดับต้นด้วยค่า จะทำการทดแทนทรายธรรมชาติด้วยเศษแกรนิตจากอุตสาหกรรม 100% และมีการใช้อัตราส่วนของเหลวต่อแก้ว (l/b) 0.60 ในส่วนผสมของคอนกรีต โดยการออกแบบส่วนผสมและสัดส่วนต่างๆ ที่ใช้แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัย (กก./ลบ.ม.)

ตัวอย่าง	วัสดุยึดเกาะ		สารละลายต่าง		มวลรวมละเอียด		มวลรวมหยาบ
	CFA	BCSA	NS	NH	ทรายธรรมชาติ	เศษแกรนิต	
BCSA0	400	-	120	120	700	-	1,050
BCSA0-G	400	-	120	120	-	700	1,050
BCSA10	360	40	120	120	700	-	1,050
BCSA10-G	360	40	120	120	-	700	1,050
BCSA20	320	80	120	120	700	-	1,050
BCSA20-G	320	80	120	120	-	700	1,050
BCSA30	280	120	120	120	700	-	1,050
BCSA30-G	280	120	120	120	-	700	1,050
BCSA40	240	160	120	120	700	-	1,050
BCSA40-G	240	160	120	120	-	700	1,050

**จากข้อมูลในตารางที่ 2 ระบบการตั้งชื่อ "BCSAXX" เป็นการระบุสัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของแก้วลำต้นขาวโตนในส่วนผสม และตัวอักษร "G" หมายถึงตัวอย่างมีการทดแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษแกรนิต

2.3 การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัย

2.3.1 กำลังรับแรงอัด (Compressive strength)

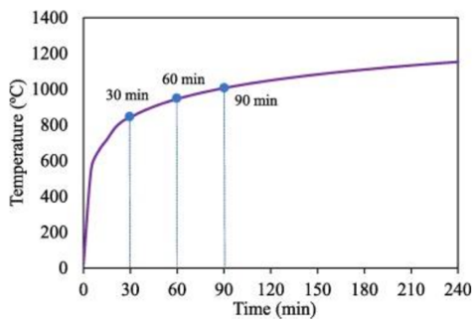
ประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน โดยเตรียมชิ้นงานทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. และสูง 200 มม. ตามมาตรฐาน ASTM-C39 (2021) [2]

2.3.2 กำลังรับแรงดัด (Flexural strength)

ประเมินกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM-C293 (2016) [3] เตรียมชิ้นงานโดยใช้แม่พิมพ์ปริซึมทรงสี่เหลี่ยมขนาด 100×100×350 มม.³ ที่อายุ 28 วัน

2.3.3 ความทนไฟ (Fire Resistance)

การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง หลังการเผาไฟซึ่งเป็นกระบวนการถึงการสูญเสียน้ำหนัก ลักษณะทางกายภาพ และกำลังรับแรงดัดที่คงเหลือ โดยชิ้นงานทดสอบมีการควบคุมความร้อนในเตาเผา ตามความสัมพันธ์เวลาและอุณหภูมิตามมาตรฐาน ISO-834 (1999) [4] ในรูปที่ 7 ที่อายุการบ่มคอนกรีต 28 วัน โดยตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนเป็นเวลาที่แตกต่างกันสามช่วง คือ 30, 60 และ 90 นาที



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิสำหรับการทดสอบการทนไฟ (ISO-834, 1999)

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

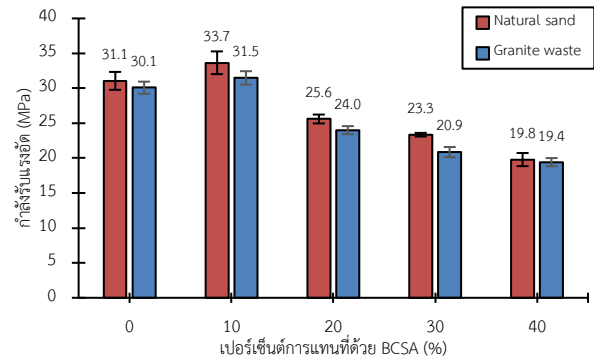
3.1 กำลังรับแรงดัด

รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ถูกกระตุ้นด้วยต่างที่มีทรายธรรมชาติและเศษแกรนิตเป็นมวลรวมละเอียด เมื่อใช้ BCSA มาทดแทน CFA ที่ปริมาณ 0%, 10%, 20%, 30% และ 40% ตัวอย่างคอนกรีตที่มีมวลรวมละเอียดเป็นทรายธรรมชาติมีกำลังรับแรงดัดเป็น 31.1, 33.7, 25.6, 23.3 และ 19.8 MPa ตามลำดับ ในส่วนของตัวอย่างคอนกรีตที่มีมวลรวมละเอียดเป็นเศษแกรนิต มีกำลังรับแรงดัดเป็น 30.1, 31.5, 24.0, 20.9 และ 19.4 MPa ตามลำดับ

จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงดัดของตัวอย่างคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อทดแทน CFA ด้วย BCSA จนมีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดที่ปริมาณการใช้ BCSA อยู่ที่ 10% โดยน้ำหนักและเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ BCSA ใน CFA เกิน 10% โดยน้ำหนัก ค่ากำลังรับแรงดัดของตัวอย่างมีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งคาดว่าสาเหตุเกิดจากอัตราส่วนระหว่างซิลิกาและอลูมินา ($\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$) จากเถ้าที่ใช้เป็น Binder ในวัสดุที่ถูกกระตุ้นด้วยต่าง จึงส่งผลเกิดแก๊สขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ He และคณะ (2016) [5] ที่ว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยตัวอย่างที่แทนที่ BCSA 0%, 10%, 20%, 30% และ 40% ใน CFA มีอัตราส่วน $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 4.06, 4.43, 4.87, 5.39 และ 6.01 ตามลำดับ ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มจำนวนพันธะของ Si-O-Si ซึ่งมีความแข็งแรง

มากกว่าความแข็งแรงของพันธะ Si-O-Al หรือ Al-O-Al แต่อย่างไรก็ตาม Nuaklong และคณะ (2019) [6] ที่ได้สรุปผลทำการศึกษาว่า อัตราส่วน $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มากกว่า 4.27 จะเป็นการจำกัดความสามารถในการรับแรงดัด ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดลดลงต่อมา

และในส่วนของการทดสอบการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษแกรนิต สรุปได้ว่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดเป็นเศษแกรนิตมีค่าต่ำกว่าค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดเป็นทรายธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย อย่างไม่มีนัยยะสำคัญ

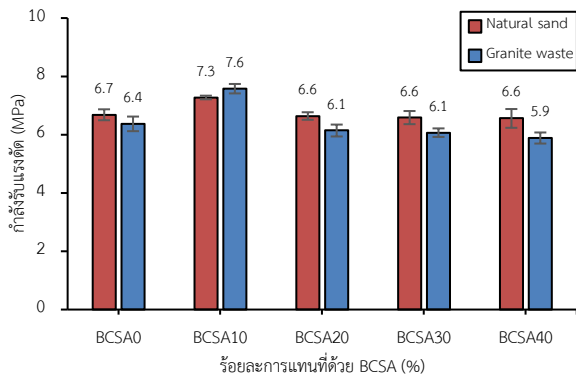


รูปที่ 8 กำลังรับแรงดัดของตัวอย่างคอนกรีตระหว่างมวลรวมละเอียดทรายธรรมชาติและเศษแกรนิต

3.2 กำลังรับแรงดัด

รูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ถูกกระตุ้นด้วยต่างที่มีทรายธรรมชาติและเศษแกรนิตเป็นมวลรวมละเอียด เมื่อใช้ BCSA มาทดแทน CFA ที่ปริมาณ 0%, 10%, 20%, 30% และ 40% ตัวอย่างคอนกรีตที่มีมวลรวมละเอียดเป็นทรายธรรมชาติมีกำลังรับแรงดัดได้ 6.7, 7.3, 6.6, 6.6 และ 6.6 MPa ตามลำดับ ในส่วนของตัวอย่างคอนกรีตที่มีมวลรวมละเอียดเป็นเศษแกรนิต ให้กำลังรับแรงดัดเป็น 6.4, 7.6, 6.1, 6.1 และ 5.9 MPa ตามลำดับ

จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงดัดของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อทดแทน CFA ด้วย BCSA จนมีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดที่ปริมาณการใช้ BCSA อยู่ที่ 10% โดยน้ำหนักและเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ BCSA ใน CFA เกิน 10% โดยน้ำหนัก ค่ากำลังรับแรงดัดของตัวอย่างมีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งคาดว่าสาเหตุของแนวโน้มดังกล่าวเกิดจากอัตราส่วนระหว่างซิลิกาและอลูมินา ($\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$) และในส่วนของการทดสอบการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษแกรนิต สรุปได้ว่า กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดเป็นเศษแกรนิตมีค่าต่ำกว่าค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดเป็นทรายธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย อย่างไม่มีนัยยะสำคัญ



รูปที่ 9 กำลังรับแรงดัดของตัวอย่างคอนกรีตระหว่างมวลรวมละเอียดทรายธรรมชาติและเศษแกรนิต

3.3 คุณสมบัติการทนไฟ

เมื่อนำตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ไปทำการทดสอบเผาไฟที่เวลา 30 นาที, 60 นาที และ 90 นาที ตามมาตรฐาน ISO-834 (1999) [4] ผลทดสอบปรากฏว่าตัวอย่างคอนกรีตที่เวลาการเผาไฟ 90 นาที มีสภาพเสียหายเป็นอย่างมาก จึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ผลของการสูญเสียน้ำหนัก และกำลังอัดคงค้างได้ สามารถนำมาวิเคราะห์ได้เพียงตัวอย่างที่ใช้เวลาการเผาทดสอบ 30 และ 60 นาที เท่านั้น

3.3.1 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผาไฟ (Mass loss)

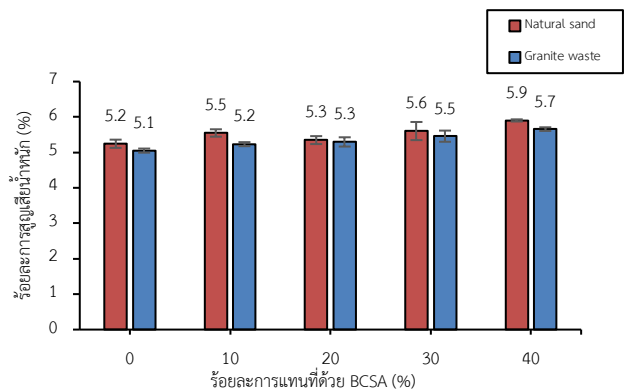
รูปที่ 10 แสดงร้อยละการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาไฟที่เวลา 30 นาที ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลละเอียดทั้ง 2 ประเภท และมีการแทนที่ CFA ด้วย BCSA ปริมาณ 0%, 10%, 20%, 30% และ 40% โดยตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดเป็นทรายธรรมชาติมีค่าการสูญเสียน้ำหนักที่ร้อยละ 5.2, 5.5, 5.3, 5.6 และ 5.9 ตามลำดับ ในส่วนของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดเป็นเศษแกรนิตมีการสูญเสียน้ำหนักที่ร้อยละ 5.2, 5.5, 5.3, 5.6 และ 5.9 ตามลำดับ

รูปที่ 11 แสดงร้อยละการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาไฟที่เวลา 60 นาที ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลละเอียดทั้ง 2 ประเภท และมีการแทนที่ CFA ด้วย BCSA ปริมาณ 0%, 10%, 20%, 30% และ 40% โดยตัวอย่างที่ใช้ทรายธรรมชาติมีการสูญเสียน้ำหนักที่ร้อยละ 8.6, 8.9, 9.4, 10.3 และ 14.7 ตามลำดับ ในส่วนของตัวอย่างที่ใช้เศษแกรนิตมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่ 6.7, 8.4, 8.6, 8.9 และ 11.1 ตามลำดับ

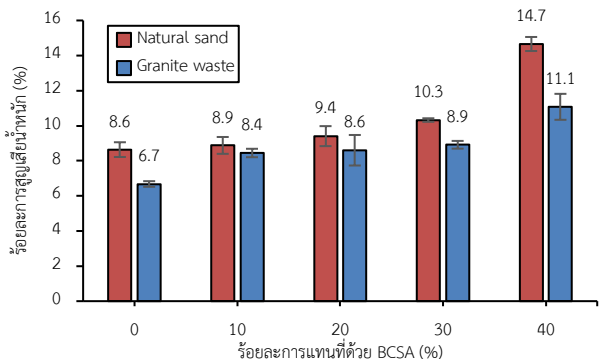
จากผลการทดสอบดังกล่าว พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ BCSA ที่ใช้ทดแทน CFA ส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการเผาไฟเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ และยังไปกว่านั้นเมื่อเวลาในการเผาไฟมากขึ้น ยิ่งเห็นถึงอิทธิพลของปริมาณ BCSA ที่ส่งผลต่อค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการเผาไฟอย่างชัดเจน โดยคาดว่าเกิดจากความสามารถในการอุ้มน้ำของ BCSA นั้นมากกว่าความสามารถในการอุ้มน้ำของ CFA ทำให้ปริมาณน้ำในตัวอย่างคอนกรีตที่มีปริมาณ BCSA มาก ยังมีค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาไฟมาก เนื่องจากทำให้มีการสูญเสียน้ำในระหว่างการเผาไฟมากกว่า

อีกทั้งยังพบว่าพบว่าเมื่อนำวัสดุเศษแกรนิตมาใช้เป็นมวลรวมละเอียด จะส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าต่ำกว่า

ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติเป็นมวลรวมละเอียด และยังระยะเวลาในการเผาไฟมากขึ้น ยิ่งเห็นถึงอิทธิพลของการใช้เศษแกรนิตเป็นมวลรวมละเอียดที่มีต่อค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการเผาไฟชัดเจนขึ้น โดยคาดว่าเกิดจากลักษณะทางกายภาพของมวลรวมละเอียด โดยที่เศษแกรนิตมีลักษณะแบนและเป็นเหลี่ยมมุม ในขณะที่ทรายธรรมชาติมีลักษณะเป็นเม็ดกลมสม่ำเสมอ เป็นผลให้การใช้เศษแกรนิตเป็นมวลรวมละเอียดเกิดช่องว่างภายในคอนกรีตน้อยกว่าการใช้ทรายธรรมชาติ ทำให้อนุภาคของน้ำที่สูญเสียน้ำขณะเผาระเหยออกได้ยาก ดังนั้นการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของตัวอย่างคอนกรีตที่มีเศษแกรนิตเป็นมวลรวมละเอียดนั้นจึงมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทรายธรรมชาติเป็นมวลรวมละเอียด



รูปที่ 10 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักหลังการเผาไฟที่เวลาการเผาไฟ 30 นาที ระหว่างมวลรวมละเอียดทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 11 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักหลังการเผาไฟที่เวลาการเผาไฟ 60 นาที ระหว่างมวลรวมละเอียดทั้ง 2 ชนิด

3.3.1 ความเค้นอัดคงค้าง (Residual compressive strength)

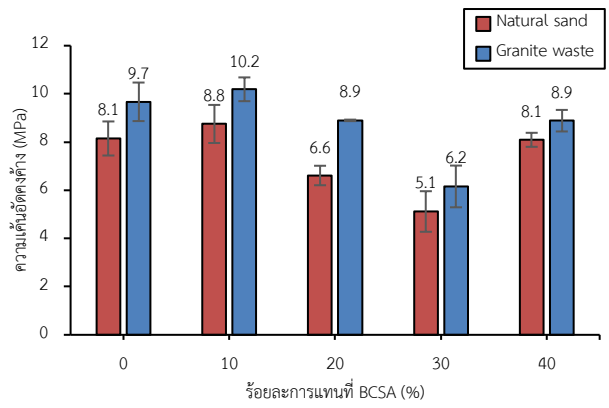
รูปที่ 12 แสดงความเค้นอัดคงค้างหลังเผาไฟที่เวลา 30 นาที ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลละเอียดทั้ง 2 ประเภท และมีการแทนที่ CFA ด้วย BCSA ปริมาณ 0%, 10%, 20%, 30% และ 40% โดยตัวอย่างคอนกรีตที่มีมวลรวมละเอียดเป็นทรายธรรมชาติมีความเค้นอัดคงค้างที่ 8.1, 8.8, 6.6, 5.1 และ 8.1 MPa ตามลำดับ ในส่วนของตัวอย่างคอนกรีตที่มีมวลรวมละเอียดเป็นเศษแกรนิตมีความเค้นอัดคงค้างที่ 9.7, 10.2, 8.9, 6.2 และ 8.9 MPa ตามลำดับ

รูปที่ 13 แสดงความเค้นอัดคงค้างหลังเผาไฟที่เวลา 60 นาที ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลละเอียดทั้ง 2 ประเภท และมีการแทนที่ CFA

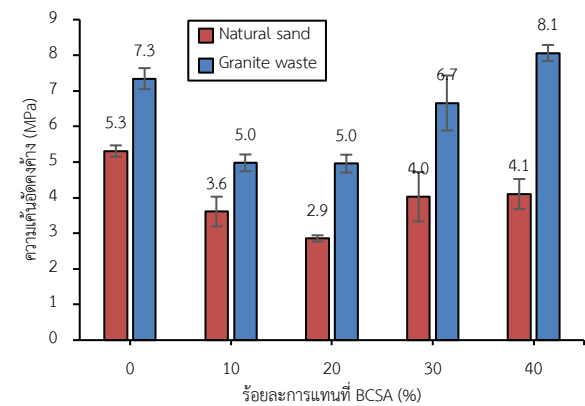
ด้วย BCSA ปริมาณ 0%, 10%, 20%, 30% และ 40% โดยตัวอย่างคอนกรีตที่มีมวลรวมละเอียดเป็นทรายธรรมชาติมีความเค้นอัดคงค้างที่ 5.3, 3.6, 2.9, 4.0 และ 4.1 MPa ตามลำดับ ในส่วนของตัวอย่างคอนกรีตที่มีมวลรวมละเอียดเป็นเศษแกรนิตมีความเค้นอัดคงค้างที่ 7.3, 5.0, 5.0, 6.7 และ 8.1 MPa ตามลำดับ

จากผลการทดสอบดังกล่าว พบว่าค่าความเค้นอัดคงค้างที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ BCSA ในตัวอย่างคอนกรีต สำหรับเวลาเผา 30 นาที และเวลาเผา 60 นาทีนั้น เกิดแนวโน้มที่ต่างกัน โดยที่เวลาเผา 30 นาทีนั้น การแทนที่ BCSA ในปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้เหลือกำลังอัดคงค้างมากกว่าตัวอย่างควบคุม และมากที่สุดจากทุกส่วนผสมที่ทำการทดสอบ ในตัวผลการทดสอบที่เวลาเผา 60 นาทีนั้นพบว่า การไม่ใส่ BCSA จะส่งผลให้เหลือกำลังอัดคงค้างมากที่สุด จากทุกส่วนผสมที่ทำการทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามสิ่งที่สังเกตได้ว่ามีความคล้ายคลึงกันของผลการทดสอบที่เวลาการเผา 30 และ 60 นาที คือเมื่อปริมาณ BCSA ที่ใช้แทนที่เป็น 40% โดยน้ำหนัก จะส่งผลทำให้กำลังอัดคงค้างจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยคาดว่าเกิดจากสาเหตุที่เมื่อปริมาณ BCSA ของตัวอย่างคอนกรีตนั้นมีปริมาณมาก ทำให้โครงสร้างภายในของคอนกรีตที่มี BCSA นั้นมีรูพรุนเยอะกว่าตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ BCSA น้อยกว่า และเมื่อนำไปทดสอบการทนไฟ จึงมีโพรงและรูพรุนให้น้ำออกมาได้ง่ายกว่า โครงสร้างภายในของคอนกรีตไม่ถูกทำลายขณะเผา จึงส่งผลให้ความเค้นอัดคงค้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่มีความชื้นแน่น และมีรูพรุนที่น้อยกว่า

นอกจากนี้เมื่อนำวัสดุเศษแกรนิตมาใช้เป็นมวลรวมละเอียด พบว่าค่าความเค้นอัดคงค้างหลังเผาของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าสูงกว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติเป็นมวลรวมละเอียดอย่างมาก และเมื่อให้เวลาในการเผาไฟมากขึ้น ยิ่งเห็นถึงอิทธิพลของการใช้เศษแกรนิตเป็นมวลรวมละเอียดที่มีต่อค่าความเค้นอัดคงค้างหลังการเผาไฟชัดเจนขึ้น โดยสันนิษฐานว่าเกิดจากรูพรุนของอนุภาคมวลรวมละเอียดที่แตกต่างกัน อนุภาคของทรายเป็นทรงกลมสม่ำเสมอ เมื่อได้รับความร้อนจะมีการแผ่ขยายความร้อนทั่วทุกทิศทาง ในขณะที่เศษแกรนิตมีลักษณะทางกายภาพเป็นทรงแบน เมื่อได้รับความร้อน การแผ่ขยายความร้อนกระจายได้ไม่ทั่วทิศทาง จึงส่งผลให้อนุภาคของน้ำที่สูญเสียไประหว่างเผาภายในปริมาณน้อยกว่า ส่งผลให้คอนกรีตเกิดความเสียหายน้อยกว่าการใช้ทรายธรรมชาติ มีความเค้นอัดคงค้างที่มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติเป็นมวลรวมละเอียด



รูปที่ 12 เปรียบเทียบความเค้นอัดคงค้างที่เวลาการเผาไฟ 30 นาที ระหว่างมวลรวมละเอียดทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 13 เปรียบเทียบความเค้นอัดคงค้างที่เวลาการเผาไฟ 60 นาที ระหว่างมวลรวมละเอียดทั้ง 2 ชนิด

4. บทสรุป

จากการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตที่การนำ BCSA มาเป็นวัสดุทดแทน CFA บางส่วน ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และมีการทดสอบนำเศษแกรนิตมาเป็นวัสดุทดแทนทรายธรรมชาติ พร้อมทั้งทดสอบกระบวนการทางด้านวิศวกรรม อันครอบคลุมถึงคุณสมบัติการรับแรงอัด การรับแรงดัด และการทนไฟ ของคอนกรีตระดับด้วยต่างที่แข็งตัวและบ่มตัวอย่างจนมีอายุ 28 วันสามารถสรุปผลได้ดังนี้

ความสามารถในการรับแรงอัดจะสูงสุดเมื่อทดแทน CFA ด้วย BCSA ที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มปริมาณ BCSA เกินกว่า 10% กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะมีแนวโน้มลดลง และเมื่อทดแทนทรายธรรมชาติด้วยเศษแกรนิตจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดนั้นมีค่าต่ำลงเล็กน้อย อย่างไม่มีนัยยะสำคัญ

ความสามารถในการรับแรงดัดนั้นจะมีค่ามากที่สุด และเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างควบคุม (ตัวอย่างที่ไม่มีใส่ BCSA) เมื่อทดแทน CFA ด้วย BCSA ที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ BCSA เกินกว่า 10% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตจะมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม กล่าวคือ BCSA มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงดัดน้อยเมื่อปริมาณ BCSA

เกิน 10% และเมื่อทดแทนทรายธรรมชาติด้วยเศษแกรนิตจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดนั้นมีความต่างเล็กน้อย อย่างไรก็ตามมีนัยยะสำคัญ

สำหรับความสามารถในการทนไฟ ทำการวัดจากการสูญเสียน้ำหนักและความเค้นอัดคงค้างหลังเผาไฟ ที่ 30 60 และ 90 นาที โดยเมื่อทำการเพิ่มปริมาณ BCSA จะส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักนั้นเยอะขึ้น และเมื่อทดแทนทรายธรรมชาติด้วยเศษแกรนิตจะส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาไฟนั้นลดลง ในส่วนของค่าความเค้นอัดคงค้างนั้นแนวโน้มที่เกิดขึ้นไม่มีความชัดเจน แนวโน้มที่เวลาเผาต่างกัน ส่งผลให้ได้แนวโน้มของความเค้นอัดคงค้างที่ต่างกัน แต่แนวโน้มที่ปรากฏเหมือนกันทุกช่วงเวลากการเผาไฟคือ ค่าความเค้นอัดคงค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อทดแทนCFA ด้วยBCSA ที่ปริมาณ 40% โดยน้ำหนัก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณรศ. ดร. พิชชา จงวิวัฒน์สกุล และ นายนครเรศ คงมาลัย ผู้ให้ความช่วยเหลือ ความสนับสนุน และคำแนะนำมากมายในการจัดทำงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Thongmune, T. Matsumoto, S. Kobayashi, P. Kitiyodom and K. Kurosawa. "DEM simulations of push-up load tests for sand plug in steel pipe pile". *Soils and Foundations*, 51(5), pp. 959-974, May. 2011. (In case of Journal)
- [2] ASTM-C39. (2021). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. In: ASTM international.
- [3] ASTM-C293. (2016). ASTM C293, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading). In: ASTM Philadelphia
- [4] ISO-834. (1999). 834: Fire resistance tests-elements of building construction. In International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [5] Wang, Z., Lei, T., Yang, M., Li, Z., Qi, T., Xin, X., He, X., Ajayebi, A., & Yan, X. (2017). Life cycle environmental impacts of cornstalk briquette fuel in China. *Applied Energy*, 192, 83-94.
- [6] Nuaklong, P., Wongsas, A., Sata, V., Boonserm, K., Sanjayan, J., & Chindaprasirt, P. (2019). Properties of high-calcium and low-calcium fly ash combination geopolymers mortar containing recycled aggregate. *Heliyon*, 5(9), e02513.