

อิทธิพลของกำลังรับแรงอัดและตำแหน่งการเทต่อกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน

ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์¹

มหาวิทยาลัยมหิดล ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170

บุราฉัตร กิตติกรจรัส² สหฤทัย กิจจานุรักษ์³ ธีรศรา อินทร์ชู³ และ อนูวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ^{4*}

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ต.ทุ่งสุขลา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20230

* Corresponding Author: anuwat@eng.sr.ku.ac.th

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์

² อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา และ กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง

³ นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา

⁴ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา และ กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 21 เมษายน 2565

แก้ไข : 12 มิถุนายน 2566

ตอบรับ : 23 สิงหาคม 2566

DOI: 10.14456/kmuttrd.2023.17

คำสำคัญ : ตำแหน่งการเท /

มอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเอง /

เส้นใยพอลิโพรไพลีน /

กำลังรับแรงดัด / กำลังรับแรงอัด

บทความนี้นำเสนอผลของกำลังรับแรงอัด ปริมาณเส้นใยพอลิโพรไพลีน และตำแหน่งการเท ต่อกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน เพื่อระบุปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้วัสดุก่อสร้างนี้ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ประมาณร้อยละ 4) เมื่อเสริมเส้นใยปริมาณร้อยละ 1 แต่กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงถึงประมาณร้อยละ 19 เมื่อเสริมเส้นใยปริมาณร้อยละ 2 ตัวอย่างในงานวิจัยนี้มีค่ากำลังรับแรงดัดประมาณร้อยละ 6.0-6.4 ของกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ไม่เสริมเส้นใย และกำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 24 ของกำลังรับแรงดัดเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยร้อยละ 2 ร่วมกับการเทที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน กำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณร้อยละ 33 และ 90 เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยร้อยละ 1 และ 2 โดยปริมาตร ตำแหน่งการเทมีผลชัดเจนต่อกำลังรับแรงดัด การเทที่กึ่งกลางคานทำให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 การลดลงของกำลังรับแรงอัดเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 2 ทำให้การประยุกต์ใช้มอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนกับองค์อาคารรับแรงอัดอาจไม่เหมาะสม แต่เหมาะสมอย่างมากสำหรับองค์อาคารรับแรงดัด และมีสมรรถนะสูงที่สุดเมื่อเทคานที่กึ่งกลาง

Influences of Compressive Strength and Casting Position on Flexural Strength of Polypropylene Fiber-Reinforced Self-Compacting Mortar

Totsawat Daungwilailuk¹,

Mahidol University, Salaya, Puttamonthon, Nakorn Pathom 73170

Burachat Kittikornjarus², Saharuethai Kitchanurak³, Teerisara Innchou³

and Anuwat Attachaiyawuth^{4*}

Kasetsart University Sriracha Campus, Thungsukla, Sriracha, Chonburi 20230

* Corresponding Author: anuwat@eng.src.ku.ac.th

¹ Lecturer, Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering

² Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha and The Innovation in Infrastructure and Construction Management Research Group.

³ Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha.

⁴ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha and The Innovation in Infrastructure and Construction Management Research Group.

Article Info

Article History:

Received: April 21, 2022

Revised: June 12, 2023

Accepted: August 23, 2023

DOI: 10.14456/kmuttrd.2023.17

Keywords : Pouring Position /
Self-Compacting Mortar /
Polypropylene Fiber /
Flexural Strength /
Compressive Strength

Abstract

This article presents the results on the effects of compressive strength, amount of polypropylene fiber and casting position on the flexural strength of polypropylene fiber-reinforced self-compacting mortar in order to identify suitable factors for using such a construction material. The results revealed that the compressive strength slightly improved (around 4%) when the fiber content was 1%. However, compressive strength decreased by 19% when the fiber content increased to 2%. The specimens in the present study had flexural strengths of around 6.0-6.4% of the compressive strengths of the mortar without fiber; flexural strength increased to 24% of compressive strength when the fiber content increased to 2% and when casting was performed at the middle of the beam. The flexural strength of the mortar significantly increased as the fiber content increased; the increase was approximately 33% and 90% as the fiber content increased to 1% and 2% by volume of the mortar. Casting position apparently affected the flexural strength. Pouring at the center of a beam resulted in 20% increase in the flexural strength. Because of the decrease in the compressive strength when the fiber content increased to 2%, polypropylene fiber-reinforced self-compacting mortar might not be suitable for compression members. On the other hand, such a mortar is appropriate for flexural members. The mortar would exhibit the best performance when casting is performed at the center of beam.

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าโครงสร้างอาคารโดยทั่วไปก่อสร้างจากวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีสมบัติทางกลที่ดีประกอบกับราคาถูกเมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างอื่น วิธีการใช้งานก็ไม่ซับซ้อนเพียงเสริมเหล็กให้ตรงตามที่ได้ออกแบบกำหนดและควบคุมการเทคอนกรีตให้มีการอัดแน่นที่ดีโดยการจี้เขย่าอย่างเหมาะสม สมรรถนะขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขึ้นอยู่กับสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริม โดยคอนกรีตถูกออกแบบให้รับแรงอัดและเหล็กเสริมถูกออกแบบให้รับแรงดึงเป็นหลัก อย่างไรก็ตาม เมื่อองค์อาคารมีอายุมากขึ้น ประกอบกับสภาวะแวดล้อมที่อาจกระตุ้นให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุ เช่น การกัดกร่อนจากคลอไรด์ ซัลเฟต คาร์บอนชั้นหรือสภาวะเปียกสลับแห้ง อาจเกิดการเสื่อมสภาพของเหล็กเสริม ซึ่งสังเกตได้จากรอยร้าวบนโครงสร้างตามแนวเหล็กเสริมร่วมกับสนิมที่เกาะบนเหล็กเสริมนั้น เมื่อเกิดสนิมมากขึ้น ทำให้หน้าตัดเหล็กเสริมลดลง ส่งผลต่อกำลังรับแรงดึงและแรงดัดขององค์อาคารอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จำเป็นต้องซ่อมแซมหรือเสริมกำลังเพื่อยืดอายุการใช้งานออกไป

หนึ่งในวิธีการพัฒนาสมบัติด้านความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถทำได้ด้วยการใช้คอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง (Self-compacting concrete, SCC) ที่สามารถไหลเข้าแบบและอัดแน่นได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองโดยไม่ต้องจี้เขย่า [1] การใช้ SCC ทำให้มั่นใจได้ว่าองค์อาคารจะมีความอัดแน่นสูงแม้ว่าผู้ปฏิบัติงานไม่มีความเชี่ยวชาญในการหล่อคอนกรีต ซึ่งสามารถออกแบบได้ตามข้อเสนอแนะของ Japan Society of Civil Engineers (JSCE) [2] หรืออาจออกแบบได้ตามวิธีที่มีผู้วิจัยศึกษาร่วมกับการใช้วัสดุพอซโซลาน [3-10] อีกวิธีหนึ่งคือการทดแทนเหล็กเสริมด้วยวัสดุที่ไม่เกิดสนิม เช่น แท่งคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP Rod) [11] เส้นใยพอลิโพรไพลีน (Polypropylene fiber) หรือวัสดุธรรมชาติจำพวกไม้ไผ่และเส้นใยธรรมชาติต่าง ๆ วัสดุเส้นใยพอลิโพรไพลีนช่วยเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนและแรงดัดได้อย่างมีนัยสำคัญ [12-17] เส้นใยพอลิโพรไพลีนถูกมาใช้ร่วมกับคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองเพื่อเพิ่มความทนทานของวัสดุได้อย่างดี [18] นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่ประยุกต์เส้นใยพลาสติกกับมอร์ตาร์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุซ่อมแซม [19] เส้นใยพอลิโพรไพลีนสามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดของโครงสร้างได้อย่างมาก [20] อย่างไร

ก็ตาม มีรายงานว่าประสิทธิภาพของเส้นใยนั้นขึ้นอยู่กับการกระจายตัวในองค์อาคารซึ่งมีหลายปัจจัยเกี่ยวข้อง เช่น ความสามารถในการทำงานได้ ปริมาณเส้นใย อัตราส่วนผสม เป็นต้น การกระจายตัวที่ดีเท่านั้นถึงจะทำให้เส้นใยเกิดประสิทธิภาพสูง [21] ปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตลดลงมาก หรือทำให้ค่าการไหลแผ่ของ SCC ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจำกัดปริมาณเพื่อควบคุมสมบัติอื่นร่วมกัน คณะผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาการใช้เส้นใยพอลิโพรไพลีนในมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองโดยไม่มีมวลรวมหยาบในส่วนผสมเพื่อหลีกเลี่ยงการขัดขวางการเรียงตัวของเส้นใยพอลิโพรไพลีน ทำให้เส้นใยเกิดประสิทธิภาพที่ดี โดยพิจารณาตำแหน่งการเทและกำลังรับแรงอัดผ่านการทดสอบคานมาตรฐานก่อนที่จะประยุกต์ไปสู่โครงสร้างคานขนาดจริง งานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นเบื้องต้นถึงกำลังรับแรงดัดที่แตกต่างเมื่อเส้นใยมีการกระจายตัวที่ต่างกัน เนื่องจากตำแหน่งการเทมอร์ตาร์ เพื่อให้วิศวกรสามารถใช้ประโยชน์สูงสุดจากเส้นใยได้เพียงปรับวิธีการทำงานเล็กน้อย ซึ่งการเปลี่ยนตำแหน่งการเทมอร์ตาร์ไม่ได้มีความซับซ้อน อีกทั้งยังสามารถใช้ได้กับโครงสร้างชนิดหล่อในที่หรือโครงสร้างสำเร็จรูปได้เช่นเดียวกัน

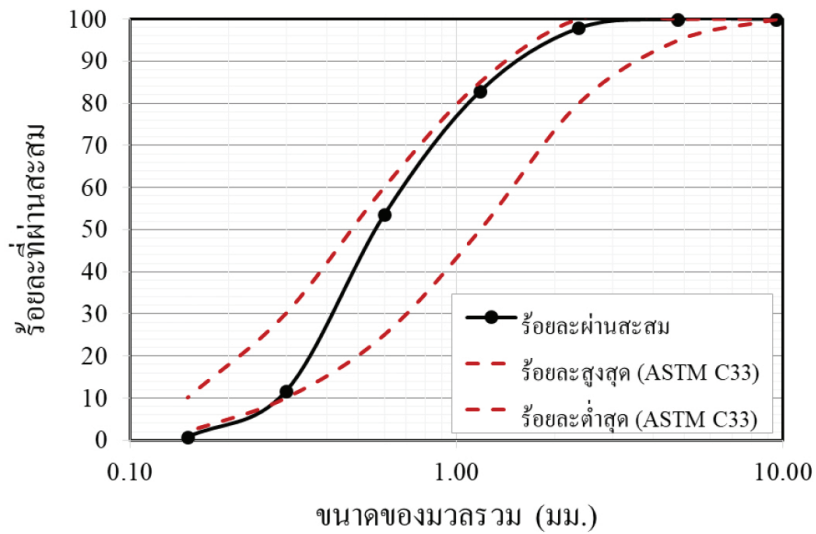
2. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของกำลังรับแรงอัดและตำแหน่งการเทมอร์ตาร์ต่อกำลังรับแรงดัดของคานมอร์ตาร์เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนโดยมีทั้งหมด 10 ส่วนผสม ทดสอบสมบัติการไหล กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด

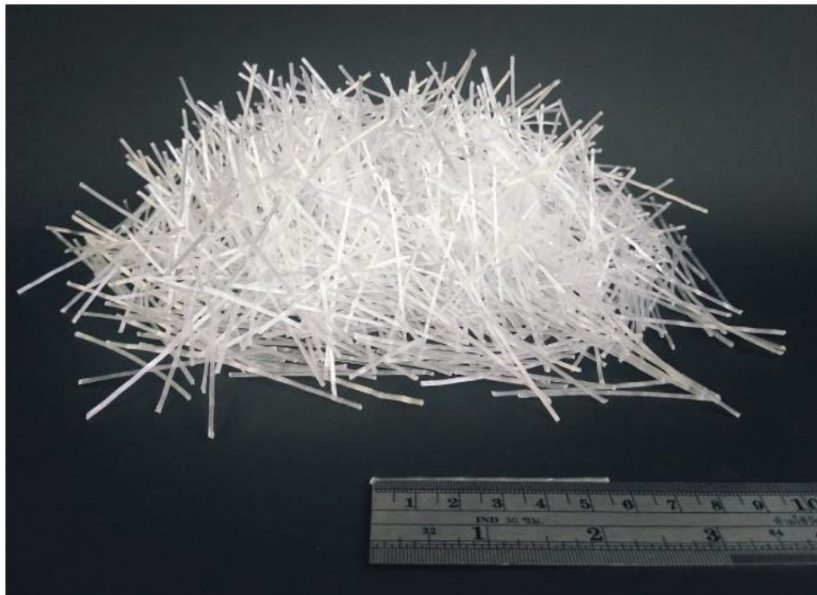
2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก.เล่ม 15-2555 [22] น้ำประปาทั่วไป มวลรวมละเอียดเป็นทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution) แสดงดังรูปที่ 1 สารลดน้ำพิเศษประเภท F ชนิด Polycarboxylic ether (PCE) และเส้นใยพอลิโพรไพลีนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.85 มม. ความยาว 55 มม. อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 65 นำเข้าจากประเทศเบลเยียมผ่านตัวแทนจำหน่าย คณะผู้วิจัยหลีกเลี่ยงปัจจัยอื่นที่อาจส่งผลกระทบต่อกระจายตัวของเส้นใยในคาน การใช้เส้นใยมากกว่าหนึ่งขนาดอาจส่งผลกระทบได้ งานวิจัย

นี้จึงใช้เส้นใยพอลิโพรไพลีนเพียงขนาดเดียว ลักษณะเส้นใยที่ ใช้แสดงดังรูปที่ 2 และสมบัติของวัสดุที่ใช้แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของมวลรวมละเอียดที่ใช้



รูปที่ 2 ลักษณะของเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่ใช้

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุ	สมบัติ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ตามมาตรฐาน มอก. เล่ม 15-2555, ASTM C150-07
น้ำ	น้ำประปา
มวลรวมละเอียด	ทรายแม่น้ำความถี่จำเพาะ 2.65, ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4, โมดูลัสความละเอียด 2.69 การดูดซึมน้ำร้อยละ 0.81
เส้นใยพอลิโพรไพลีน	ความยาว 55 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.85 มม. กำลังรับแรงดึงไม่น้อยกว่า 250 เมกะปาสคาล และความหนาแน่น 905 กก./ม. ³ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 65
สารลดน้ำพิเศษประเภท F	ชนิด polycarboxylic ether (PCE) ความถี่จำเพาะ 1.08

2.2 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเอง

การออกแบบส่วนผสมอ้างอิงตามข้อเสนอแนะของ Japan Society of Civil Engineers [2] โดยคอนกรีตต้องมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) ในช่วงร้อยละ 28-33 โดยน้ำหนักเพื่อป้องกันการแยกตัว อย่างไรก็ตามงานวิจัยใหม่ ๆ ระบุว่าสามารถเพิ่มค่า W/C ได้ถึงร้อยละ 45-50 [9] ดังนั้นค่า W/C จึงถูกออกแบบเท่ากับร้อยละ 35 และ 45 เพื่อให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน มีค่าประมาณ 700 และ 450 กก./ซม.² ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้แนะนำอัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์

(s/m) ให้ใช้ในช่วงร้อยละ 40-45 โดยปริมาตร แต่เนื่องจากส่วนผสมในงานวิจัยนี้ไม่มีมวลรวมหยาบมีเพียงเส้นใยพอลิโพรไพลีนซึ่งอาจขัดขวางการไหลน้อยกว่ามวลรวมหยาบ ผู้วิจัยเห็นว่าสามารถเพิ่มปริมาณมวลรวมละเอียดได้จึงกำหนดอัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m) เท่ากับร้อยละ 50 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษถูกใช้ในแต่ละส่วนผสมเพื่อให้สมบัติการไหลที่ดีโดยมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 600-750 มม. ปัจจัยในการออกแบบทุกส่วนผสมมอร์ตาร์แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนผสมมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน

ชื่อ ตัวอย่าง	อัตราส่วนทรายต่อ มอร์ตาร์ (s/m, ร้อยละ โดยปริมาตร)	อัตราส่วนน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (W/C, ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	สารลดน้ำพิเศษต่อ ปูนซีเมนต์ (SP/C, ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเส้นใย (f/b, ร้อยละ โดยปริมาตร)
35-0-C	50	35	0.6	0
35-1-C				1
35-1-E				2
35-2-C				
35-2-E				
45-0-C		45	0.5	0
45-1-C				
45-1-E				1
45-2-C				2
45-2-E				

และปริมาณวัสดุที่ใช้ในแต่ละส่วนผสมเมื่อพิจารณาต่อมอร์ตาร์ 1 ลบ.ม. แสดงดังตารางที่ 3

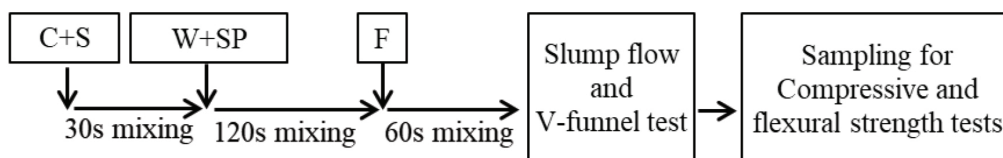
ตารางที่ 3 ปริมาณวัสดุที่ใช้ต่อปริมาตรมอร์ตาร์ 1 ลูกบาศก์เมตร

ชื่อ ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ (กก.)	ทราย (กก.)	น้ำ (กก.)	สารลดน้ำ พิเศษ (กก.)	เส้นใย พอลิโพรไพลีน (กก.)
35-0-C		1330.0	262.2	4.5	0.0
35-1-C		1303.4			9.0
35-1-E	749.1				
35-2-C		1276.8			18.0
35-2-E					
45-0-C		1330.0	293.2	3.3	0.0
45-1-C		1303.4			9.0
45-1-E	651.5				
45-2-C		1276.8			18.0
45-2-E					

2.3 ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์

รูปที่ 3 แสดงขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์ โดยเริ่มจากการผสมปูนซีเมนต์และมวลรวมละเอียดลงในเครื่องผสมชนิดกระทะ (Pan type mixer) ขนาด 50 ลิตร ใช้ความเร็วรอบในการผสม 60 รอบต่อนาที ผสมเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำน้ำที่ผสมกับสารลดน้ำพิเศษไว้แล้วเทลงในเครื่องผสมและผสมเป็นเวลา 120 วินาที ส่วนผสมที่ไม่มีเส้นใยพอลิโพรไพลีน

จะถูกนำไปทดสอบค่าการไหลแผ่ (Slump flow) ระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐาน (V-funnel time) และเทลงแบบหล่อเพื่อเตรียมสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดัด สำหรับส่วนผสมที่มีเส้นใยนั้นเส้นใยถูกผสมลงในเครื่องและผสมต่อเป็นเวลา 60 วินาที จากนั้นจึงนำส่วนผสมที่เข้ากันดีแล้วไปทดสอบค่าการไหล ระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐาน และเทลงแบบหล่อเพื่อเตรียมทดสอบต่อไป



C คือปูนซีเมนต์ S คือมวลรวมละเอียด W คือน้ำ SP คือสารลดน้ำพิเศษ F คือเส้นใยพอลิโพรไพลีน

รูปที่ 3 ขั้นตอนการผสมและการทดสอบมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเอง

2.4 การทดสอบความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์โดยการวัดค่าการไหลแผ่

ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ถูกทดสอบด้วยกรวยมาตรฐาน ขนาดเดียวกับการทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต มอร์ตาร์ถูก

เทลงในกรวยโดยไม่มีการกระทุ้งหรือเคาะแต่อย่างใด เมื่อมอร์ตาร์เต็มแล้วจึงยกขึ้นช้า ๆ ปล่อยให้มอร์ตาร์ไหลจนหยุดนิ่ง จากนั้นวัดค่าการไหลแผ่สองทิศทางตั้งฉากกันโดยเลือกด้านที่เห็นว่ากว้างที่สุดซึ่งด้านที่ตั้งฉากกันมักจะเป็นด้านที่แคบ

ที่สุดเนื่องจากบางครั้งการไหลแผ่มีลักษณะเป็นวงรี นำค่าที่ได้ทั้งสองค่ามาหาค่าเฉลี่ยเป็นค่าการไหลแผ่ของแต่ละส่วนผสม ค่าการไหลแผ่ของทุกส่วนผสมต้องอยู่ในช่วง 600-750 มม. ทำการปรับปริมาณสารลดน้ำพิเศษหากค่าการไหลแผ่ไม่อยู่ในช่วงดังกล่าว เนื่องจากปริมาณสารลดน้ำพิเศษจะถูกใช้มากขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในส่วนผสมลดลง (W/C ลดลง)

มอร์ตาร์ที่เส้นใยมีการกระจายตัวที่ดีสามารถพิจารณาได้หลังจากทดสอบค่าการไหลแผ่ สามารถสังเกตเห็นเส้นใยกระจายอยู่ทั่วส่วนผสมโดยไม่เกิดการกระจุกของเส้นใยหรือการแยกตัว ตัวอย่างการทดสอบค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่ไม่เกิดการแยกตัว แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตัวอย่างการทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่ไม่เกิดการแยกตัว

2.5 การทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์ด้วยกรวยมาตรฐาน

การทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์สามารถวัดได้จากระยะเวลาในการไหลผ่านกรวยมาตรฐาน หากใช้ระยะเวลาสั้นคือส่วนผสมที่มีความหนืดน้อย ในทางตรงกันข้ามหากใช้เวลามากคือส่วนผสมมีความหนืดมาก เมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้วและมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงที่กำหนด มอร์ตาร์จะถูกเทลงในกรวยมาตรฐานจนเต็มจากนั้นปล่อยให้มอร์ตาร์ไหลจนกระทั่งผู้ทดสอบมองเห็นแสงลอดจากปลายกรวย ระยะเวลาที่มอร์ตาร์ไหลตั้งแต่เริ่มจนเมื่อผู้ทดสอบเห็นแสงคือเวลาที่บ่งบอกความหนืดของมอร์ตาร์

2.6 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบกำลังรับแรงอัด

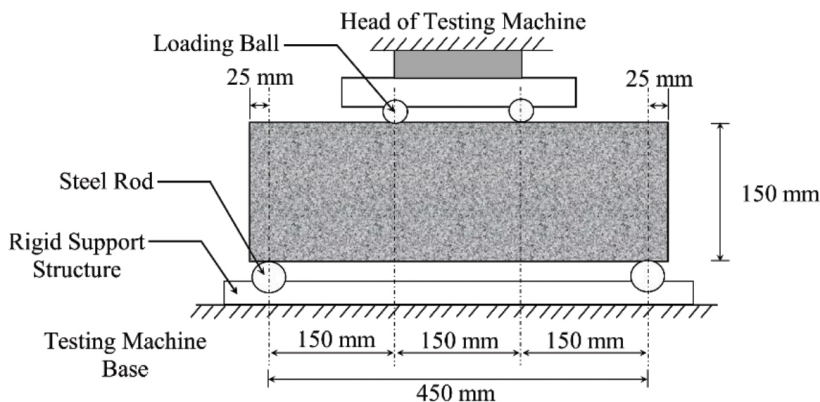
เมื่อทดสอบสมบัติที่สภาวะสดเสร็จสิ้นแล้ว มอร์ตาร์บางส่วนจะนำไปเทลงแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ความสูง 200 มม. จำนวน 6 ตัวอย่างโดยมีการเคาะข้างแบบเล็กน้อยเพื่อให้ส่วนผสมเต็มแบบหล่อ ถอดแบบ

เมื่อครบ 24 ชม. หลังผสม และนำไปบ่มในน้ำจนได้อายุครบกำหนด ตัวอย่างทดสอบ 6 ตัวอย่างถูกแบ่งไปทดสอบกำลังรับแรงอัดเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน อย่างละ 3 ตัวอย่าง การทดสอบกำลังรับแรงอัดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C39 [23]

2.7 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน

มอร์ตาร์ที่ผ่านการทดสอบสมบัติที่สภาวะสดแล้วจะถูกนำไปเทลงแบบคานขนาดหน้าตัด 150x150 มม. ยาว 600 มม. ถอดแบบเมื่อครบ 24 ชม. หลังผสม และนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน ตำแหน่งการเทกลางคานหรือริมคานขึ้นอยู่กับแต่ละตัวอย่างที่ได้วางแผนไว้ ระหว่างการเทนั้นจะมีการเคาะข้างแบบช่วยเพื่อให้ส่วนผสมเต็มแบบหล่อ การทดสอบกำลังรับแรงดัดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1609 [24] แสดงดังรูปที่ 5 การให้น้ำหนักกระทำแบบควบคุมการโก่งตัว (Deflection control) แบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่ 1 เมื่อระยะการโก่งตัวไม่เกินความยาวช่วงส่วนด้วย 900 (L/900) ให้

ความเร็วน้ำหนักระทำ 0.035-0.1 มม./นาที่ และช่วงที่ 2 (L/900) ให้ความเร็วน้ำหนักระทำ 0.05-0.3 มม./นาที่ เมื่อระยะการโก่งตัวมีค่ามากกว่าความยาวช่วงส่วนด้วย 900



รูปที่ 5 ขนาดคานตัวอย่างและลักษณะการทดสอบกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C1609 [21]

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากระเบียบวิธีวิจัยในหัวข้อที่ 2 ผลการทดสอบค่าการไหลผ่าน ระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐาน กำลังรับแรงอัด

และกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนแสดงดังตารางที่ 4 สามารถอภิปรายผลการทดสอบในหัวข้อที่สำคัญได้ดังนี้

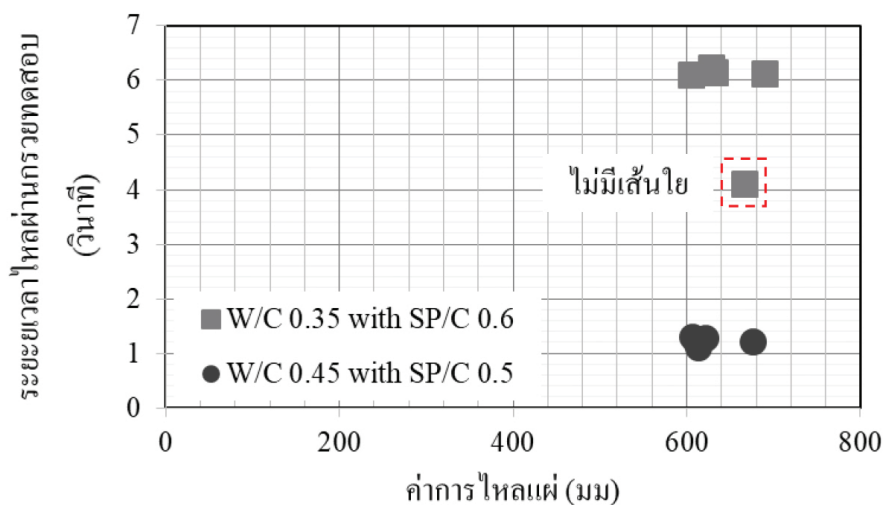
ตารางที่ 4 สมบัติที่สภาวะสดและสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบ

ชื่อ ตัวอย่าง	ค่าการไหลผ่าน เฉลี่ย (มม.)	ระยะเวลาไหลผ่าน กรวยทดสอบ (วินาที)	กำลังรับแรงอัด 3 วัน (กก./ชม. ²)	กำลังรับแรงอัด 28 วัน (กก./ชม. ²)	กำลังรับแรงดัด (กก./ชม. ²)
35-0-C	666.5	4.11	474.9	753.8	45.5
35-1-C	690.0	6.12	468.1	812.1	65.1
35-1-E	605.0	6.10	657.6	811.3	51.6
35-2-C	632.5	6.15	505.0	567.8	66.3
35-2-E	628.0	6.23	455.5	620.7	55.9
45-0-C	676.5	1.22	289.8	448.9	28.9
45-1-C	610.5	1.22	358.4	415.3	42.0
45-1-E	606.5	1.31	354.5	475.8	38.7
45-2-C	612.5	1.10	264.9	375.9	91.9
45-2-E	621.0	1.28	289.5	369.6	50.8

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลแผ่และระยะเวลาไหลผ่านกรวยทดสอบ

มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) ร้อยละ 35 ต้องการอัตราส่วนสารลดน้ำพิเศษต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 0.6 เพื่อให้มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 600-750 มม. แม้ว่าจะไม่มีเส้นใยพอลิโพรไพลีนหรือมีเส้นใยร้อยละ 1-2 ค่าการไหลแผ่ของชุดตัวอย่างนี้อยู่ในช่วง 605-690 มม. และมีระยะเวลาไหลผ่านกรวยทดสอบอยู่ในช่วง 4.11-6.23 วินาที มอร์ตาร์ที่ไม่มีเส้นใยใช้เวลา 4.11 วินาที และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้ใช้เวลาเพิ่มเป็น 6.10-6.23 วินาทีเนื่องจากเส้นใยทำให้ส่วนผสมมีความหนืดมากขึ้นและเกิดการขัดกันระหว่างการไหล ปริมาณเส้นใยร้อยละ 1-2 ไม่ส่งผลต่อระยะเวลาในการไหลผ่านกรวยทดสอบเนื่องจากเส้นใยมีน้ำหนักเบาจึงไม่ขัดขวางการไหลอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ชุดตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีค่า W/C ร้อยละ 45 นั้นต้องการค่า SP/C ร้อยละ 0.5 ในทุกส่วน

ผสมเพื่อให้มีค่าการไหลแผ่ตามที่กำหนด สังเกตได้ว่าค่า SP/C มีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่มี W/C ร้อยละ 35 เนื่องจากส่วนผสมนี้มีปริมาณน้ำมากกว่า ซึ่งน้อยกว่าชุดตัวอย่างข้างต้นเล็กน้อย ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.4 ชุดตัวอย่างนี้มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 606-676 มม. และมีระยะเวลาไหลผ่านกรวยทดสอบอยู่ในช่วง 1.10-1.31 วินาที ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่มีค่า W/C ร้อยละ 35 เนื่องจากมีปริมาณน้ำสูงทำให้มีความเร็วในการไหลมากตามไปด้วย อย่างไรก็ตามพบการแยกตัวเล็กน้อยร่วมกับการกระจุกตัวของเส้นใยบางส่วนในการทดสอบค่าการไหลแผ่ สามารถระบุได้ว่าค่า W/C ร้อยละ 45 อาจสูงเกินไปอาจลดปริมาณลง หรือปรับลดปริมาณสารลดน้ำพิเศษลง หรือใช้สารเพิ่มความหนืดเพื่อป้องกันการแยกตัว รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลแผ่และระยะเวลาไหลผ่านกรวยทดสอบของทุกตัวอย่าง



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลแผ่และระยะเวลาไหลผ่านกรวยทดสอบ

3.2 อิทธิพลของปริมาณเส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงอัด

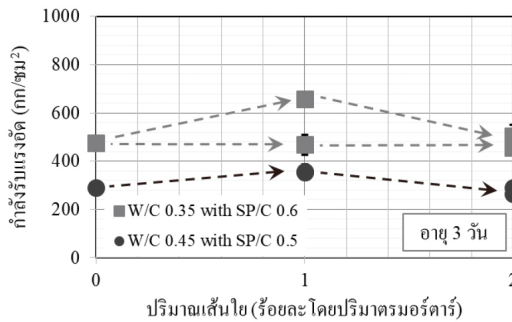
รูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงอัดเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยในมอร์ตาร์ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน และ 28 วันมีแนวโน้มเหมือนกันคือมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยร้อยละ 1 อย่างไรก็ตาม กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็นร้อยละ 2 โดยปริมาตร เมื่อพิจารณา กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน มอร์ตาร์ที่มีค่า W/C ร้อยละ 35

และ 45 มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 474.9 และ 289.8 กก./ซม.² ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณร้อยละ 20 เมื่อมีปริมาณเส้นใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 1 และมีค่าลดลงต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีเส้นใยประมาณร้อยละ 4 เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็นร้อยละ 2

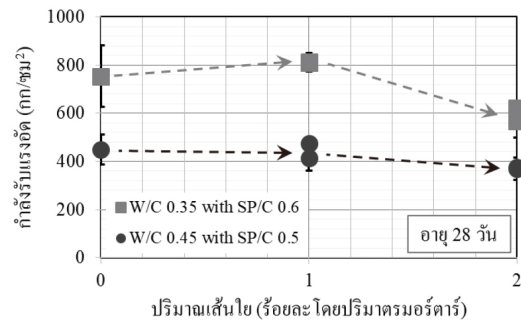
กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของมอร์ตาร์ที่มีค่า W/C ร้อยละ 35 และ 45 มีค่าเท่ากับ 753.8 และ 448.9 กก./ซม.² ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเฉลี่ยประมาณ

ร้อยละ 4 เมื่อมีปริมาณเส้นใยร้อยละ 1 และกำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีเส้นใยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 19 เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็นร้อยละ 2 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Durgun [25] ที่รายงานว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยพอลิโพรไพลีนในส่วนผสม แสดง

ให้เห็นว่าเส้นใยพอลิโพรไพลีนอาจไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในโครงสร้างที่รับแรงอัดเป็นหลัก หรือหากจำเป็นต้องใช้หรือจำเป็นต้องเทพร้อมกับโครงสร้างรับแรงดัด ปริมาณเส้นใยควรถูกจำกัดไม่ให้มากเกินไปจนทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้



ก) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน

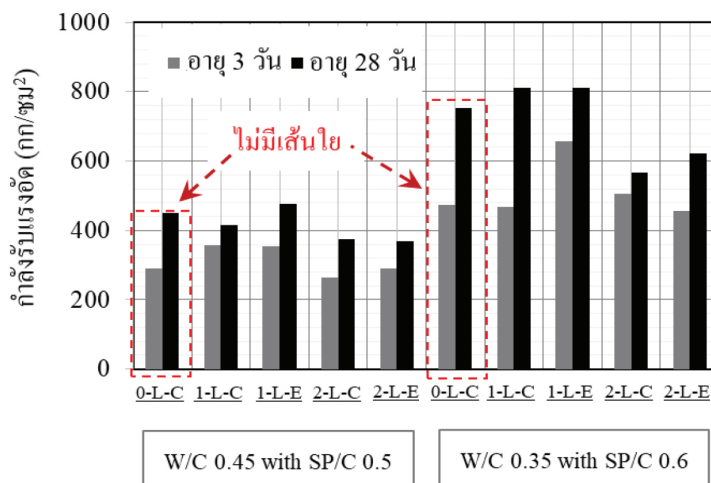


ข) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน

รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากปริมาณเส้นใยในมอร์ตาร์

การพัฒนากำลังรับแรงอัดจากอายุ 3 วัน ไป 28 วัน ของทุกส่วนผสมแสดงดังรูปที่ 8 มอร์ตาร์ที่ไม่มีเส้นใยมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 55-59 เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยร้อยละ 1 กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 16-73 และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยร้อยละ 2 กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 12-42 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเสริมเส้นใย

ทำให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วง 3-28 วัน โดยภาพรวมมีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีเส้นใยเนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใยในตัวอย่างทำให้มอร์ตาร์เกิดความไม่ต่อเนื่องจึงทำให้มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าและยังทำให้กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันมีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีเส้นใย

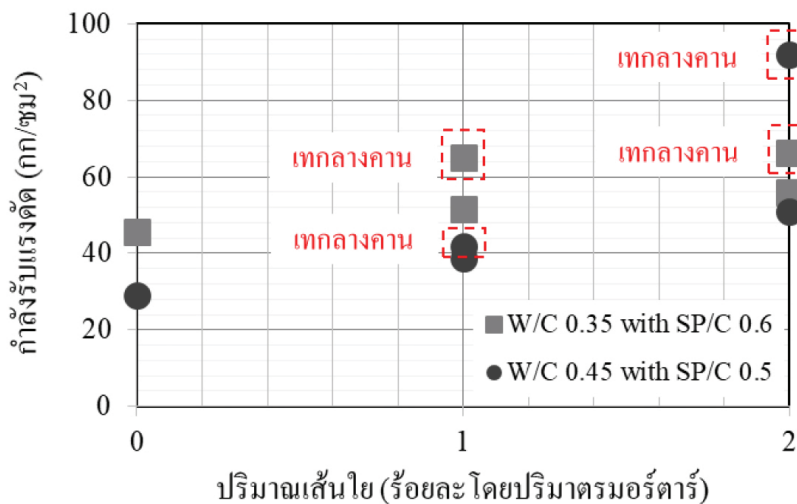


รูปที่ 8 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสม

3.3 อิทธิพลของปริมาณเส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงดัด

รูปที่ 9 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเส้นใยพอลิโพรไพลีนช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดัดได้ดี ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น โดยคานที่ไม่มีเส้นใยสำหรับตัวอย่างที่มีค่า W/C ร้อยละ 35 และ 45 มีกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 45.5 และ 28.9 กก./ชม.² ตามลำดับ กรณีส่วนผสมที่มีค่า W/C ร้อยละ 35 กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นจาก 45.5 กก./ชม.² เป็น 65.1 และ 66.3 กก./ชม.² เมื่อเทกึ่งกลางคานโดยเพิ่มปริมาณเส้นใยร้อยละ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 43.0 และ 45.5 ในขณะที่การเทริมคานทำให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเป็น 51.6 และ 55.9 กก./ชม.² เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยร้อยละ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 13.2 และ 22.8

และในกรณีส่วนผสมที่มีค่า W/C ร้อยละ 45 กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นจาก 28.9 กก./ชม.² เป็น 42.0 และ 91.9 กก./ชม.² เมื่อเทกึ่งกลางคานโดยเพิ่มปริมาณเส้นใยร้อยละ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 44.9 และ 217.4 ในขณะที่การเทริมคานทำให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเป็น 38.7 และ 50.8 กก./ชม.² เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยร้อยละ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 33.8 และ 75.4 เส้นใยพอลิโพรไพลีนช่วยรับแรงดึงที่เกิดบนหน้าตัดได้ดีมีพฤติกรรมเหมือนเหล็กเสริมรับแรงดึง แม้ว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรืออาจลดลงในบางตัวอย่างเมื่อใส่เส้นใยร้อยละ 2 โดยปริมาตร แต่สำหรับกำลังรับแรงดัดนั้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การใช้เส้นใยในองค์อาคารรับแรงดัดจะทำให้เส้นใยเกิดประโยชน์สูงสุด



รูปที่ 9 กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยในมอร์ตาร์

3.4 อิทธิพลของตำแหน่งการเทตอกำลังรับแรงดัดของคานเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน

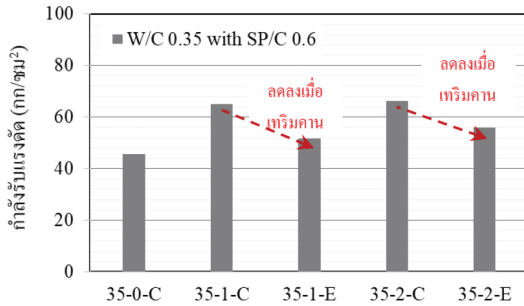
ตำแหน่งการเทมอร์ตาร์ที่กึ่งกลางคานและริมคานเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้เพื่อหาตำแหน่งการเทที่ดีที่สุดในการผลิตคานมอร์ตาร์เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน ของทุกส่วนผสมแสดงดังรูปที่ 10 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า กำลังรับแรงดัดมีค่าลดลงเมื่อคานถูกเทจากริมคานทั้งตัวอย่างที่มีค่า W/C ร้อยละ 35 และ 45 เป็นไปได้ว่าการเทกึ่งกลางคานอาจทำให้เส้นใยสะสมบริเวณกลางคานมากกว่าบริเวณ

ริมคานซึ่งเป็นตำแหน่งหลักในการรับแรงโมเมนต์ดัดจึงทำให้คานมีกำลังดัดสูง ในขณะที่การเทจากริมคานทำให้เส้นใยมีการกระจายตัวสม่ำเสมอเนื่องจากมอร์ตาร์พาเส้นใยไประหว่างการไหล จำนวนเส้นใยจึงไม่สะสมบริเวณใดบริเวณหนึ่งมากเป็นพิเศษจึงทำให้กำลังรับแรงดัดมีค่าไม่สูงเท่าตัวอย่างที่ถูกเทจากกลางคาน ดังนั้นการเทมอร์ตาร์ที่กึ่งกลางคานจะทำให้คานมีประสิทธิภาพในการรับแรงดัดมากที่สุดเมื่อใช้ทรัพยากรเท่ากัน

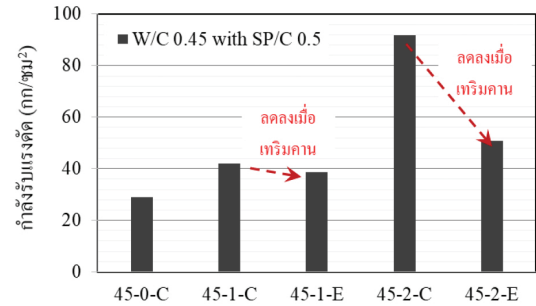
มอร์ตาร์ที่มีค่า W/C ร้อยละ 35 มีกำลังรับแรงดัดลดลงเนื่องจากการเทตัวอย่างริมคานเปรียบเทียบการเทที่กึ่งกลาง

คานจาก 65.1 เป็น 51.6 กก./ชม.² และ ลดลงจาก 66.3 เป็น 55.9 กก./ชม.² เมื่อมีปริมาณเส้นใยร้อยละ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นประมาณร้อยละ 21 และ 16 สำหรับมอร์ตาร์ที่มีค่า W/C ร้อยละ 45 มีกำลังรับแรงดัดลดลงจาก 42.0 เป็น 38.7 กก./ชม.² และ ลดลงจาก 91.9 เป็น 50.8 กก./ชม.²

เมื่อมีปริมาณเส้นใยร้อยละ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นประมาณร้อยละ 8 และ 45 ค่าการลดลงร้อยละ 45 เป็นค่าที่สูงมากเนื่องจากกำลังรับแรงดัดของคานที่เทกึ่งกลางคานเมื่อมีปริมาณเส้นใยร้อยละ 2 มีค่าสูงมาก ซึ่งอาจเกิดจากการกระจุกตัวของเส้นใยจำนวนมากบริเวณกึ่งกลางคาน



ก) กำลังรับดัดของคานที่มีค่า W/C ร้อยละ 35



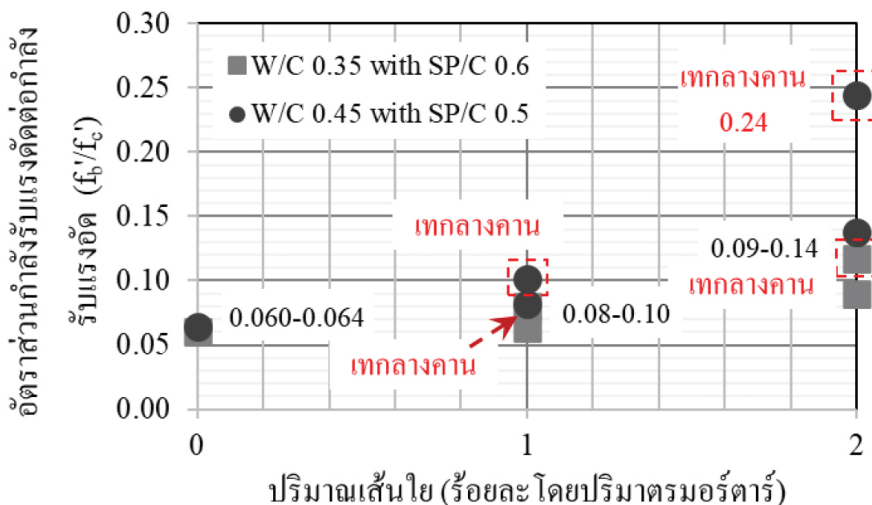
ข) กำลังรับดัดของคานที่มีค่า W/C ร้อยละ 45

รูปที่ 10 กำลังรับแรงดัดลดเมื่อมอร์ตาร์ถูกเทจากริมคาน

3.5 อัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงดัดต่อกำลังรับแรงอัด (f_b/f_c) เมื่อเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน

อัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงดัดต่อกำลังรับแรงอัด (f_b/f_c) ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณเส้นใยพอลิโพรไพลีนในมอร์ตาร์แสดงดังรูปที่ 11 มอร์ตาร์ที่ไม่มีเส้นใยมีอัตราส่วน f_b/f_c ประมาณ 0.060-0.064 แสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตามกำลังรับแรงอัด และอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าเพิ่มตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มโดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.08-0.10 และ 0.09-0.14 เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยร้อยละ 1

และ 2 ตามลำดับ สังเกตได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อมอร์ตาร์มีเส้นใยร้อยละ 2 ค่า f_b/f_c มีค่าเพิ่มขึ้นแม้ว่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลงแต่กำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 1 ซึ่งเกิดจากการทำงานของเส้นใยในการช่วยรับแรงดัดของคานได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้พบว่าอัตราส่วน f_b/f_c ของตัวอย่าง 45-2-C มีค่า 0.24 ซึ่งมากกว่าทุกตัวอย่างประมาณ 1.5-3 เท่า อาจเกิดจากการสะสมของเส้นใยจำนวนมากบริเวณกลางคานตามที่ได้อภิปรายในหัวข้อที่ 3.4



รูปที่ 11 อัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัด (f_b/f_c) ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากปริมาณเส้นใยในมอร์ตาร์

4. สรุปผล

จากผลการทดลองที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้สำหรับมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 1-2 โดยปริมาตรมอร์ตาร์อยู่ในช่วงร้อยละ 0.5-0.6 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ทำให้ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์มีค่าประมาณ 600-690 มม.
2. กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันของมอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 4 เมื่อเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนปริมาณร้อยละ 1 แต่กำลังรับแรงอัดกลับมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 19 เมื่อเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนปริมาณร้อยละ 1 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่เสริมเส้นใย ดังนั้นการใช้เส้นใยประเภทนี้ในองค์อาคารรับแรงอัดอาจไม่เหมาะสมหรือจำเป็นต้องพิจารณาเรื่องกำลังอัดที่ลดลงประกอบการออกแบบและใช้งานด้วย
3. กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยในมอร์ตาร์ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณร้อยละ 33 และ 90 เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยร้อยละ 1 และ 2 โดยปริมาตรตามลำดับ
4. การเพิ่มมอร์ตาร์ที่กึ่งกลางคานทำให้คานมีกำลังรับแรงดัดมากกว่าตัวอย่างคานที่เทจากริมคานประมาณร้อยละ 20 อาจเกิดจากเส้นใยบริเวณกลางคานมีปริมาณมาก วิธีการเทกลางคานจึงเหมาะสมสำหรับการก่อสร้างคานที่ใช้เส้นใยพอลิโพรไพลีน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่ได้สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยนี้ ขอทุนสนับสนุนโครงการวิจัยพื้นฐาน (Basic Research) ปีงบประมาณ 2565 รหัสโครงการวิจัย KUSRC 65-5003 และคณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท เอส อาร์ ไฟเบอร์ จำกัด ที่สนับสนุนเส้นใยโพลิโพรไพลีนสำหรับงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

1. Okamura, H. and Ouchi, M., 2003, "Self-Compacting Concrete," *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1 (15), pp. 5-15.
2. Japan Society of Civil Engineers, 1999, Recommendation for Self-Compacting Concrete, Research Subcommittee on Recommendation for Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, pp. 28-35.
3. Habibi, A. and Ghomashi, J., 2018, "Development of an Optimum Mix Design Method for Self-compacting Concrete based on Experimental Results," *Construction and Building Materials*, 168, pp. 113-123.
4. Alexandra, C., Bogdan, H., Camelia, N. and Zoltan, K., 2018, "Mix Design of Self-Compacting Concrete with Limestone Filler Versus Fly Ash Addition," *Procedia Manufacturing*, 22, pp. 301-308.
5. Aissa, Y., Goual, I. and Benabed, B., 2020, "Mix-design and Properties of Self-compacting Concrete Made with Calcareous Tuff," *Journal of Building Engineering*, 27, pp. 1-9.
6. Zhang, J., An, X. and Li, P., 2020, "Research on a Mix Design Method of Self-compacting Concrete based on a Paste Rheological Threshold Theory and a Powder Equivalence Model," *Construction and Building Materials*, 233, pp. 1-12.
7. Li, P., Zhang, T., An, X. and Zhang, J., 2020, "An Enhanced Mix Design Method of Self-compacting Concrete with Fly Ash Content based on Paste Rheological Threshold Theory and Material Packing Characteristics," *Construction and Building Materials*, 234, pp. 1-11.
8. Li, P., Ran, J., Nie, D. and Zhang, W., 2021, "Improvement of Mix Design Method based on Paste Rheological Threshold Theory for Self-compacting Concrete Using Different Mineral Additions in Ternary Blends of Powders," *Construction and Building Materials*, 276, pp. 1-13.

9. Yanweerasak, Y., Kittikornjarus, B., Pakwat, P., Plongpan, P. and Attachaiyawuth, A., 2021, "Flowability, Viscosity and Internal Friction of Self-Compacting Mortar as Affected by Its Mix Proportions," *KMUTT Research and Development Journal*, 44 (3), pp. 409-426. (In Thai)
10. Attachaiyawuth, A., 2015, Simple Evaluation of Flowability of Self-Compacting Concrete by Mortar Test, TCA E-Magazine. (In Thai)
11. De Sá, F.R.G., Silva, F.d.A. and Cardoso, D.C.T., 2020, "Tensile and Flexural Performance of Concrete Members Reinforced with Polypropylene Fibers and GFRP Bars," *Composite Structures*, 253, p. 1127845.
12. Li, J., Niu, J., Wan, C., Liu, X. and Jin, Z., 2017, "Comparison of Flexural Property between High Performance Polypropylene Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete and Steel Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete," *Construction and Building Materials*, 157, pp. 729-736.
13. Bicer, K., Yalciner, H., Pekrioglu Balkis, A. and Kumbasaroglu, A., 2018, "Effect of Corrosion on Flexural Strength of Reinforced Concrete Beams with Polypropylene Fibers," *Construction and Building Materials*, 185, pp. 574-588.
14. Caetano, H., Rodrigues, J.P.C. and Pimienta, P., 2019, "Flexural Strength at High Temperatures of a High Strength Steel and Polypropylene Fibre Concrete," *Construction and Building Materials*, 227, p. 116721.
15. Goud, V., Alagirusamy, R., Das, A. and Kalyanasundaram, D., 2019, "Influence of Various Forms of Polypropylene Matrix (Fiber, Powder and Film States) on the Flexural Strength of Carbon-polypropylene Composites," *Composites Part B: Engineering*, 166, pp. 56-64.
16. Ramesh, B., Gokulnath, V. and Ranjith Kumar, M., 2020, "Detailed Study on Flexural Strength of Polypropylene Fiber Reinforced Self-compacting Concrete," *Materials Today: Proceedings*, 22, pp. 1054-1058.
17. Zhu, D., Tang, A., Wan, C., Zeng, Y. and Wang, Z., 2021, "Investigation on the Flexural Toughness Evaluation Method and Surface Cracks Fractal Characteristics of Polypropylene Fiber Reinforced Cement-based Composites," *Journal of Building Engineering*, 43, p. 103045.
18. Anji Reddy, K., Rama Krishna, G. and Kumar Balguri, P., 2022, "Experimental Investigation on the Properties of SCC Containing Metakaolin and Polypropylene Fibre," *Materials Today: Proceedings*, 62, pp. 3006-3010.
19. Chun, B., Oh, T., Jang, Y.S., Lee, S.K., Lee, J.H. and Yoo, D.Y., 2022, "Strengthening Effect of Concrete Beams using Ultra-rapid-hardening Fiber-reinforced Mortar under Flexure," *Construction and Building Materials*, 352, p. 129064.
20. Hammad, N., ElNemr, A.M. and Hassan, H.E.D., 2022, "Flexural Performance of Reinforced Alkali-activated Concrete Beams Incorporating Steel and Structural Macro Synthetic Polypropylene Fiber," *Construction and Building Materials*, 324, p. 126634.
21. Grunewald, S. and Walraven J., 2001, "Rheological Study on the Workability of Fiber-reinforced Mortar," *Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, University of Tokyo, Japan, pp. 127-136.
22. Thailand Industrial Standard, 2012, Specifications for Portland Cement Type 1, 12 p. (In Thai)

23. American Society for Testing and Materials, 2018, "ASTM C39/C39M Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

24. American Society for Testing and Materials, 2012, "ASTM C1609/C1609M Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)," ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

25. Durgun, M.Y., Özen, S., Karakuzu, K., Kobya, V., Bayqra, S.H. and Mardani-Aghabaglou, A., 2022, "Effect of High Temperature on Polypropylene Fiber-reinforced Mortars Containing Colemanite Wastes," *Construction and Building Materials*, 316, p. 125827.

