



ผลกระทบของมุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กและระนาบวิบัติต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดัดของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเอง

Effect of the Angle between Steel Fiber Orientation and Failure Plane on Compressive and Flexural Strengths of Self-Compacting Mortars

พลพันธ์ เศรษฐพิทยากุล¹ ทศพร ประเสริฐศรี² ชีระชัย เสริมการดี³ ปวีศรี วัฒนสุนทรศิลป์³
พีทชญา ชมภูพล³ อนูวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ⁴ และชัชฌพงษ์ สุธัมมะ^{5*}

¹กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230

²สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

³ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตศรีราชา ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230

⁴กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230

⁵ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Ponpan Setpittayakul¹ Tosporn Prasertsri² Teeratan Sermkandee³ Pavarit Vattanasoontronsil³
Peetchaya Chomphoophol³ Anuwat Attachaiyawuth⁴ and Chisanuphong Suthumma^{5*}

¹The Innovation in Infrastructure and Construction Management Research Group, Department of Civil
Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha,
Kasetsart University Sriracha Campus Tung Sukla, Sri Racha, Chon Buri, 20230

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Pathumwan, Pathumwan, Bangkok 10330

³Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus, Tung
Sukla, Sri Racha, Chon Buri, 20230

⁴The Innovation in Infrastructure and Construction Management Research Group, Department of Civil
Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha,
Kasetsart University Sriracha Campus, Tung Sukla, Sri Racha, Chon Buri, 20230

⁵Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng
Saen Campus, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140

*ผู้รับผิดชอบบทความ: chisanuphong.s@ku.th เบอร์โทรศัพท์ 087-806-4687

Received: 25 January 2023, Revised: 13 August 2023, Accepted: 24 August 2023



บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของมุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กและระนาบวิบัติ (θ_f) ต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดัดของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเอง ส่วนผสมมอร์ตาร์มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 35 และ 45 มีอัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ร้อยละ 40 45 และ 50 เปรียบเทียบปริมาณเส้นใยร้อยละ 0.8 และ 1.6 โดยปริมาตรมอร์ตาร์ และศึกษาอิทธิพลของมุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยและระนาบวิบัติเท่ากับ 0 30 45 และ 90 องศา ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยร้อยละ 0.8 แต่พบว่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กเป็นร้อยละ 1.6 มุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กและระนาบวิบัติ (θ_f) เท่ากับ 30 และ 45 องศา ส่งผลให้มีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 50-70 เมื่อเปรียบเทียบกับมุม 0 องศา อย่างไรก็ตามพบว่ากำลังรับแรงดัดลดลงจากค่าสูงสุดประมาณร้อยละ 20-30 เมื่อค่า θ_f เท่ากับ 90 องศา การเสริมเส้นใยเหล็กในมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองให้มีประสิทธิภาพสูงสุดจำเป็นต้องพิจารณาปริมาณเส้นใยร่วมกับมุมระหว่างการเรียงตัวและระนาบวิบัติขององค์อาคาร

คำสำคัญ กำลังรับแรงอัด การเรียงตัวเส้นใย กำลังรับแรงดัด มอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเอง เส้นใยเหล็ก

Abstract

This paper presents effects of the angle between steel fiber orientation and failure plane (θ_f) on compressive strength and flexural strength of self-compacting mortar. Mortar proportions contained water to cement ratio of 35% and 45% with sand to mortar ratio of 40%, 45% and 50%. Fiber quantity of 0.8% and 1.6% by volume of mortar are compared and the influence of the angle between steel fiber orientation and failure plane (θ_f) of 0°, 30°, 45°, and 90° is studied. Research results showed that the compressive strength increased approximately 20% by increasing fiber amount of 0.8%, but it was found that the compressive strength reduced with the increase of steel fiber to 1.6%. The angle between steel fiber orientation and failure plane (θ_f) at 30° and 45°. affected in an increase in flexural strength by an average of 50%-70% when compared to the θ_f of 0°. However, it was found that the compressive strength decreased from the highest value by approximately 20%-30% with the θ_f of 90°. The most efficient reinforcing steel fiber in self-compacting mortar requires a consideration of fiber content, fiber orientation, and failure plane.

Keywords: Compressive strength, Fiber orientation, Flexural strength, Self-compacting mortar, Steel fibers

1. บทนำ

การเสริมเส้นใยเหล็กถือเป็นวิธีที่ช่วยปรับปรุงสมบัติการรับแรงดึงและแรงเฉือนของคอนกรีตได้เป็นอย่างดีและลดโอกาสเกิดการวิบัติแบบเปราะของคอนกรีตได้ [1-2] เส้นใยเหล็กที่นำมาใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังสามารถหาซื้อได้จากภาคอุตสาหกรรม [3-4] งานวิจัยที่ผ่านมาได้พิจารณาเลือกใช้การเสริมเส้นใยเหล็กเพื่อปรับปรุงสมบัติการรับแรงอัด [5-8] การรับแรงดึง [5-6] การรับแรงดัด [6-8] การรับแรงเฉือน [9-10] และการรับแรงกระแทกเนื่องจากกระสุนปืน [11-12] นอกจากการเสริมเส้นใยเพื่อปรับปรุงสมบัติวัสดุของคอนกรีตแล้วนั้น อีกทางหนึ่งสามารถพิจารณาเลือกใช้คอนกรีต

สมรรถนะสูงเพื่อช่วยเพิ่มความสะดวกในการก่อสร้างได้ เพิ่มความกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน ตลอดจนเพิ่มความคงทนของโครงสร้างได้เช่นเดียวกัน และคอนกรีตประเภทหนึ่งซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มคอนกรีตสมรรถนะสูงที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายคือคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง (Self-Compacting Concrete, SCC) ในอดีตมีการพัฒนาคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองเพื่อเพิ่มคุณภาพโครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากบางครั้งผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถเทคอนกรีตให้มีความอัดแน่นที่ดีได้ [13-14] ในช่วง 7 ปีที่ผ่านมาได้มีการเสนอวิธีการเพิ่มความสามารถอัดแน่นด้วยตัวเองของคอนกรีตโดยการขจัดฟองอากาศขนาดใหญ่และกักฟองอากาศขนาดเล็กผ่านการใช้



สารกักกระจายฟองอากาศ (Air-Entraining Agent) ร่วมกับสารขจัดฟองอากาศ (Defoaming Agent) ในปริมาณที่เหมาะสม การผสมคอนกรีตด้วยวิธีพิเศษ ตลอดจนการปรับปริมาณสารผสมเพิ่ม ถือเป็นแนวทางการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองตามที่เสนอไว้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [15-24] ในที่นี้สามารถพิจารณาได้ว่าการประยุกต์คอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยเหล็กถือเป็นแนวทางในการรวบรวมข้อดีของการใช้งานคอนกรีตสมรรถนะสูง ร่วมกับการเพิ่มประสิทธิภาพการรับกำลังของโครงสร้าง

แนวคิดในข้างต้นได้รับการศึกษาผ่านงานวิจัยเชิงทดสอบที่มีการนำคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองมาจัดเตรียมเป็นตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กและเส้นใยเหล็กในขนาดเท่าโครงสร้างจริง [25-29] ถึงแม้ว่าการเสริมเส้นใยเหล็กจะลดความสามารถในการทำงานได้และความสามารถไหลได้ของคอนกรีตสด [25] แต่กำลังต้านทานแรงดัดของตัวอย่างทดสอบกลับมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [25-26] เส้นใยเหล็กช่วยลดความกว้างรอยร้าวและการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานได้ ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคานมีค่าสูงขึ้น [27] นอกจากนี้ การเสริมเส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงอัดในตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กกล่องได้เช่นเดียวกัน [28] ในกรณีตัวอย่างทดสอบพื้นคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองที่มีการเสริมเหล็กและเส้นใยเหล็ก พบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนเจาะทะลุและความสามารถต้านทานการเสีรूपของตัวอย่างทดสอบมีค่าสูงขึ้นในกรณีที่มีการเสริมเส้นใยเหล็ก [29] งานวิจัยเชิงทดสอบอื่นได้ทำการยืนยันแนวคิดการเสริมเส้นใยในคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองจากการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น ประเภทและรูปร่างของเส้นใย การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษวัสดุเหลือใช้ และการปรับสัดส่วนของสารผสมเพิ่ม โดยที่ผลการศึกษาของทุกงานวิจัยบ่งชี้ว่าการเสริมเส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงอัดและแรงดัดได้ดี [30-35]

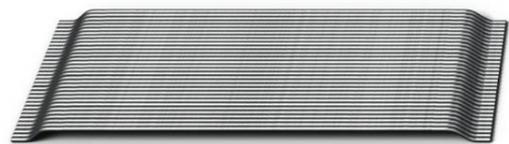
จากการทบทวนงานวิจัยในอดีตและพิจารณาช่องว่างในการวิจัยตามที่ได้กล่าวมา พบว่าการจัดเรียงทิศทางของเส้นใยเหล็กถือเป็นตัวแปรที่ยังไม่ได้รับการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลาย คณะผู้วิจัยจึงสนใจดำเนินการทดสอบเพื่อศึกษาผลของปริมาณเส้นใยเหล็กและทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กต่อกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของ

มอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเอง นอกจากนี้ ปริมาณการใช้ทรายและสารลดน้ำพิเศษจัดเป็นตัวแปรที่ได้รับการพิจารณาไปด้วย

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการเตรียมมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยเหล็กประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ตามมาตรฐานมอก. [36] และ ASTM C150-07 [37] มวลรวมละเอียดเลือกใช้ทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีความถ่วงจำเพาะและโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.62 และ 2.73 ตามลำดับ น้ำผสมมอร์ตาร์ใช้เป็นน้ำประปาทั่วไป รวมถึงมีการใช้สารลดน้ำแบบพอลิคาร์บอกซิเลตอิเทอร์ ซึ่งจัดเป็นสารลดน้ำประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C 494 [38] และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.08 นอกจากนี้ มีการเสริมกำลังมอร์ตาร์ด้วยเส้นใยเหล็กแบบงอปลายที่มีความยาว 35 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 สมบัติเชิงกลของเส้นใยในด้านกำลังรับแรงดึงประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 1.345 และ 210,000 เมกะปาสกาลตามลำดับ



รูปที่ 1 เส้นใยเหล็กแบบงอปลาย [39]

2.2 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็ก

อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กในงานวิจัยประกอบด้วยอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ อัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ อัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อมอร์ตาร์ และสารลดน้ำพิเศษต่อปูนซีเมนต์แสดงดังตารางที่ 1 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้เป็นปริมาณที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 550-650 มิลลิเมตร โดยอ้างอิงจากงานวิจัยคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองช่วงการไหลแผ่ที่แนะนำโดยยังมอร์ตาร์ยังไหลได้และไม่เกิดการแยกตัวของส่วนผสม [15-16]

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

อัตราส่วน น้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (W/C, %)	อัตราส่วน ทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m, %)	อัตราส่วน เส้นใยเหล็ก ต่อมอร์ตาร์ (f/m, %)	อัตราส่วนสาร ลดน้ำพิเศษต่อ ปูนซีเมนต์ (SP/C, %)
35	40	0.0	0.4
		0.8	0.5
		1.6	0.6
	45	0.0	0.45
		0.8	0.7
		1.6	0.9
45	50	0.0	0.8
		0.8	0.9
		1.6	1.2
	40	0.0	0.35
		0.8	0.6
		1.6	0.4
45	45	0.0	0.5
		0.8	0.7
		1.6	0.7
	50	0.0	0.65
		0.8	0.7
		1.6	0.85

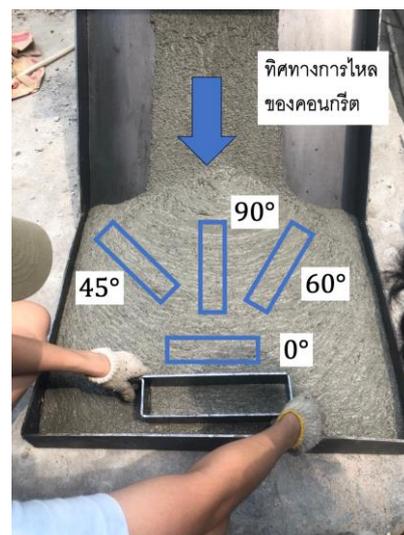
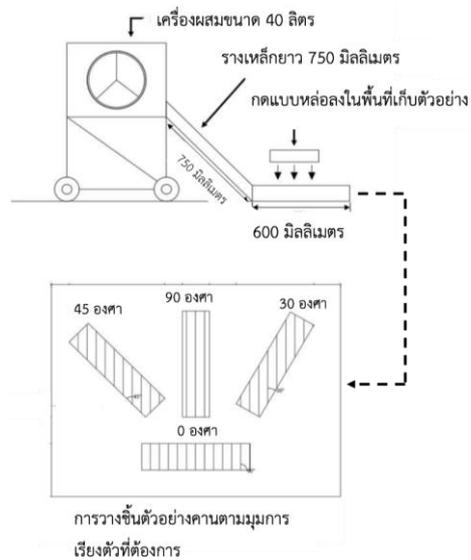
2.3 ขั้นตอนการผสมและเก็บตัวอย่างทดสอบมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็ก

ในการผสมมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กผสมตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 1 โดยใช้เครื่องผสมคอนกรีตแบบ Pan Mixer โดยมีการทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ก่อนเก็บตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างทดสอบมี 2 รูปแบบคือตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีลักษณะทรงกระบอกขนาด 100x200 มิลลิเมตรและตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ใช้เป็นคนขนาด 75x75x300 มิลลิเมตร

สำหรับตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดัดดำเนินการโดยปล่อยมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กไหลจากเครื่องผสมลงบนรางลาดยาว 750 มิลลิเมตร เมื่อมอร์ตาร์ไหลลงสู่พื้นที่เก็บตัวอย่างด้านล่างจนได้ความหนา 75 มิลลิเมตรแล้วจึงทำการเก็บตัวอย่างคานโดยการนำแบบหล่อคานกดลงในพื้นที่เก็บ

ตัวอย่าง โดยทำมุมกับในทิศการไหลของมอร์ตาร์เพื่อให้ได้มุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กและระนาบวิบัติตามต้องการคือ 0 30 45 และ 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2 นอกจากนี้ได้เก็บตัวอย่างคานเสริมเส้นใยเหล็กที่มีการเรียงตัวแบบสุ่มและตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมเส้นใยเหล็กโดยตัดมอร์ตาร์จากพื้นที่เก็บตัวอย่างใส่ลงแบบหล่อโดยตรง

สำหรับตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดนั้นเก็บตัวอย่าง 2 ส่วนผสมคือมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กที่มีการเรียงตัวแบบสุ่ม และตัวอย่างทรงกระบอกที่ไม่มีการเสริมเส้นใยเหล็ก เนื่องจากไม่สามารถควบคุมการเรียงตัวของเส้นใยในตัวอย่างทรงกระบอกได้



รูปที่ 2 การผสมและการเก็บตัวอย่างของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กในทิศทางการเรียงตัวต่าง ๆ



2.4 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็ก

การทดสอบกำลังรับแรงอัดดำเนินการโดยการนำชิ้นตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 100x200 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 อายุชุดทดสอบ เข้าสู่เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดที่สามารถให้น้ำหนักกระทำได้ถึง 1000 กิโลนิวตัน ให้น้ำหนักกระทำจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ บันทึกกำลังอัดสูงสุดที่เกิดขึ้น

2.5 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็ก

การทดสอบกำลังรับแรงดัดดำเนินการโดยการนำชิ้นตัวอย่างคานขนาด 75x75x300 มิลลิเมตร เข้าสู่เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) ทดสอบกำลังรับแรงดัดแบบ 3 จุด (Three-Points Bending test) โดยให้น้ำหนักกระทำที่กึ่งกลางตัวอย่างคานด้วยอัตรา 0.05 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ บันทึกค่าแรงกระทำและการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานด้วยความถี่ 5 เฮิรตซ์

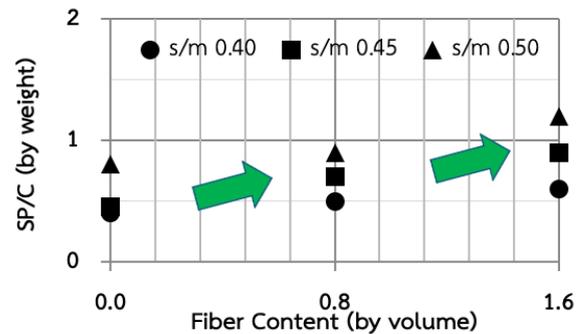
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากระเบียบวิธีวิจัยในหัวข้อที่ 2 สามารถนำผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดมาวิเคราะห์และอภิปรายได้ดังนี้

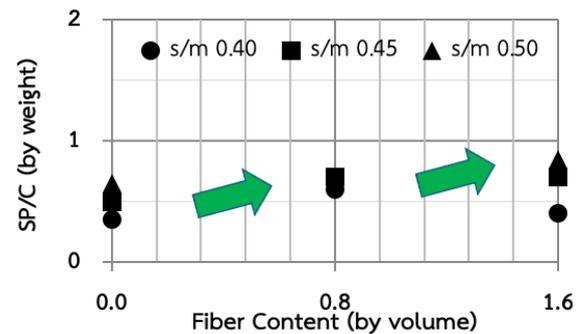
3.1 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยเหล็ก

มอร์ตาร์ทุกส่วนผสมถูกนำไปทดสอบค่าการไหลแผ่นก่อนนำไปเทเข้าอุปกรณ์และเก็บตัวอย่าง ทุกส่วนผสมต้องมีค่าการไหลแผ่นที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วง 550–650 มิลลิเมตร ซึ่งค่าการไหลแผ่นขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใยเหล็ก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และปริมาณสารลดน้ำพิเศษ โดยทุกส่วนต้องมีค่าการไหลแผ่นอยู่ในช่วงดังกล่าวจึงนำไปทดสอบขั้นตอนต่อไป รูปที่ 3 แสดงปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ทำให้แต่ละส่วนผสมมีค่าการไหลแผ่น 550–650 มิลลิเมตร เห็นได้ชัดเลยว่าส่วนผสมมีความต้องการสารลดน้ำพิเศษมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m) และปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของแข็งลงในส่วนผสมทำให้ขีดขวางการไหลของมอร์ตาร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษ อัตราส่วนสารลดน้ำพิเศษต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้อยู่ในช่วงร้อยละ 0.4–1.2 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

(W/C) 0.45 ต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษน้อยกว่า ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.35 เล็กน้อย เนื่องจากส่วนผสมมีความเหลวจากปริมาณน้ำที่มากกว่าจึงต้องการสารลดน้ำพิเศษน้อยกว่า



a) W/C 0.35



b) W/C 0.45

รูปที่ 3 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมสำหรับมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยเหล็ก

3.2 ผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยเหล็ก

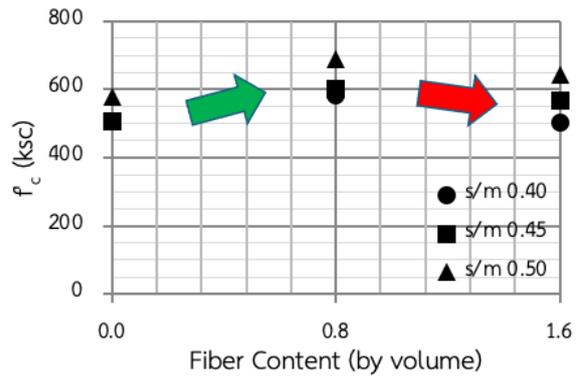
รูปที่ 4 แสดงกำลังรับแรงอัดของทุกส่วนผสมเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน แนวโน้มของกำลังรับแรงอัดเมื่อปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้นสำหรับส่วนผสมที่มี W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ไปในทางเดียวกันคือกำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.8 และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กเป็นร้อยละ 1.6 มอร์ตาร์ที่มี W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 และไม่เสริมเส้นใยเหล็กมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 550 และ 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กเป็นร้อยละ 0.8 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณ 550 เป็นประมาณ 640 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 16.3 จากกำลังอัดเดิม



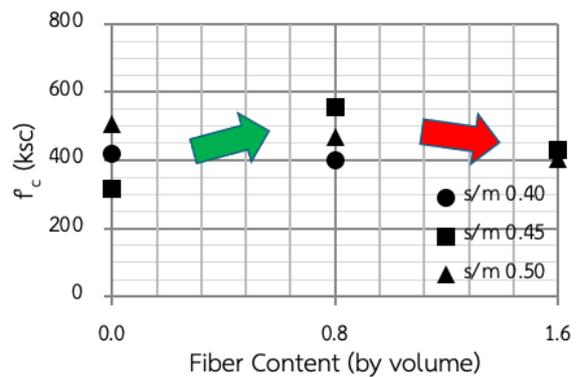
และมีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณ 400 เป็นประมาณ 470 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 17.5 จากกำลังอัดเดิม สำหรับมอร์ตาร์ที่มี W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ตามลำดับ เส้นใยเหล็กที่กระจายตัวในมอร์ตาร์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของมอร์ตาร์ ได้เป็นอย่างดี เมื่อตัวอย่างรับแรงอัดจนเกิดความเครียดภายในเส้นใยเหล็กสามารถยึดรั้งและช่วยลดความเครียดในช่วงแรกได้ดีซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [8-9] ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในทางตรงข้ามเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กเป็นร้อยละ 1.6 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัด มีค่าลดลงโดยลดลงจากประมาณ 640 เป็นประมาณ 580 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 9.3 จากกำลังอัดเดิม และมีค่าลดลงจากประมาณ 470 เป็นประมาณ 420 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 10.5 จากกำลังอัดเดิม สำหรับมอร์ตาร์ที่มี W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ตามลำดับ สาเหตุที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กจากร้อยละ 0.8 เป็นร้อยละ 1.6 คือปริมาณเส้นใยเหล็กมากเกินไปทำให้มีบางส่วนในมอร์ตาร์กระจุกไปด้วยเส้นใยเหล็ก ทำให้บริเวณดังกล่าวเป็นจุดอ่อนของมอร์ตาร์ ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อมีเส้นใยเหล็กมากเกินไป เนื่องจากการยึดเกาะกันระหว่างมอร์ตาร์และเส้นใยลดลง [9]

3.3 ผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็ก

การเสริมเส้นใยเหล็กในคอนกรีตช่วยให้ชิ้นส่วนโครงสร้างมีกำลังรับแรงดัดเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงดัดขึ้นอยู่กับมุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กที่สอดคล้องกับทิศทางการเทคอนกรีต และระนาบการวิบัติของตัวอย่าง จากผลการทดสอบพบว่ากำลังค่าสูงสุดเมื่อมุม θ_f มีค่า 30 และ 45 องศา แสดงดังรูปที่ 5 a), c), และ d) ยกเว้นกรณีมอร์ตาร์ที่มี W/C เท่ากับ 0.35 รับแรงดัดในภาพ



a) W/C 0.35



b) W/C 0.45

รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยเหล็กเมื่อมีปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้น

รวมพิจารณาทุกค่า s/m มี และปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 1.6 ดังรูปที่ 5 b) ซึ่งค่ามุม θ_f มีค่า 30 และ 45 องศา ไม่ได้ทำให้ตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุด ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าตัวอย่างดังกล่าวนี้อาจมีปัจจัยอื่นที่ทำให้เกิดผลเชิงลบต่อกำลังรับแรงดัด เช่น การกระจายตัวของเส้นใยบนระนาบวิบัติไม่ทั่วทั้งหน้าตัด เป็นต้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างที่ไม่เสริมเส้นใยเหล็กและตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.8 และ 1.6 เมื่อมีค่า θ_f เท่ากับ 0 องศาในกรอบเส้นประสีแดงพบว่ากำลังรับแรงดัดมีค่าใกล้เคียงกันมากหรือมีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยเหล็กประมาณร้อยละ 10 เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กมีส่วนสำคัญต่อกำลังรับแรงดัดชัดเจน ดังนั้นการเทมอร์ตาร์จำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อการทำงานของเส้นใยเสมอ พิจารณาแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดัด (ลูกศรเส้นทึบ) เมื่อ θ_f เพิ่มขึ้นจาก 0 30 และ 45 องศา พบว่ามีค่ามากขึ้นตามค่า θ_f ที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับ

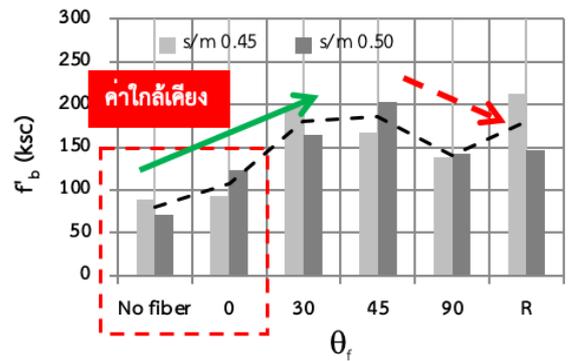


งานวิจัยในอดีต [9] ที่ให้เหตุผลว่าเมื่อค่า θ_f เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยเหล็กที่ผ่านระนาบวิบัติเพิ่มขึ้น เพราะมีลักษณะเป็นวงรีซึ่งมีพื้นที่มากกว่าพื้นที่หน้าตัดรูปวงกลม โดยกำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 50-70 เมื่อ θ_f เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 30-45 องศา จากนั้นเมื่อ θ_f มีค่า เท่ากับ 90 องศา พบว่าตัวอย่างมีกำลังรับแรงดัดลดลง ประมาณร้อยละ 20-30 เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีค่า θ_f เท่ากับ 30-45 องศา ประเด็นพิจารณาสุดท้ายคือการเพิ่มอัตรา โดยการตักมอร์ตาร์ลงแบบหล่อเพื่อให้การเรียงตัวของเส้นใย เป็นแบบสุ่ม (Random) พบว่ากำลังรับแรงดัดมีค่าไม่แน่นอน พิจารณาเส้นประสีแดงโดยมีค่าใกล้เคียงค่าสูงสุด (ตัวอย่างที่มี ค่า θ_f 30-45 องศา) ดังรูปที่ 5 b) และ d) ซึ่งเป็นกรณีที่ ตัวอย่างมีปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.6 และพบว่ากำลังรับแรง ดัดมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 20-30 เปรียบเทียบกับค่าสูงสุด เช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 5 a) และ c) ซึ่งเป็นกรณีที่มีตัวอย่างมี ปริมาณเส้นใยร้อยละ 0.8 สามารถอธิบายได้ว่าปริมาณเส้นใย เหล็กสูง (ร้อยละ 1.6) ร่วมกับการเรียงตัวแบบสุ่มอาจส่งผลต่อ กำลังรับแรงดัดสามารถเพิ่มหรือลดกำลังรับแรงดัดเนื่องจาก เกิดการขัดกันของเส้นใย อย่างไรก็ตามการเรียงตัวแบบสุ่มไม่ สามารถควบคุมทิศทางของเส้นใยเหล็กได้ จำเป็นต้องทดสอบ ตัวอย่างปริมาณมากเพื่อวิเคราะห์ผลทดสอบในเชิงสถิติร่วมกับ ตัวอย่างอีกประการหนึ่ง

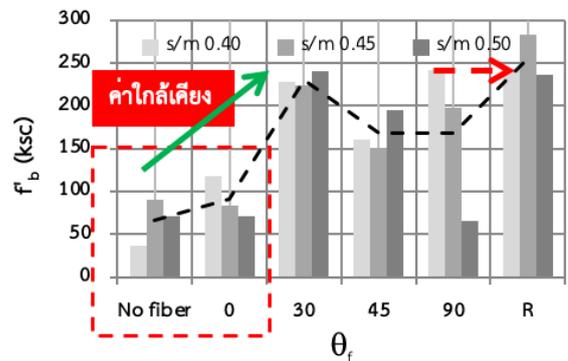
3.4 ผลทดสอบกำลังรับแรงดัดต่อจำนวนเส้นใยเหล็ก

ในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นถึงกำลังรับแรงดัดต่อเส้นใย 1 เส้น โดยคิดจากกำลังรับแรงดัดหารด้วยจำนวนเส้นใยในหน้า ตัด ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6 การเปรียบเทียบอัตราส่วนกำลัง รับแรงดัดต่อเส้นใยเหล็กที่นับได้ที่ระนาบวิบัติของตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 1.6 นั้น กำลังรับแรงดัดต่อเส้นใยเหล็กมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน เทียบกับตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.8

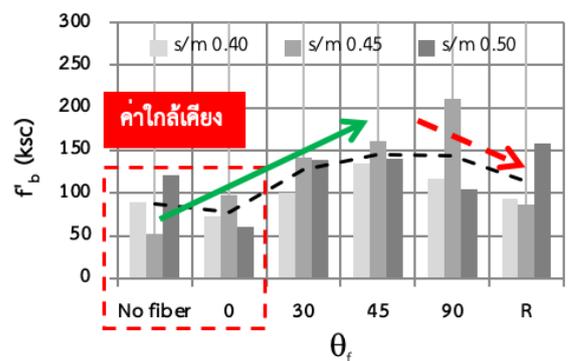
ทั้งในกรณี W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ทุกลักษณะการ เรียงตัวของเส้นใยเหล็ก เนื่องจากจำนวนเส้นใยเหล็กที่นับได้ บนระนาบวิบัติมีจำนวนมากขึ้นแต่กำลังแรงดัดที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนเส้นใย อัตราส่วนกำลังรับแรง ดัดต่อจำนวนเส้นใยของตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อย ละ 0.8 และ 1.6 มีค่าประมาณ 1.5 และ 1.1



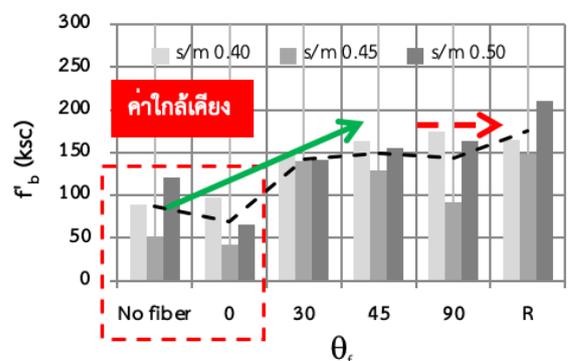
a) W/C 0.35, fiber 0.8%



b) W/C 0.35, fiber 1.6%



c) W/C 0.45, fiber 0.8%



d) W/C 0.45, fiber 1.6%

รูปที่ 5 กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเส้นใยเหล็ก



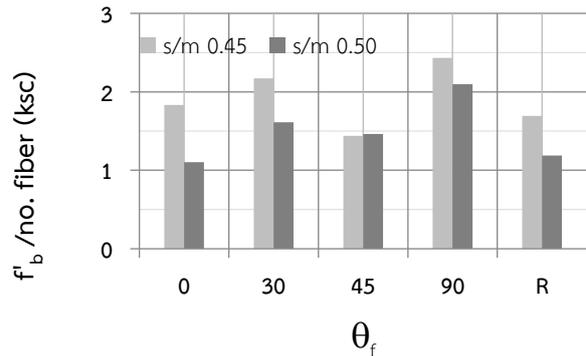
กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับชุดตัวอย่างที่มี W/C เท่ากับ 0.35 และอัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อจำนวนเส้นใยของตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.8 และ 1.6 มีค่าประมาณ 1.3 และ 0.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับชุดตัวอย่างที่มี W/C เท่ากับ 0.45 เนื่องจากมอร์ตาร์ที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.6 มีจำนวนเส้นใยอัดแน่นบนระนาบวิบัติส่งผลให้เส้นใยชิดกันมากเกินไปไม่มีมอร์ตาร์เพียงพอให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กและมอร์ตาร์จึงทำให้กำลังรับแรงดัดที่เส้นใยเหล็กสามารถรับได้ต่อเส้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าแม้การเพิ่มปริมาณเส้นใยสามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดัดได้แต่เมื่อพิจารณาในรายละเอียดแล้วพบว่าความคุ้มค่าของราคาเส้นใยเหล็กต่อกำลังที่เพิ่มขึ้นอาจไม่เหมาะสม วิศวกรควรพิจารณาสมบัติด้านกำลังของวัสดุและงบประมาณร่วมกันอย่างรอบคอบ

4. บทสรุป

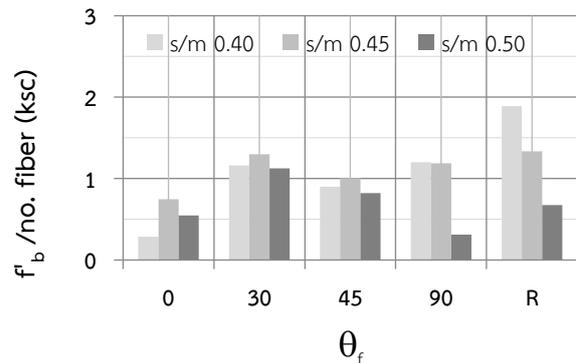
จากผลการวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถสรุปได้เป็นหัวข้อดังนี้

1. ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่จำเป็นสำหรับผลิตมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.4-1.2 และร้อยละ 0.3-0.8 เมื่อมอร์ตาร์มีค่า W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ตามลำดับ สามารถประหยัดสารลดน้ำพิเศษได้โดยการเพิ่มปริมาณน้ำแต่จำเป็นต้องพิจารณาสมบัติทางกลร่วมด้วย โดยปริมาณสารลดน้ำจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m) และปริมาณเส้นใยเหล็กเมื่อเพิ่มขึ้น ส่วนผสมมีความต้องการสารลดน้ำพิเศษมากขึ้น

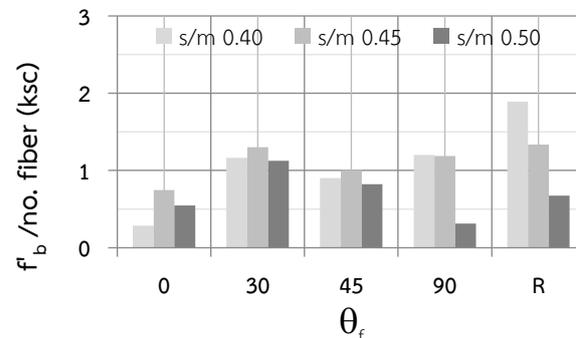
2. กำลังรับแรงอัดมีค่าสูงสุดประมาณ 640 และ 470 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเมื่อมอร์ตาร์มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 0.8% และมีค่า W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 10 เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 1.6 การเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กไม่สามารรถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ในงานวิจัยนี้



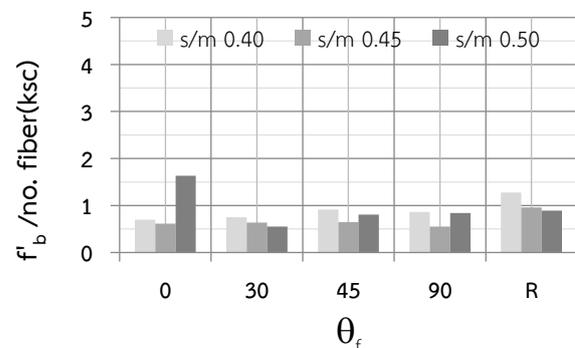
a) W/C 0.35, fiber 0.8%



b) W/C 0.35, fiber 1.6%



c) W/C 0.45, fiber 0.8%



d) W/C 0.45, fiber 1.6%

รูปที่ 6 อัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อเส้นใยเหล็กเมื่อมีการเรียงตัวต่างกัน



3. มุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กและระนาบการวิบัติมีผลต่อกำลังรับแรงดัดอย่างชัดเจน โดยมุม θ_f ที่ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญคือ 30 และ 45 องศา เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยเหล็กที่ระนาบวิบัติเป็นวงรีจึงมีพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น สำหรับตัวอย่างที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กในทุกปริมาณเส้นใย ผลวิจัยนี้อาจประยุกต์ได้สำหรับการผลิตคานคอนกรีตสำเร็จรูปโดยหล่อคอนกรีตตามที่ได้เสนอในงานวิจัยนี้และกดแบบหล่อคานที่ทำให้เกิดมุม θ_f เท่ากับ 30 และ 45 องศา ซึ่งจำเป็นต้องทำการวิจัยในโครงสร้างคานขนาดจริงต่อไป

4. การเรียงตัวแบบสุ่มของเส้นใยเหล็กส่งผลต่อกำลังรับแรงดัด บางชุดตัวอย่างทำให้ตัวอย่างมีกำลังรับแรงดัดสูงที่สุด บางชุดตัวอย่างมีกำลังรับแรงดัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่มีเส้นใยเหล็กเพียงเล็กน้อย การเทมอร์ตาร์ให้เส้นใยมีการเรียงตัวแบบสุ่มจำเป็นต้องศึกษาวิจัยเชิงปริมาณและวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อให้ผลการทดสอบสามารถประยุกต์ใช้จริงได้

5. เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กมากขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามจำนวนเส้นใยเหล็กบนระนาบวิบัติไม่ได้แปรผันตรงกับกำลังรับแรงดัดที่เพิ่มขึ้น หากเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กมากเกินไปทำให้เส้นใยอัดแน่นจนเกินไป มอร์ตาร์ไม่เพียงพอทำให้เส้นใยเกิดแรงยึดเหนี่ยวที่ดีทั้งยังสิ้นเปลืองอีกประการหนึ่ง งานวิจัยนี้ระบุปริมาณเส้นใยที่คุ้มค่าที่สุดคือร้อยละ 0.8 ต่อปริมาตรมอร์ตาร์

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท BASF (Thai) จำกัด ที่ได้สนับสนุนสารลดน้ำพิเศษที่จำเป็นสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชาที่สนับสนุนทุนวิจัยแบบบูรณาการประจำปีงบประมาณ 2563 ไว้ ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Larsen IL, Thorstensen RT. The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A Review. *Construction and Building Materials*. 2020 ; 30256:119459.
- [2] Wang X, Fan F, Lai J, Xie Y. Steel fiber reinforced concrete: A review of its material properties and usage in tunnel lining. *In Structures* 2021; 1 (34), 1080-1098.
- [3] Frazao C, Barros J, Bogas JA, Garcia-Cortes V, Valente T. Technical and environmental potentialities of recycled steel fiber reinforced concrete for structural applications. *Journal of Building Engineering*. 2022; 45:103579.
- [4] Qin X, Kaewunruen S. Environment-friendly recycled steel fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2022 ;327:126967.
- [5] Vairagade VS, Kene KS. Strength of normal concrete using metallic and synthetic fibers. *Procedia Engineering*. 2013;51:132-40.
- [6] Zheng Y, Wu X, He G, Shang Q, Xu J, Sun Y. Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete by vibratory mixing technology. *Advances in Civil Engineering*. 2018.
- [7] Sukontasukkul P, Chaisakulkiet U, Jamsawang P, Horpibulsuk S, Jaturapitakkul C, Chindapasirt P. Case investigation on application of steel fibers in roller compacted concrete pavement in Thailand. *Case Studies in Construction Materials*. 2019; 11:e00271.
- [8] Trabucchi I, Tiberti G, Conforti A, Medeghini F, Plizzari GA. Experimental study on Steel Fiber Reinforced Concrete and Reinforced Concrete elements under concentrated loads. *Construction and Building Materials*. 2021 ;307:124834.
- [9] Jongvivatsakul P, Attachaiyawuth A, Pansuk W. A crack-shear slip model of high-strength steel fiber-reinforced concrete based on a push-off test. *Construction and Building Materials*. 2016 ;126:924-35.
- [10] Smittakorn W, Prasertsri T, Pattharakorn W, Jongvivatsakul P. Shear performance of special dry joints for precast concrete segments. *ASEAN Engineering Journal*. 2021;11:60-72.



- [11] Sukontasukkul P, Jamnam S, Sappakittipakorn M, Banthia N. Preliminary study on bullet resistance of double-layer concrete panel made of rubberized and steel fiber reinforced concrete. *Materials and Structures*. 2014; 47(1-2):117-125.
- [12] Maho B, Sukontasukkul P, Jamnam S, Yamaguchi E, Fujikake K, Banthia N. Effect of rubber insertion on impact behavior of multilayer steel fiber reinforced concrete bulletproof panel. *Construction and Building Materials*. 2019; 216:476-84.
- [13] Okamura H, Ouchi M. Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003;1(1):5-15.
- [14] Ouchi M, Attachaiyawuth A. History and Development of High-Performance Concrete in Japan. *J. of Thailand Concrete Association*. 2015 ; 3(2):1-7.
- [15] Attachaiyawuth A, Rath S, Tanaka K, Ouchi M. Improvement of Self-Compactability of Air-Enhanced Self-Compacting Concrete with Fine Entrained Air. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2016;14(3):55-59. Available from: <https://doi.org/10.3151/jact.14.55>
- [16] Puthipad N, Ouchi M, Rath S, Attachaiyawuth A. Enhancement in self-compactability and stability in volume of entrained air in self-compacting concrete with high volume fly ash. *Construction and Building Materials*. 2016 ;128:349-60.
- [17] Ouchi M, Kameshima K, Attachaiyawuth A. Improvement in self-compacting properties of fresh concrete by eliminating large air bubbles using an antifoaming agent. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2017; 15(1):10-8.
- [18] Puthipad N, Ouchi M, Rath S, Attachaiyawuth A. Enhanced entrainment of fine air bubbles in self-compacting concrete with high volume of fly ash using defoaming agent for improved entrained air stability and higher aggregate content. *Construction and Building Materials*. 2017; 144:1-2.
- [19] Rath S, Ouchi M, Puthipad N, Attachaiyawuth A. Improving the stability of entrained air in self-compacting concrete by optimizing the mix viscosity and air entraining agent dosage. *Construction and Building Materials*. 2017 ;148:531-7.
- [20] Rath S, Puthipad N, Attachaiyawuth A, Ouchi M. Critical size of entrained air to stability of air volume in mortar of self-compacting concrete at fresh stage. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2017; 15(1):29-37.
- [21] Puthipad N, Ouchi M, Attachaiyawuth A. Effects of fly ash, mixing procedure and type of air-entraining agent on coalescence of entrained air bubbles in mortar of self-compacting concrete at fresh state. *Construction and Building Materials*. 2018; 180:437-44.
- [22] Falmata AM, Sulaiman A, Mohamed RN, Shettima AU. Mechanical properties of self-compacting high-performance concrete with fly ash and silica fume. *SN Applied Sciences*. 2020; 2:1-1.
- [23] Yanweerasak T, Kittikornjarus B, Pakwat P, Plongpan T, Attachaiyawuth A. Flowability, Viscosity and Internal Friction of Self-Compacting Mortar as Affected by Its Mix Proportions. *KMUTT Research & Development Journal*. 2021; 44(3):409-426. Thai.
- [24] Attachaiyawuth A, Puthipad N, Ouchi M. Effects of air-entraining agent, defoaming agent and mixing time on characteristic of entrained bubbles in air-enhanced self-compacting concrete mixed at concrete plant. *Engineering Journal*. 2022; 26(2):37-48.
- [25] Mahmood M, Hanoon AN, Abed HJ. Flexural behavior of self-compacting concrete beams strengthened with steel fiber reinforcement. *Journal of Building Engineering*. 2018; 16:228-37.



- [26] Devi GS, Prasad CV, Rao PS. Influence of mineral admixtures on structural behaviour of Quaternary Blended Self Compacting Concrete reinforced beams with addition of crimped steel fibers. *Materials Today: Proceedings*. 2022 ;57:2325-9.
- [27] aldeen Odaa S, Hason MM, Sharba AA. Self-compacting concrete beams reinforced with steel fiber under flexural loads: A ductility index evaluation. *Materials Today: Proceedings*. 2021 ; 42:2259-67.
- [28] Li N, Lu Y, Li S, Gao D. Axial compressive behaviour of steel fibre reinforced self-stressing and self-compacting concrete-filled steel tube columns. *Engineering Structures*. 2020 ;222:111108.
- [29] Zamri NF, Mohamed RN, Awalluddin D, Abdullah R. Experimental evaluation on punching shear resistance of steel fibre reinforced self-compacting concrete flat slabs. *Journal of Building Engineering*. 2022 ;15.52:104441.
- [30] Ramkumar KB, Rajkumar PK, Ahmmad SN, Jegan M. A review on performance of self-compacting concrete–use of mineral admixtures and steel fibres with artificial neural network application. *Construction and Building Materials*. 2020 ;261:120215.
- [31] Sanjeev J, Nitesh KS. Study on the effect of steel and glass fibers on fresh and hardened μ properties of vibrated concrete and self-compacting concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2020; 27:1559-68.
- [32] Magbool HM, Zeyad AM. The effect of various steel fibers and volcanic pumice powder on fracture characteristics of Self-Compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2021; 312:125444.
- [33] Saba AM, Khan AH, Akhtar MN, Khan NA, Kolor SS, Petrů M, Radwan N. Strength and flexural behavior of steel fiber and silica fume incorporated self-compacting concrete. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021 ;12:1380-90.
- [34] Alrawashdeh A, Eren O. Mechanical and physical characterisation of steel fibre reinforced self-compacting concrete: Different aspect ratios and volume fractions of fibres. *Results in Engineering*. 2022; 13:100335.
- [35] Kotwal S, Singh H, Kumar R. Experimental investigation of Steel Fibre reinforced Self Compacting Concrete (SCC) using recycled aggregates as partial replacement of coarse aggregates. *Materials Today: Proceedings*. 2022 ;48:1032-7.
- [36] Thailand Industrial Standard. Tis no. 15-1 Specifications for Portland Cement Type 1. 2012 Thai.
- [37] Astm C. 150, Standard specification for Portland cement. *Annual book of ASTM standards*. 2002;4:134-8.
- [38] ASTM A. A123/A123M-17, Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products.
- [39] bosfa.com [Internet]. Products dramix-5d-4d-3d [cited 2023 Feb 27]. Available from: https://bosfa.com/wpcontent/uploads/2017/08/3D_6535BG.pdf