



## ผลกระทบของมุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กและระนาบวิบัติต่อการกำลังรับแรงอัดและแรงดัดของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเอง

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

พลพันธ์ เศรษฐพิทยากุล<sup>1</sup> ทศพร ประเสริฐศรี<sup>2</sup> ชีระชัย เสริมการดี<sup>3</sup> ปวริศร์ วัฒนสุนทรศิลป์<sup>3</sup>

พีทชญา ชมภูพล<sup>3</sup> อนวัณณ์ อรรถไชยวุฒิ<sup>4</sup> และชัชฌพงษ์ สุธัมมะ<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตศรีราชา ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230

<sup>4</sup>กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230

<sup>5</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Ponpan Setpittayakul<sup>1</sup> Tosporn Prasertsri<sup>2</sup> Teeratan Sermkandee<sup>3</sup> Pavarit Vattanasoontronsil<sup>3</sup>

Peetchaya Chomphoophol<sup>3</sup> Anuwat Attachaiyawuth<sup>4</sup> and Chisanuphong Suthumma<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>The 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

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Pathumwan, Pathumwan, Bangkok 10330

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

<sup>4</sup>The 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

<sup>5</sup>Department 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 ( $\theta_f$ ) 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 แต่พบว่ามีการรับแรงอัดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กเป็นร้อยละ 1.6 มุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กและระนาบวิบัติ ( $\theta_f$ ) เท่ากับ 30 และ 45 องศา ส่งผลให้มีการรับแรงดัดเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 50-70 เมื่อเปรียบเทียบกับมุม 0 องศา อย่างไรก็ตามพบว่ากำลังรับแรงดัดลดลงจากค่าสูงสุดประมาณร้อยละ 20-30 เมื่อค่า  $\theta_f$  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 ( $\theta_f$ ) 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 ( $\theta_f$ ) 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 ( $\theta_f$ ) at 30° and 45° affected in an increase in flexural strength by an average of 50%-70% when compared to the  $\theta_f$  of 0°. However, it was found that the compressive strength decreased from the highest value by approximately 20%-30% with the  $\theta_f$  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] ในที่นี้สามารถพิจารณาได้ว่าการประยุกต์คอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยเหล็กถือเป็นแนวทางในการรวบรวมข้อดีของการใช้งานคอนกรีตสมรรถนะสูงร่วมกับการเพิ่มประสิทธิภาพการรับกำลังของโครงสร้าง

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

จากการทบทวนงานวิจัยในอดีตและพิจารณาช่องว่างในการวิจัยตามที่ได้กล่าวมา พบว่าการจัดเรียงทิศทางของเส้นใยเหล็กถือเป็นตัวแปรที่ยังไม่ได้รับการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลาย คณะผู้วิจัยจึงสนใจดำเนินการทดสอบเพื่อศึกษาผลของปริมาณเส้นใยเหล็กและทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กต่อกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของ

มอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเอง นอกจากนี้ ปริมาณการใช้ทรายและสารลดน้ำพิเศษจัดเป็นตัวแปรที่ได้รับการพิจารณาร่วมด้วย

## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการเตรียมมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยเหล็กประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ตามมาตรฐาน มอก. [36] และ ASTM C150-07 [37] มวลรวมละเอียดเลือกใช้ทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีความถ่วงจำเพาะและโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.62 และ 2.73 ตามลำดับ น้ำผสมมอร์ตาร์ใช้เป็นน้ำประปาทั่วไป รวมถึงมีการใช้สารลดน้ำแบบพอลิคาร์บอกซิเลตอีเทอร์ 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<br>น้ำต่อ<br>ปูนซีเมนต์<br>(W/C, %) | อัตราส่วน<br>ทรายต่อมอร์ตาร์<br>(s/m, %) | อัตราส่วน<br>เส้นใยเหล็ก<br>ต่อมอร์ตาร์<br>(f/m, %) | อัตราส่วนสาร<br>ลดน้ำพิเศษต่อ<br>ปูนซีเมนต์<br>(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                                                      |
|                                               | 50                                       | 0.0                                                 | 0.8                                                      |
|                                               |                                          | 0.8                                                 | 0.9                                                      |
|                                               |                                          | 1.6                                                 | 1.2                                                      |
| 45                                            | 40                                       | 0.0                                                 | 0.35                                                     |
|                                               |                                          | 0.8                                                 | 0.6                                                      |
|                                               |                                          | 1.6                                                 | 0.4                                                      |
|                                               | 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                                                     |

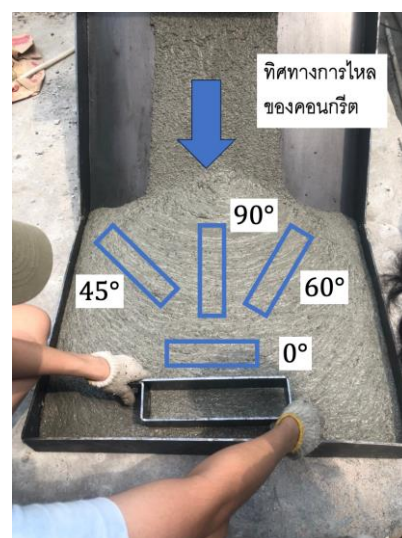
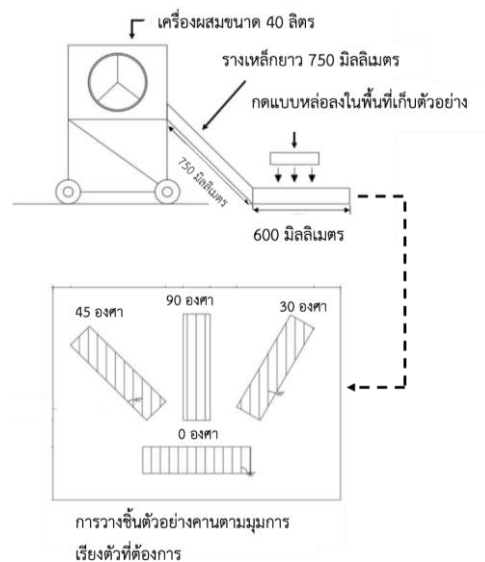
### 2.3 ขั้นตอนการผสมและเก็บตัวอย่างทดสอบมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็ก

ในการผสมมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กผสมตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 1 โดยใช้เครื่องผสมคอนกรีตแบบ Pan Mixer โดยมีการทดสอบการไหลของมอร์ตาร์ก่อนเก็บตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างทดสอบมี 2 รูปแบบคือ ตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ มีลักษณะทรงกระบอกขนาด 100x200 มิลลิเมตรและตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ใช้เป็นคนขนาด 75x75x300 มิลลิเมตร

สำหรับตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดัดดำเนินการโดยปล่อยมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กไหลจากเครื่องผสมลงบนรางลาดยาว 750 มิลลิเมตร เมื่อมอร์ตาร์ไหลลงสู่พื้นที่เก็บตัวอย่างด้านล่างจนได้ความหนา 75 มิลลิเมตรแล้วจึงทำการเก็บตัวอย่างคนโดยการนำแบบหล่อคนกดลงในพื้นที่เก็บ

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 มิลลิเมตรต่อวินาที จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ บันทึกค่าแรงกระทำและการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานด้วยความถี่ 5 เฮิรตซ์

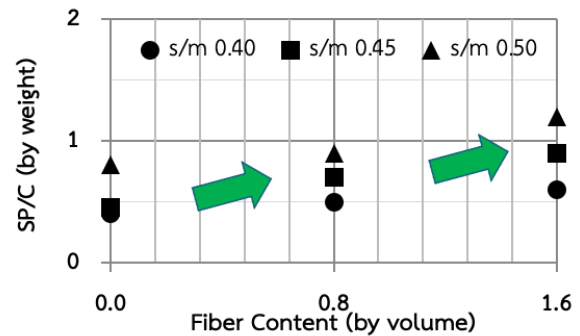
## 3.ผลการวิจัยและอภิปราย

จากระเบียบวิธีวิจัยในหัวข้อที่ 2 สามารถนำผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดมาวิเคราะห์และอภิปรายได้ดังนี้

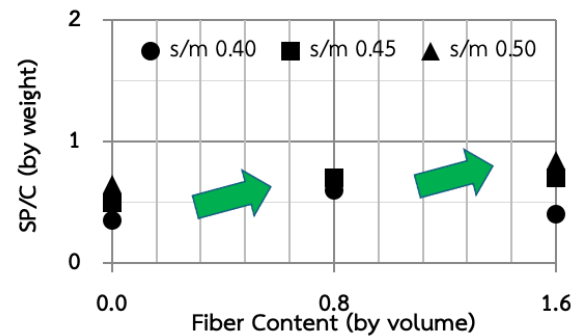
### 3.1 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยเหล็ก

มอร์ตาร์ทุกส่วนผสมถูกนำไปทดสอบค่าการไหลแผ่นก่อนนำไปเทเข้าอุปกรณ์และเก็บตัวอย่าง ทุกส่วนผสมต้องมีค่าการไหลแผ่นที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วง 550–650 มิลลิเมตร ซึ่งค่าการไหลแผ่นขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใยเหล็ก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และปริมาณสารลดน้ำพิเศษ โดยทุกส่วนต้องมีค่าการไหลแผ่นอยู่ในช่วงดังกล่าวจึงนำไปทดสอบขั้นตอนต่อไป รูปที่ 3 แสดงปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ทำให้แต่ละส่วนผสมมีค่าการไหลแผ่น 550–650 มิลลิเมตร เห็นได้ชัดเลยว่าส่วนผสมมีความต้องการสารลดน้ำพิเศษมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m) และปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของแข็งลงในส่วนผสมทำให้ขัดขวางการไหลของมอร์ตาร์ 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

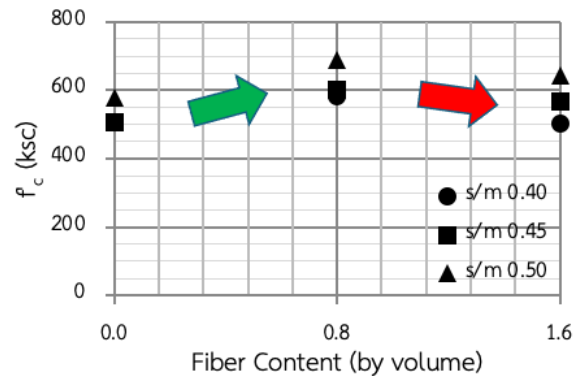




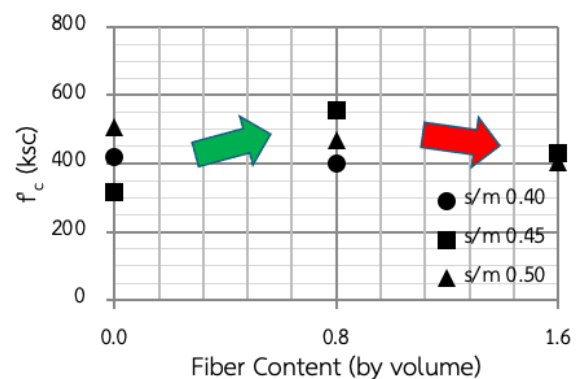
และมีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณ 400 เป็นประมาณ 470 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 17.5 จากกำลังอัดเดิม สำหรับมอร์ตาร์ที่มี W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ตามลำดับ เส้นใยเหล็กที่กระจายตัวในมอร์ตาร์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของมอร์ตาร์ ได้เป็นอย่างดี เมื่อตัวอย่างรับแรงอัดจนเกิดความเครียดภายในเส้นใยเหล็กสามารถยึดรั้งและช่วยลดความเครียดในช่วงแรกได้ดีซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [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 จากผลการทดสอบพบว่า กำลังค่าสูงสุดเมื่อมุม  $\theta_f$  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  $\theta_f$  มีค่า 30 และ 45 องศา ไม่ได้ทำให้ตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุด ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าตัวอย่างดังกล่าวนี้อาจมีปัจจัยอื่นที่ทำให้เกิดผลเชิงลบต่อกำลังรับแรงดัด เช่น การกระจายตัวของเส้นใยบนระนาบวิบัติไม่ทั่วทั้งหน้าตัด เป็นต้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างที่ไม่เสริมเส้นใยเหล็กและตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.8 และ 1.6 เมื่อมีค่า  $\theta_f$  เท่ากับ 0 องศาในกรอบเส้นประสีแดงพบว่ากำลังรับแรงดัดมีค่าใกล้เคียงกันมากหรือมีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยเหล็กประมาณร้อยละ 10 เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กมีส่วนสำคัญต่อกำลังรับแรงดัดชัดเจน ดังนั้นการเทมอร์ตาร์จำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อการทำงานของเส้นใยเสมอ พิจารณาแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดัด (ลูกศรเส้นทึบ) เมื่อ  $\theta_f$  เพิ่มขึ้นจาก 0 30 และ 45 องศา พบว่ามีค่ามากขึ้นตามค่า  $\theta_f$  ที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับ

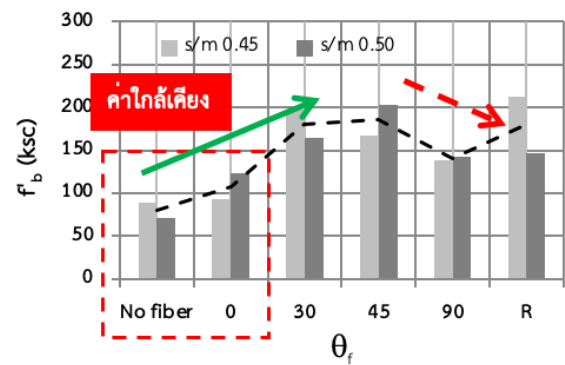


งานวิจัยในอดีต [9] ที่ให้เหตุผลว่าเมื่อค่า  $\theta_f$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยเหล็กที่ผ่านระนาบวิบัติเพิ่มขึ้น เพราะมีลักษณะเป็นวงรีซึ่งมีพื้นที่มากกว่าพื้นที่หน้าตัดรูปวงกลม โดยกำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 50-70 เมื่อ  $\theta_f$  เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 30-45 องศา จากนั้นเมื่อ  $\theta_f$  มีค่า เท่ากับ 90 องศา พบว่าตัวอย่างมีกำลังรับแรงดัดลดลงประมาณร้อยละ 20-30 เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีค่า  $\theta_f$  เท่ากับ 30-45 องศา ประเด็นพิจารณาสุดท้ายคือการเพิ่มอัตราโดยการดัดมุมลดแบบหล่อเพื่อให้การเรียงตัวของเส้นใยเป็นแบบสุ่ม (Random) พบว่ากำลังรับแรงดัดมีค่าไม่แน่นอน พิจารณาเส้นประสีแดงโดยมีค่าใกล้เคียงค่าสูงสุด (ตัวอย่างที่มีค่า  $\theta_f$  30-45 องศา) ดังรูปที่ 5 b) และ d) ซึ่งเป็นกรณีที่ตัวอย่างมีปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.6 และพบว่าการรับแรงดัดมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 20-30 เปรียบเทียบกับค่าสูงสุดเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 5 a) และ c) ซึ่งเป็นกรณีที่ตัวอย่างมีปริมาณเส้นใยร้อยละ 0.8 สามารถอธิบายได้ว่าปริมาณเส้นใยเหล็กสูง (ร้อยละ 1.6) ร่วมกับการเรียงตัวแบบสุ่มอาจส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดสามารถเพิ่มหรือลดกำลังรับแรงดัดเนื่องจากเกิดการขัดกันของเส้นใย อย่างไรก็ตามการเรียงตัวแบบสุ่มไม่สามารถควบคุมทิศทางของเส้นใยเหล็กได้ จำเป็นต้องทดสอบตัวอย่างปริมาณมากเพื่อวิเคราะห์ผลทดสอบในเชิงสถิติรวมด้วยอีกประการหนึ่ง

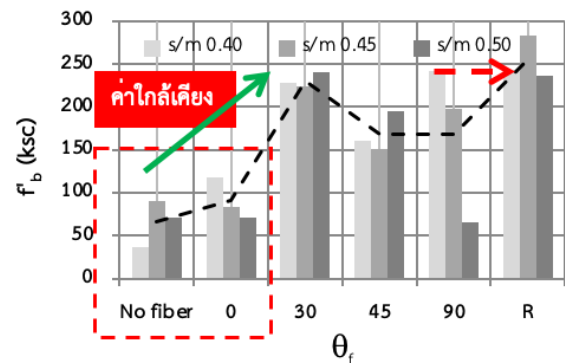
### 3.4 ผลทดสอบกำลังรับแรงดัดต่อจำนวนเส้นใยเหล็ก

ในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นถึงกำลังรับแรงดัดต่อเส้นใย 1 เส้น โดยคิดจากกำลังรับแรงดัดหารด้วยจำนวนเส้นใยในหน้าตัด ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6 การเปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อเส้นใยเหล็กที่นับได้ที่ระนาบวิบัติของตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 1.6 นั้น กำลังรับแรงดัดต่อเส้นใยเหล็กมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเทียบกับตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.8

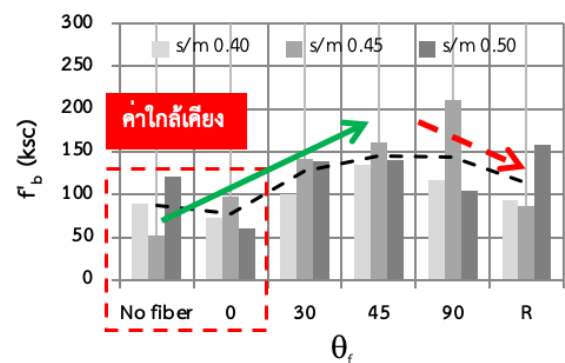
ทั้งในกรณี W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ทุกลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยเหล็ก เนื่องจากจำนวนเส้นใยเหล็กที่นับได้บนระนาบวิบัติมีจำนวนมากขึ้นแต่กำลังรับแรงดัดที่เพิ่มขึ้นไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนเส้นใย อัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อจำนวนเส้นใยของตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.8 และ 1.6 มีค่าประมาณ 1.5 และ 1.1



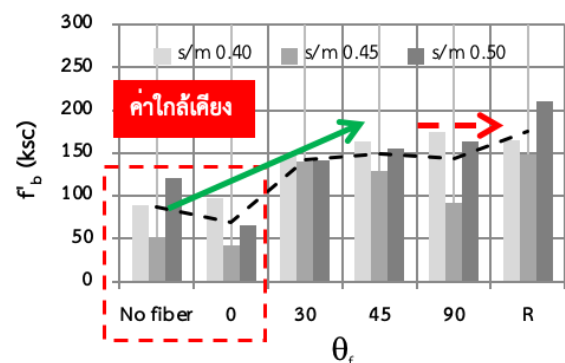
a) W/C 0.35, fiber 0.8%



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



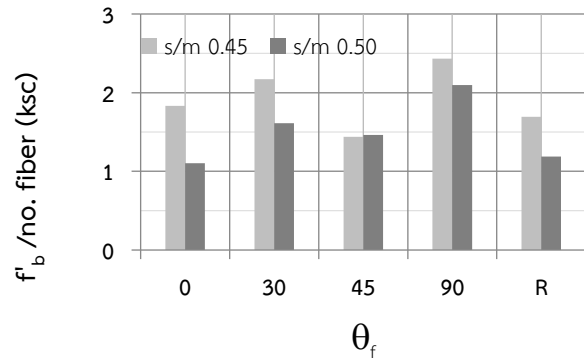
กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับชุดตัวอย่างที่มี W/C เท่ากับ 0.35 และอัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อจำนวนเส้นใยของตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเฉลี่ยร้อยละ 0.8 และ 1.6 มีค่าประมาณ 1.3 และ 0.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับชุดตัวอย่างที่มี W/C เท่ากับ 0.45 เนื่องจากมอร์ตาร์ที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ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

#### 4. บทสรุป

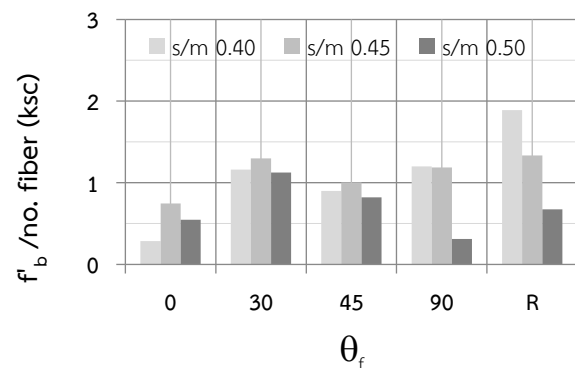
จากผลการวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถสรุปได้เป็นหัวข้อดังนี้

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

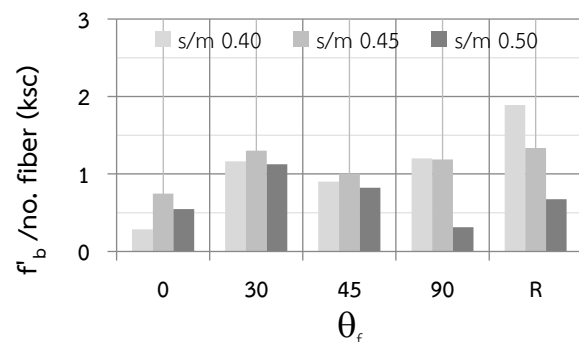
2. กำลังรับแรงอัดมีค่าสูงสุดประมาณ 640 และ 470 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเมื่อมอร์ตาร์มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 0.8% และมีค่า W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 10 เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 1.6 การเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กไม่สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ในงานวิจัยนี้



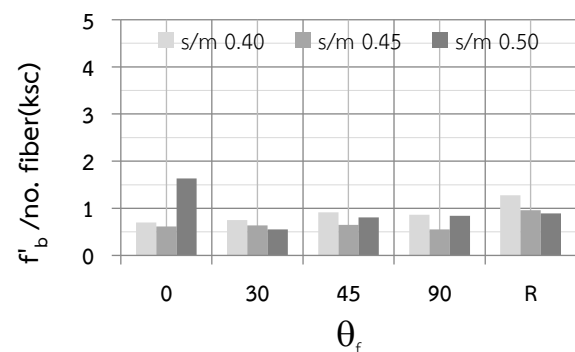
a) W/C 0.35, fiber 0.8%



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  $\theta_f$  ที่ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญคือ 30 และ 45 องศา เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยเหล็กที่ระนาบวิบัติเป็นวงรีจึงมีพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น สำหรับตัวอย่างที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กในทุกปริมาณเส้นใย ผลวิจัยนี้อาจประยุกต์ได้สำหรับการผลิตคานคอนกรีตสำเร็จรูปโดยหล่อคอนกรีตตามที่ได้เสนอในงานวิจัยนี้และทดแบบหล่อคานที่ทำให้เกิดมุม  $\theta_f$  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] Mahmod 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 & 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, Koloor 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](https://bosfa.com/wpcontent/uploads/2017/08/3D_6535BG.pdf)