วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 31, ฉบับที่ 4 ต.ค.–ธ.ค. 2564
The Journal of KMUTNB., Vol. 31, No. 4, Oct.–Dec. 2021

บทความวิจัย

คุณสมบัติเชิงกลและต้นทุนด้านวัสดุของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กที่มีค่ากำลังรับแรงดึงต่างกัน

สุริยาวรรณ คงตัน* และ ปิติ สุคนธสุขกุล
ศูนย์วิจัยวัสดุอาคารและการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
วิสูตร จิระดำเกิง
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 4484 0182 อีเมล: s5701081616304@email.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.028
รับเมื่อ 1 มิถุนายน 2563 แก้ไขเมื่อ 29 มิถุนายน 2563 ตอบรับเมื่อ 2 กรกฎาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 25 พฤษภาคม 2564
© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลและต้นทุนด้านวัสดุของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กที่มีค่ากำลังรับแรงดึงและสัดส่วนผสมที่แตกต่างกัน โดยไฟเบอร์ที่นำมาใช้ประกอบด้วยเส้นใยเหล็ก 3 ชนิด ที่มีค่ากำลังรับแรงดึง 1,225, 1,800 และ 2,300 เมกกะปาสคาล โดยนำผสมกับคอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัด 28, 35 และ 60 เมกกะปาสคาล ในสัดส่วนผสมของเส้นใยที่ 30, 40 และ 50 กก./ลบ.ม. จากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน นำค่าที่ได้มาศึกษาผลกระทบของปริมาณและชนิดของเส้นใยต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยในคอนกรีตที่มีกำลังอัดพื้นฐานต่างกัน จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เชิงต้นทุนด้านวัสดุที่นำไปสู่การเลือกชนิดและปริมาณของเส้นใยที่เหมาะสมเพื่อให้กำลังรับแรงอัดตามที่ต้องการในราคาที่เหมาะสม

คำสำคัญ: คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย กำลังรับแรงดึงของเส้นใย การวิเคราะห์ทางต้นทุนวัสดุ

การอ้างอิงบทความ: สุริยาวรรณ คงตัน, ปิติ สุคนธสุขกุล และ วิสูตร จิระดำเกิง, "คุณสมบัติเชิงกลและต้นทุนด้านวัสดุของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กที่มีค่ากำลังรับแรงดึงต่างกัน," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 31, ฉบับที่ 4, หน้า 700–710, ต.ค.–ธ.ค. 2564.

Research Article

Mechanical Properties and Material Cost of Concrete Reinforced with Steel Fibers with Different Tensile Strengths

Suriyawan Kongtun* and Piti Sukontasukkul
Construction and Building Materials Research Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand
Wisoot Jiradamkerng
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rangsit University, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 4484 0182, E–mail: s5701081616304@email.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.028
Received 1 June 2020; Revised 29 June 2020; Accepted 2 July 2020; Published online: 25 May 2021
© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aimed to investigate and compare the mechanical properties and material cost of concrete reinforced with steel fibers of different tensile strengths at different proportions. Three types of fibers with different tensile strengths of 1,225, 1,800 and 2,300 MPa were mixed with concrete at three different proportions 30, 40, and 50 kg/m^3. Three types of concrete of the compressive strength of 28, 35 and 60 MPa were used. The specimens were tested for the compressive strength at the age of 28 days. The obtained results were analyzed based on the effect of fiber types and contents on the obtained compressive strength of SFRC cast with concrete with different based strength. The economic analysis provided the outlook of how to reduce the material cost by selecting an appropriate type and content of fiber to obtain the required compressive strength at the optimum material cost.

Keywords: Steel Fiber Reinforced Concrete, Compressive Strength of SFRC, Tensile Strength of Fiber, Economic Analysis, Material Cost

Please cite this article as: S. Kongtun, P. Sukontasukkul, and W. Jiradamkerng, "Mechanical properties and material cost of concrete reinforced with steel fibers with different tensile strengths," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 4, pp. 700–710, Oct.–Dec. 2021 (in Thai).

1. บทนำ

วัสดุคอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมแพร่หลาย เนื่องจากมีกำลังรับแรงอัดที่ดี แต่มีข้อด้อยคือ วัสดุที่มีความเปราะ (Brittle Material) มีคุณสมบัติในด้านการรับแรงดึงที่ต่ำโดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 10% ของกำลังรับแรงอัด [1] การที่จะทำให้คอนกรีตมีความเหนียว (Ductility) นั้น จำเป็นต้องใส่วัสดุเสริมกำลังเข้าไปในเนื้อคอนกรีต เช่น เหล็กเสริมหรือเส้นใยเหล็ก ปัจจุบันการผสมเส้นใยถือว่าเป็นวัสดุที่นิยมนำมาผสมลงในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติข้อด้อยดังกล่าว [2]–[4] ในปัจจุบันคอนกรีตผสมเส้นใยถูกนำไปใช้งานผลิตชิ้นส่วนอุโมงค์ ผิวทาง พื้นโรงงานและโครงสร้างสำเร็จรูป

หน้าที่หลักของเส้นใยขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตคือ การทำหน้าที่ยึดรั้งรอยแตกร้าวให้การเปิดหรือการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของรอยร้าวเป็นไปได้อย่างช้า และยากขึ้น โดยเมื่อคอนกรีตได้รับแรงกระทำจนกระทั่งเกิดการแตกร้าว ถ้าเป็นคอนกรีตธรรมดาที่ไม่มีส่วนผสมของเส้นใยด้วยการเป็นวัสดุเปราะการแตกร้าวนี้จึงนำไปสู่การวิบัติในระยะเวลาอันรวดเร็ว ในกรณีที่มีการผสมเส้นใยทันทีที่คอนกรีตแตกร้าวเส้นใยเล็กๆ จำนวนมากจะเริ่มทำหน้าที่ยึดรั้งรอยร้าวนี้ไม่ให้ขยายตัวออกได้โดยง่ายหรือในบางกรณีอาจทำให้รอยร้าวนั้นหยุดลง (Crack Arrest) นำไปสู่การเกิดของรอยร้าวใหม่ (Crack Branching) ซึ่งการทำให้เกิดรอยร้าวใหม่จำเป็นต้องมีการใส่พลังงานหรือแรงกระทำเพิ่มเข้าไปในวัสดุ ดังนั้น ถ้าพิจารณาการวิบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยเทียบกับคอนกรีตธรรมดาจึงพบว่า จำนวนรอยร้าวของคอนกรีตเสริมเส้นใยมีมากกว่าคอนกรีตธรรมดา จำนวนรอยร้าวเล็กๆ จำนวนมาก แสดงให้เห็นถึงระดับพลังงานหรือแรงกระทำที่มากกว่าที่ใช้ในการทำให้คอนกรีตเสริมผสมใยเกิดการวิบัติ

เทคโนโลยีของเส้นใยในปัจจุบัน ทำให้เส้นใยสามารถได้รับการออกแบบให้รูปทรงมีความโค้งหรือหยัก เพื่อให้ช่วยในเรื่องของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวสัมผัส (Interfacial Bond Strength) ของเส้นใยกับเนื้อคอนกรีตให้มากขึ้น ในทางด้านเชิงกลนั้นแบ่งแรงกระทำได้ 2 ส่วน คือ แรงเสียดทาน (Friction Force) และแรงยึดเหนี่ยวปลาย (Anchorage Force) ยกตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น

Pajak และ Ponikiewski [5] ศึกษาพฤติกรรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายผสมเส้นใยเหล็กโดยเส้นใยเหล็กที่ใช้มี 2 ชนิด คือ แบบตรง (Straight) และแบบงอปลาย (Hooked End) โดยทำการแปรผันปริมาณการใช้เส้นใยเหล็กที่ 0%, 0.5%, 1.0% และ 1.5% โดยปริมาตร โดยผลการทดสอบพบว่า การผสมเส้นใยเหล็กมีผลต่อการรับกำลังดัดอย่างมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ผสมเส้นใย การเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดัดสูงขึ้น โดยพบว่า เส้นใยเหล็กแบบงอปลายมีประสิทธิภาพในการรับแรงดัดได้ดีกว่าเส้นใยเหล็กแบบตรง

Holschemacher และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กกำลังสูง High Strength Steel Fibre Reinforced Concrete; HSSFRC) ที่ใส่และไม่ใส่เหล็กเสริมในคอนกรีต โดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของเส้นใยต่างชนิดกันที่มีต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังและการเปลี่ยนแปลงขนาดที่ลดลง โดยเส้นใยที่ใช้มีความแตกต่างกันในด้านของรูปร่างและกำลังรับแรงดึง โดยเส้นใย F1 และ F2 เป็นแบบงอปลาย มีกำลังรับแรงดึง 1,100 และ 1,900 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ ส่วนเส้นใย F3 เป็นเส้นหยักที่มีกำลังรับแรงดึง 1,100 เมกกะปาสคาล ในงานวิจัยนี้มีสัดส่วนผสมเส้นใยเท่ากับ 20, 40 และ 60 กก./ลบ.ม. ผลทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัด (Compression Strength) และกำลังรับแรงดึง (Splitting Strength) เพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็ก โดยกำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของเส้นใยชนิด F1 สูงกว่าเส้นใยชนิดอื่นๆ และตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กชนิด F3 มีกำลังรับแรงดึงต่ำที่สุด ในส่วนของแรงดัดพบว่า การรับแรงกระทำหลังการแตกร้าวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใย อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณเส้นใยจาก 20 ไปเป็น 60 กก./ลบ.ม. ไม่ได้ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่า (ไม่ได้มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง) ในกรณีกำลังรับแรงดึงของเส้นใยพบว่าตัวอย่างที่ผสมเส้นใยกำลังสูง (F2) มีพฤติกรรมเป็นวัสดุเหนียวและสามารถรับแรงหลังการแตกร้าวได้มากกว่าเส้นใยที่กำลังรับแรงดึงต่ำกว่า (F1)

Yoo และคณะ [7] ศึกษาผลกระทบของชนิดเส้นใย และกำลังของคอนกรีตเมทริกต่อพฤติกรรมแรงดึงออกของเส้นใย (Pull-out) ในคอนกรีตกำลังสูง (High Performance Fiber-reinforced Cementitious Composites; HPFRCC) ซึ่งได้ใช้เส้นใยแตกต่างกัน 2 ชนิด คือเส้นใยแบบตรงและแบบปลายงอ และแปรผันกำลังของคอนกรีตที่ 112.2, 152.5 และ 190.2 เมกกะปาสคาล ซึ่งผลการทดลองพบว่า กำลังยึดเกาะ ความเค้นของเส้นใย และพลังงาน เพิ่มขึ้นตามความแข็งแรงของเมทริกซ์หรือเพิ่มขึ้นตามความแข็งแรงของคอนกรีตโดยไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย เนื่องจากเมื่อความแข็งแรงของเมทริกซ์เพิ่มขึ้น ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์จะมีความหนาแน่น การอัดแน่นของวัสดุมวลรวมช่วยทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอีกทั้งยังทำให้รูพรุนรอบๆ ผิวสัมผัสลดลง ในกรณีของรูปร่างเส้นใยพบว่าเส้นใยชนิดปลายงอสามารถต้านทานแรงดึงออกได้มากกว่าชนิดตรง เนื่องจากเส้นใยชนิดปลายงอมีความเค้นและความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัส (บริเวณปลายที่งอ) มากกว่าเส้นใยแบบตรง

งานวิจัยนี้เป็นงานที่เกี่ยวข้องกับภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากการใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยในปัจจุบันมีการขยายตัวในวงกว้างออกไปในกลุ่มงานประเภทพื้นโรงงานหรือพื้นอาคารสินค้าขนาดใหญ่ ซึ่งประโยชน์ของการเส้นใยมาผสมคอนกรีตประกอบด้วย การเพิ่มกำลังรับแรง ลดการแตกร้าว ลดการใช้เหล็กเสริมบางส่วน และช่วยลดระยะเวลาในการก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม ด้วยเทคโนโลยีการผลิตเส้นใยเหล็กที่ทันสมัย ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เส้นใยเหล็กเป็นจำนวนมากที่มีค่ากำลังแตกต่างกัน ถึงแม้จะมีรูปร่างเหมือนกัน ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตแตกต่างกันออกไปทั้งในเชิงกลและเชิงกายภาพ รวมถึงความเหมาะสมเข้ากันกับกำลังของคอนกรีตของประเทศไทย โดยการใช้เส้นใยเหล็กที่มีกำลังรับแรงดึงสูง อาจนำไปสู่การใช้ปริมาณเส้นใยต่อปริมาตรของคอนกรีตที่ลดลงและทำให้ต้นทุนการก่อสร้างลดลงได้ โดยไม่ทำให้คุณสมบัติด้านอื่นลดลง

โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อเป็นการศึกษาและเปรียบเทียบถึงคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพของเส้นใยไฟเบอร์ชนิดรับกำลังสูงชนิด 1,225, 1,800 และ 2,300 เมกกะปาสคาล ในรูปของกำลังรับแรงอัด เพื่อนำมาปรับใช้ให้เหมาะสมกับคอนกรีตผสมเส้นใยให้เกิดประสิทธิภาพการใช้งานสูงที่สุด โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กที่ผสมในคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ในท้องตลาด (ที่กำลังรับแรงอัด 28, 45 และ 60 เมกกะปาสคาล) และคาดหวังว่า เส้นใยกำลังสูงที่นำมาใช้อาจนำไปสู่การลดปริมาณของเส้นใยต่อปริมาตรลงได้ (ในสมรรถนะเชิงกลที่เท่ากัน) ซึ่งก็จะทำให้ต้นทุนด้านวัสดุของคอนกรีตเสริมเส้นใยลดลง และหากพิสูจน์ได้ว่าคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กกำลังสูงมีค่าสูงกว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กปกติที่สัดส่วนผสมเดียวกัน ก็ถือว่าเป็นการเพิ่มประสิทธิของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กขึ้นมา

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C 150
- เส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) ชนิดของเส้นใยที่เลือกใช้ในการวิจัยนี้ประกอบไปด้วยเส้นใย 3 ชนิด ซึ่งมีคุณลักษณะและคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 1
- มวลรวมละเอียด มีขนาดคละผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้างตะแกรงเบอร์ 16 มีคุณสมบัติดังตารางที่ 2
- มวลรวมหยาบ ขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 25 มิลลิเมตร หรือ 1 นิ้ว ดังแสดงในตารางที่ 3
- สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixtures) ชนิดสารลดน้ำปริมาณสูง (Superplasticizer) Type F

2.2 สัดส่วนผสมคอนกรีต

สัดส่วนผสมคอนกรีตในงานวิจัย ได้ทำการออกแบบเพื่อให้กำลังรับแรงอัดควบคุม 3 ค่า คือ 28 (C28), 45 (C45) และ 60 (C60) เมกกะปาสคาล โดยมีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.57, 0.38 และ 0.30 ตามลำดับ และมีอัตราส่วนผสมของเส้นใยที่ 30, 40 และ 50 กก./ลบ.ม. โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก

Type	F1	F2	F3
shape			
	Single Hooked End	Single Hooked End	Double Hooked End
Diameter (mm)	0.75	0.62	0.90
Length (mm)	60	60	60
Aspect ratio	80	95	65
Tensile strength (MPa)	1225	1800	2300

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของมวลรวมละเอียด

Properties	
Absolute Specific Gravity	2.52
Bulk Specific Gravity (SSD Basis)	2.56
Apparent Specific Gravity	2.62
Fineness Modulus	2.63
Percent Absorption	0.91%

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของมวลรวมหยาบ

Properties	
Absolute Specific Gravity	2.72
Bulk Specific Gravity (SSD Basis)	2.71
Apparent Specific Gravity	2.73
Percent Absorption	0.39%

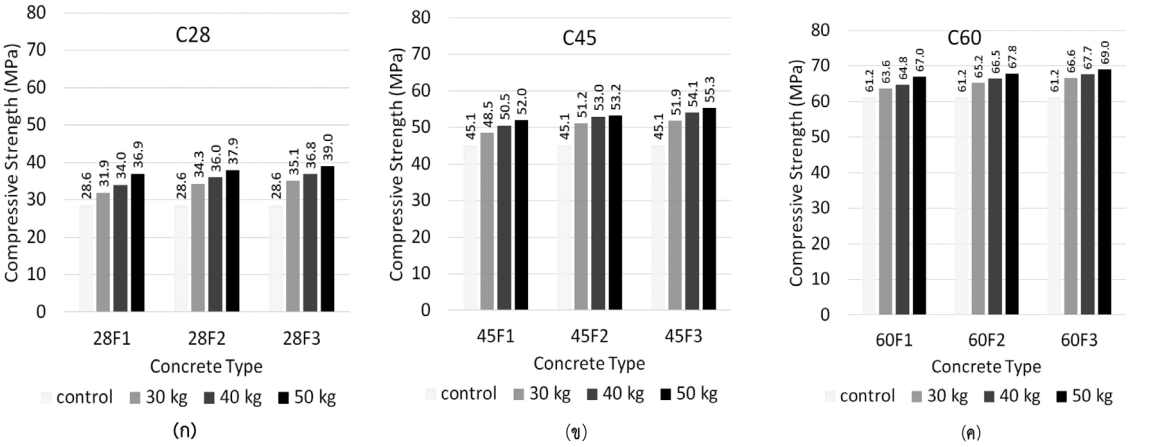
2.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใยประกอบด้วย 1) ชั่งส่วนผสมตามตารางที่ 4 2) ผสมแห้งปูนและทรายให้เข้ากันเป็นระยะเวลา 1 นาที 3) เติมน้ำและผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน 4) ผสมเส้นใยเหล็กลงไปตามสัดส่วนผสม โดยทำการโรยเส้นใยให้กระจายทั่วคอนกรีตไม่ให้จับกลุ่ม

ตารางที่ 4 สัดส่วนผสมคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

Designation	Mix Proportions (kg/m^3)				
	Cement	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate	Fiber
C28/control	350	180	804	1005	0
C28/30F1	350	180	804	1005	30
C28/40F1	350	180	804	1005	40
C28/50F1	350	180	804	1005	50
C28/30F2	350	180	804	1005	30
C28/40F2	350	180	804	1005	40
C28/50F2	350	180	804	1005	50
C28/30F3	350	180	804	1005	30
C28/40F3	350	180	804	1005	40
C28/50F3	350	180	804	1005	50
C45/control	413	157	669	1010	0
C45/30F1	413	157	669	1010	30
C45/40F1	413	157	669	1010	40
C45/50F1	413	157	669	1010	50
C45/30F2	413	157	669	1010	30
C45/40F2	413	157	669	1010	40
C45/50F2	413	157	669	1010	50
C45/30F3	413	157	669	1010	30
C45/40F3	413	157	669	1010	40
C45/50F3	413	157	669	1010	50
C60/control	525	160	1040	790	0
C60/30F1	525	160	1040	790	30
C60/40F1	525	160	1040	790	40
C60/50F1	525	160	1040	790	50
C60/30F2	525	160	1040	790	30
C60/40F2	525	160	1040	790	40
C60/50F2	525	160	1040	790	50
C60/30F3	525	160	1040	790	30
C60/40F3	525	160	1040	790	40
C60/50F3	525	160	1040	790	50

หมายเหตุ: 1) Ca/bFc เมื่อ a = กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (MPa), b = ปริมาณเส้นใยเหล็กต่อ 1 ลบ.ม. (kg) และ c = ชนิดของเส้นใยเหล็ก (kg)
2) ที่กำลังคอนกรีต 60 MPa มีการผสมสารลดน้ำประเภท F ในสัดส่วน 5.5 ลิตร ต่อ 1 ลบ.ม.



รูปที่ 1 ผลกระทบของชนิดเส้นใยต่อกำลังของคอนกรีตเสริมเส้นใยชนิดเดียวกันในคอนกรีตประเภทกำลัง (ก) C28 (ข) C45 และ (ค) C60

เป็นก้อน ทำการผสมต่อเนื่องประมาณ 2 นาที ตามด้วยใส่หินลงไปผสมจนเป็นคอนกรีตเนื้อเดียวกันที่ระยะเวลา 1 นาที 5) นำคอนกรีตสดที่ได้เทเข้าแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร โดยแบ่งเป็น 3 ชั้นเท่ากัน แต่ละชั้นตำด้วยเหล็กกระทุ้งจำนวน 25 ครั้งต่อชั้น นำไปสั่นไล่ฟองอากาศบนโต๊ะสั่นและปาดผิวหน้าให้เรียบ 6) ทิ้งให้คอนกรีตแข็งตัวที่ 24 ชั่วโมง จากนั้นแกะออกจากแบบทดสอบ และ 7) นำตัวอย่างทดสอบไปทำการบ่มตัวอย่างทดสอบในน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน

2.4 การทดสอบ

2.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน ดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ 1500 kN-Universal Testing Machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM C39 โดยคำนวณค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f_c') ตามสมการที่ (1)

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (1)$$

โดยที่ P คือ แรงกระทำสูงสุด (N) และ A คือ พื้นที่หน้าตัดรับแรง (mm^2)

2.4.2 การวิเคราะห์ด้านต้นทุนวัสดุ

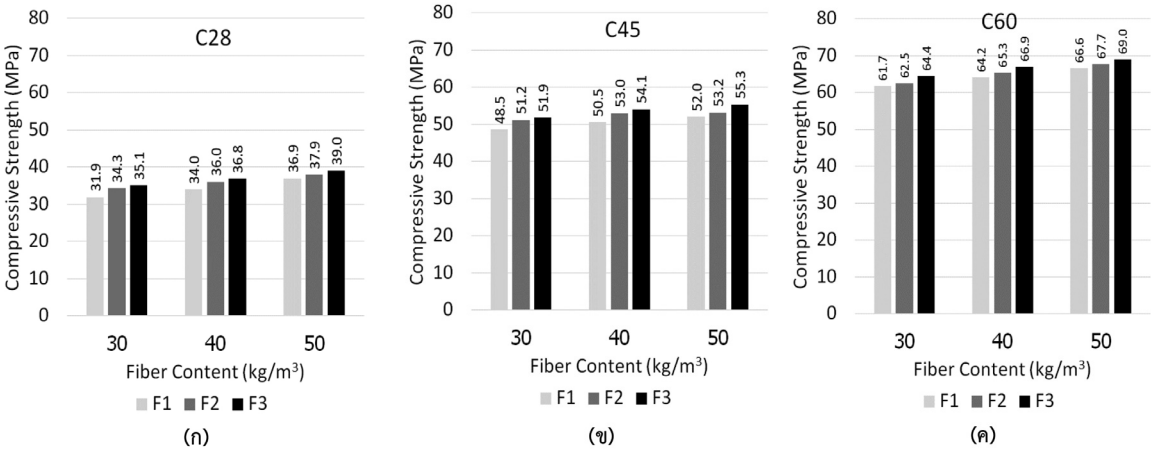
นำผลการทดลองที่ได้สำหรับคอนกรีตเสริมเส้นใยแต่ละชนิดไปหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณเส้นใยของเส้นใยแต่ละชนิด จากนั้นจึงนำราคาต่อหน่วยของเส้นใยแต่ละชนิดไปใช้ประกอบการคำนวณต้นทุนของคอนกรีตเสริมเส้นใยแต่ละชนิดที่สัดส่วนผสมต่างกันเพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดต่างกัน จากนั้นจึงเปรียบเทียบต้นทุนราคาวัสดุของคอนกรีตเสริมเส้นใยแต่ละชนิดตามค่ากำลังรับแรงอัดที่ต้องการ

3. ผลการทดลอง

3.1 กำลังรับแรงอัด

3.1.1 ผลกระทบของปริมาณเส้นใยต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย

รูปที่ 1 (ก) – (ค) แสดงผลกระทบของปริมาณเส้นใยต่อคอนกรีตประเภทกำลัง C28, C45 และ C60 โดยรวมพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างรูปที่ 1 ผลการทดสอบในคอนกรีตที่ 28 เมกกะปาสคาล พบว่า เมื่อผสมคอนกรีตด้วยปริมาณเส้นใย 30, 40 และ 50 กก./ม.^{3} ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตไม่ผสมเส้นใยโดยสำหรับเส้นใย F1 เพิ่มขึ้น เป็น 31.9,



รูปที่ 2 ผลกระทบของปริมาณเส้นใยต่อกำลังของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่สัดส่วนผสมเดียวกันในคอนกรีตประเภทกำลัง (ก) C28 (ข) C45 และ (ค) C60

34.0 และ 36.9 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ เส้นใย F2 การเพิ่มขึ้นเป็น 34.3, 36.0 และ 37.9 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ และเส้นใย F3 การเพิ่มขึ้นคิดเป็น 35.1, 36.8 และ 39.0 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่ากำลังของคอนกรีตพื้นฐานที่ 28.6 เมกกะปาสคาล [รูปที่ 1 (ก)]

ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันในคอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 45 และ 60 เมกกะปาสคาล [รูปที่ 1 (ข) และ (ค)] เนื่องจากเส้นใยเหล็กมีส่วนสำคัญในการช่วยยึดรั้งรอยร้าวของคอนกรีตในขณะที่ได้รับแรงกระทำ และช่วยชะลอการแตกร้าว ทำให้คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กสามารถรับแรงอัดได้เพิ่มมากขึ้นในสัดส่วนต่างกัน นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยเท่ากับเป็นการเพิ่มจำนวนเส้นใยในเนื้อคอนกรีต ทำให้โอกาสของเส้นใยในการเข้าไปยึดรั้งรอยร้าวที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆ สูงขึ้น

3.1.2 ผลกระทบของปริมาณเส้นใยต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย

รูปที่ 2(ก)–(ค) แสดงผลกระทบของชนิดของเส้นใยเหล็กต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยในสัดส่วนผสมเดียวกัน โดยผลการทดสอบพบว่า ที่สัดส่วนผสมเส้นใยที่เท่ากัน คอนกรีตที่ผสมเส้นใยชนิด F3 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ตามด้วย F2 และ F1 ตามลำดับ โดยคอนกรีตประเภทกำลัง C28 ที่ผสมเส้นใย F1, F2, และ F3 ในสัดส่วนผสมเส้นใย 30 กก./ลบ.ม. มีค่ากำลังเพิ่มขึ้นจากคอนกรีตควบคุมเป็น 31.9, 34.3 และ 35.1 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ ที่สัดส่วนผสมเส้นใย 40 กก./ลบ.ม. มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 34.0, 36.0 และ 36.8 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ และที่สัดส่วนผสมเส้นใย 50 กก./ลบ.ม. มีค่ากำลังเพิ่มขึ้นเป็น 36.9, 37.9 และ 39.0 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ [รูปที่ 2 (ก)]

ในส่วนของคอนกรีตประเภทกำลัง C45 และ C60 [รูปที่ 2 (ข) และ (ค)] ก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับของ C28 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นเกิดจากการที่เส้นใยมีกำลังสูงขึ้นและมีรูปทรงต่างกัน โดยในส่วนของรูปทรงของเส้นใย เส้นใยที่มีจำนวนรอยหยักมากทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวประเภท Anchorage สูงกว่าเส้นใยที่มีรอยหยักน้อย ส่งผลให้ต้องใช้แรงกระทำสูงขึ้นในการถอนเส้นใยออกจากคอนกรีต ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำไมเส้นใย F3 ให้ค่ากำลังสูงกว่าเส้นใย F1 และ F2 เนื่องจากเป็นเส้นใยประเภท Double Hooked End และทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น และในส่วนกำลังของเส้นใยนั้น เกี่ยวข้องกับการถอนเส้นใยออกจากตำแหน่งการฝังตัวในระหว่างการถูกถอนนั้น แรงกระทำต้องเพียงพอที่จะก่อให้เส้นใยเกิดการเปลี่ยนรูปทรงเป็นเส้นตรงเพื่อที่สามารถถูกถอนออกมาได้งาน ในกรณีของเส้นเนื่องจากเส้นใยที่มีกำลังรับแรงดึงสูงที่มีค่า Stiffness ที่สูงกว่าเส้นใยกำลังต่ำ ซึ่งส่งผลให้เปลี่ยน

รูปทรงได้ยากกว่าและจำเป็นต้องใช้แรงกระทำสูงขึ้นเพื่อที่จะยืดรอยหยักของเส้นใยให้เปลี่ยนเป็นเส้นตรงก่อนที่จะถูกถอนออกมา แรงกระที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งเป็นเหตผลที่ทำไมคอนกรีตเสริมเส้น F2 ถึงสามารถรับกำลังได้สูงกว่าคอนกรีตเสริมเส้นใย F1 ทั้งที่มีรูปทรงแบบเดียวกัน แตกต่างกันเพียงแค่เส้นใย F2 มีกำลังรับแรงดึงสูงกว่าเส้นใย F1

3.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของคอนกรีตเสริมเส้นใยและปริมาณเส้นใย

ผลการทดลองทั้งหมดสามารถนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยกับปริมาณและชนิดของเส้นใยที่ค่ากำลังรับแรงอัดดังแสดงในสมการที่ (2)

$$f'_{i,j} = aW_{i,j} + c \qquad (2)$$

โดยที่ f'_{ij} คือ ค่ากำลังรับแรงอัด (MPa)
$W_{i,j}$ คือ ปริมาณเส้นใย (กก.)
i คือ ประเภทของเส้นใย
J คือ ชั้นกำลังรับแรงอัดพื้นฐานของคอนกรีต
a, c คือ ค่าคงที่เป็นดังแสดงในตารางที่ 5

หมายเหตุ สมการที่ (2) สามารถใช้ได้กับเส้นใยที่ใช้ในการทดลองนี้ ในสัดส่วน 30–50 กก./ม.^{3} และกำลังของคอนกรีตพื้นฐานที่ 28, 45 และ 60 เมกกะปาสคาล ตามสัดส่วนที่นำเสนอในบทความนี้

3.2 การวิเคราะห์ต้นทุนวัสดุที่เพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองพบว่า ช่วงของค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแปรผันกับประเภทและสัดส่วนผสมของเส้นใย รวมถึงค่ากำลังอัดพื้นฐานของคอนกรีต (C28, C45, C60) โดยคอนกรีตเสริมเส้นใยชนิดหนึ่งอาจให้ค่ากำลังรับแรงอัดเดียวกันกับคอนกรีตเสริมเส้นใยอีกชนิดหนึ่งที่สัดส่วนผสมแตกต่างกัน ซึ่งผลที่ได้รับดังกล่าวทำให้สามารถนำมาวิเคราะห์ด้านต้นทุนวัสดุเส้นใยที่จำเป็นต้องผสม (ทั้งในรูปของประเภทและปริมาณ) เพื่อให้ได้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ต้องการ

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ a, b สำหรับสมการที่ (2)

i	j	a	c
F1	C28	0.209	28.6
F2	C28	0.187	28.6
F3	C28	0.147	28.6
F1	C45	0.214	45.1
F2	C45	0.179	45.1
F3	C45	0.132	45.1
F1	C60	0.143	61.2
F2	C60	0.106	61.2
F3	C60	0.081	61.2

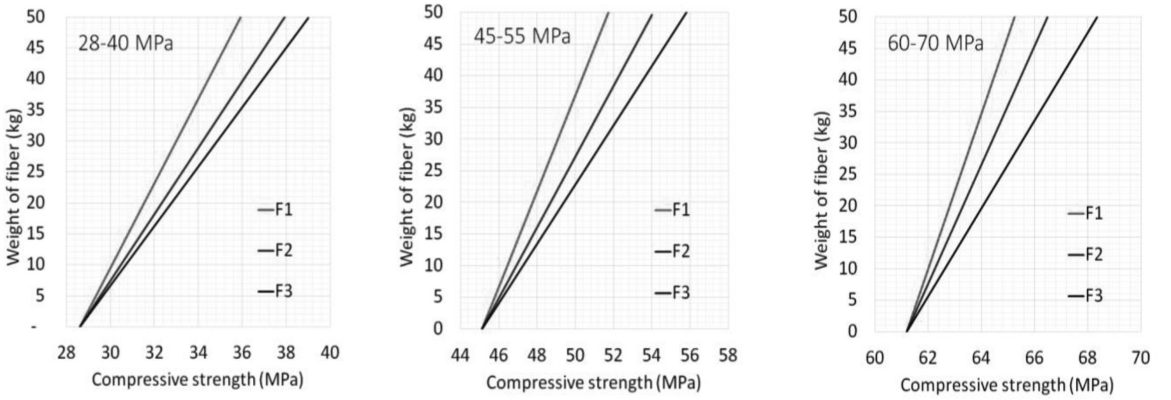
โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใย (ของเส้นใยชนิดต่างๆ) และค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยสามารถแสดงได้ในสมการที่ (3)

$$W_{i,j} = \left(\frac{f'_{i,j} - c}{a}\right) \qquad (3)$$

หมายเหตุ สมการที่ (3) สามารถใช้ได้กับเส้นใยที่ใช้ในการทดลองนี้ ในสัดส่วน 30–50 กก./ลบ.ม. และกำลังของคอนกรีตพื้นฐานที่ 28, 45 และ 60 เมกกะปาสคาล ตามสัดส่วนที่นำเสนอในบทความนี้

สมการที่ (3) สามารถนำไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยและค่ากำลังรับแรงอัดได้ดังรูปที่ 3 (ก)–(ค) โดยแบ่งช่วงของกำลังรับแรงอัดที่คอนกรีตเสริมเส้นใยแต่ละชนิดออกเป็น 3 ช่วง คือช่วง 28–45, 45–56 และ 60–68 เมกกะปาสคาล ตามชั้นกำลังของคอนกรีตตั้งต้น C28, C45 และ C60 ตามลำดับโดยสังเกตได้ว่า ค่ากำลังรับแรงอัดบางค่า อาจได้จากการผสมเส้นใยชนิดใดชนิดหนึ่งในปริมาณต่างกันได้ซึ่งในกรณีที่เส้นใยแต่ละชนิดมีราคาไม่เท่ากัน ก็อาจทำให้ต้นทุนวัสดุไฟเบอร์เพิ่มขึ้นไม่เท่ากันด้วย

สำหรับการนำไปใช้งานของรูปที่ 3 หรือสมการที่ (2) และ (3) สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดตามสัดส่วนผสมของเส้นใยที่ต้องการใช้ในแต่ละชนิดของเส้นใย หรือในกรณีที่รู้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ต้องการ สามารถ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยและค่ากำลังรับแรงอัดในช่วง (ก) 28–40 (ข) 45–55 และ (ค) 60–70 เมกกะปาสคาล

นำไปใช้คำนวณหาปริมาณเส้นใยในแต่ละชนิดที่เหมาะสมกับค่ากำลังรับแรงนั้น จากนั้นจึงนำราคาต่อหน่วยของเส้นใยไปคูณเพื่อให้ทราบถึงราคาต้นทุนวัสดุที่เพิ่มขึ้น ขอยกตัวอย่างดังต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 1

คำนวณกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ปริมาณเส้นใย 45 กก./ลบ.ม. สำหรับเส้นใยแต่ละประเภท (F1, F2, F3) โดยใช้คอนกรีตที่มีชั้นกำลังอัดพื้นฐานที่ 28 เมกกะปาสคาล

วิธีการคำนวณ

จากรูปที่ 3 (ก) และสมการที่ (2) แทนค่าปริมาณเส้นใยที่ 45 กก./ลบ.ม. ในสมการดังกล่าวได้ค่ากำลังรับแรงอัดสำหรับคอนกรีตเสริมเส้นใยชนิดต่างๆ ดังต่อไปนี้

- เส้นใย F1 ให้กำลังรับแรงอัด เท่ากับ 35.2 เมกกะปาสคาล
- เส้นใย F2 ให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 37 เมกกะปาสคาล
- เส้นใย F3 ให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 39 เมกกะปาสคาล

ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ที่เส้นใย F3 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่สัดส่วนผสมเดียวกัน

ตัวอย่างที่ 2

เมื่อต้องการกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ 35 เมกกะปาสคาล คำนวณหาปริมาณของเส้นใยแต่ละชนิดที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดดังกล่าว โดยมีกำลังอัดพื้นฐานของคอนกรีตอยู่ที่ 28 เมกกะปาสคาล

วิธีการคำนวณ

จากรูปที่ 3 (ก) และสมการที่ (3) แทนค่ากำลังรับแรงอัดที่ 35 MPa ในสมการดังกล่าว ได้ค่าสัดส่วนผสมเส้นใยดังต่อไปนี้

- เส้นใย F1 ให้ค่าสัดส่วนผสมเส้นใย เท่ากับ 43.7 กก./ลบ.ม.
- เส้นใย F2 ให้ค่าสัดส่วนผสมเส้นใย เท่ากับ 34.3 กก./ลบ.ม.
- เส้นใย F3 ให้ค่าสัดส่วนผสมเส้นใย เท่ากับ 30.7 กก./ลบ.ม.

ซึ่งจากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าเมื่อต้องการกำลังอัดที่ 42 เมกกะปาสคาล เส้นใย F3 ใช้ปริมาณน้อยที่สุด

ตัวอย่างที่ 3

ต้องการทราบราคาต้นทุนวัสดุของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กแต่ละชนิดที่มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 35 เมกกะปาสคาล โดยมีกำลังอัดพื้นฐานของคอนกรีตที่ 28 เมกกะปาสคาล

วิธีการคำนวณ

กำหนดให้ราคาของเส้นใยแต่ละชนิดเป็นดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบราคาของเส้นใยเหล็ก 3 ชนิด

ประเภทของเส้นใยเหล็ก	ราคา	หน่วย
F1 (1,225 MPa)	75	บาท/กิโลกรัม
F2 (1,800 MPa)	80	บาท/กิโลกรัม
F3 (2,300 MPa)	85	บาท/กิโลกรัม

หมายเหตุ; ที่มาของราคาเส้นใยเหล็กต่อกิโลกรัม จากบริษัทไฟเบอร์

จากผลการคำนวณในตัวอย่างที่ 2 สามารถคำนวณหาราคาต้นทุนของไฟเบอร์ที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วย ลบม. ของคอนกรีตได้ดังต่อไปนี้

• คอนกรีตเสริมเส้นใย F1 มีราคาต้นทุนวัสดุที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 3,276 บาท/ลบ.ม. ของคอนกรีต

• คอนกรีตเสริมเส้นใย F2 มีราคาต้นทุนวัสดุที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 2,744บาท/ลบ.ม. ของคอนกรีต

• คอนกรีตเสริมเส้นใย F3 มีราคาต้นทุนวัสดุที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 2,607 บาท/ลบ.ม. ของคอนกรีต

ซึ่งจากผลการคำนวณพบว่า เมื่อต้องการกำลังของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ 35 เมกกะปาสคาล การใช้เส้นใย F3 จะมีต้นทุนวัสดุที่เพิ่มขึ้นต่ำที่สุด ถึงแม้ว่าราคาต่อหน่วยของเส้นใย F3 จะมีราคาสูงกว่าเส้นใยชนิดอื่น แต่เนื่องจากมีการใช้ปริมาณเส้นใยที่ต่ำที่สุด ทำให้ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นมีค่าต่ำกว่าเส้นใยชนิดอื่น

4. สรุป

ผลการทดลองพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าแปรผันตามตัวแปรต่างๆ เช่น กำลังตั้งต้นของคอนกรีต ชนิดของเส้นใย และสัดส่วนการผสมเส้นใย ดังต่อไปนี้

ในกรณีของสัดส่วนผสมของเส้นใยพบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นในทุกชนิดของเส้นใยและทุกกำลังอัดพื้นฐานของคอนกรีต โดยเส้นใย F3 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าเส้นใย F1 และ F2 ในสัดส่วนผสมเดียวกัน

ในกรณีของประเภทของเส้นใยพบว่า เส้นใยที่มีจำนวนรอยหยักมากให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าเส้นใยที่มีจำนวนรอยหยักน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า เส้นใยที่ค่ากำลังรับแรงดึงสูงจะให้กำลังรับแรงอัดสูงมากกว่าเส้นใยที่มีกำลังต่ำ โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น

ในกรณีของการวิเคราะห์ต้นทุนวัสดุพบว่า ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยสามารถแยกตามกำลังรับแรงอัดออกได้เป็น 3 ช่วง คือ 28–40, 45–55 และ 60–70 เมกกะปาสคาล โดยหากพิจารณาในแต่ละช่วงของกำลังอัดพบว่า คอนกรีตเสริมเส้นใยต่างชนิดกันสามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดเดียวกันได้โดยการแปรผันปริมาณของเส้นใย ซึ่งทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับลดปริมาณของเส้นใยลงได้ เมื่อในกรณีที่มีการนำเส้นใยที่มีกำลังสูงมาใช้งานแทนที่เส้นใยกำลังต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนโครงงานวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ประเภททุน พวอ. เลขที่สัญญา MSD-62I0050

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Sukontasukkul, *Concrete.* Pathum Thani: Wankawee Publisher, 2013 (in Thai).

[2] P. Balugaru and S.P. Shah, *Fibre Reinforced Cement Composites*. McGraw-Hill, 1992.

[3] A. Bentur and S. Mindess, “Fiber reinforced cementitious composites,” *Journal of Cement and Concrete Research,* vol. 20, pp. 324–340, 1990.

[4] P. N. Balagura and S. P. Shah, *Fiber Reinforced Cement Composite.* New York: McGraw-Hill, 1992

[5] M. Pajak and T. Ponikiewski, “Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers,” *Construction and Building Materials*, vol.47, pp. 397–408, 2013.

[6] K. Holschemacher, T. Mueller, and Y. Ribakov, "Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete," *Materials and Design,* vol.31, pp. 2604–2615, 2010.

[7] D. Y. Yoo, J. J. Park, and S. W. Kim, "Fiber pullout behavior of HPFRCC: Effects of matrix strength and fiber type," *Composite Structures* vol.174, pp. 263–276, 2017.