

ผลกระทบของเส้นใยเหล็กต่อสมบัติเชิงกลและการคืบของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด

Effects of Steel Fibers on Mechanical Properties and Creep of High Performance Concrete Containing Ground Coal-Bottom Ash

ณัฐวัตร เหมือนเหล่า* วีระชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: nattawat.mhuan@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเชิงกลและการคืบของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียด (GBA) เป็นวัสดุประสานร่วมกับเส้นใยเหล็ก โดยใช้เถ้าก้นเตาที่มีความละเอียดสูง (มีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน นอกจากนี้ใช้เส้นใยเหล็กชนิดตรงขนาดความยาว 13 และ 20 มม. ในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร และเส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย ขนาดความยาว 35 มม. ร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตร มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.27 ควบคุมค่าการไหลแต่ละระหว่าง 650-750 มม. และควบคุมระยะเวลาของการไหลถึง 500 มม. อยู่ในช่วงระหว่าง 5-20 วินาที ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดปริมาณสูงร่วมกับเส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย ร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร สามารถพัฒนากำลังอัด และกำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน สูงถึง 80.4 และ 10.2 เมกะปาสคาล ตามลำดับ การเพิ่มความยาวของเส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดัดและค่าความเหนียวให้กับคอนกรีต นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของเส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการคืบที่ลดลง

คำสำคัญ: การแทนที่ในปริมาณสูง, คอนกรีตสมรรถนะสูง, คอนกรีตสมรรถนะสูงเสริมเส้นใย, เถ้าก้นเตา, เส้นใยเหล็ก

Abstract

This research aims to study mechanical properties and creep of steel fiber reinforced high performance concrete containing ground coal bottom ash (GBA). A very fine bottom ash, particles retained on a No.325 sieve less than 1% by weight, was used to partially replace ordinary Portland cement at a rate of 70% by weight of the binder. In addition, straight steel fiber (length of 13 and 20 mm) was used in concrete at the rate of 0.5 by volume and hooked-end steel fiber (length of 35 mm) was used at the rates of 0.5 and 1.0% by volume. Water to binder ratio of 0.27 was used. The slump flow was controlled between 650-

750 mm and time at a flow diameter of 500 mm was maintained between 5-20 seconds. The results revealed that the high performance concrete containing 70% GBA with 1.0% hooked-end steel fiber could develop the compressive and flexural strength up to 80.4 and 10.2 MPa at 28 days, respectively. The flexural strength and toughness of concrete were significantly improved with the fiber length. Moreover, the creep strain of concrete was reduced with the increase of fiber content.

Keywords: High volume, High-performance concrete, High-performance fiber reinforced concrete, Bottom ash, Steel fiber

1. บทนำ

อุตสาหกรรมงานก่อสร้างในประเทศไทยตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันมีแนวโน้มเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นเหตุให้พื้นที่งานก่อสร้างโดยเฉพาะอาคารสูงมีอยู่อย่างจำกัด และจำเป็นต้องลดขนาดขององค์อาคารให้เล็กลง ดังนั้นนอกจากต้องการเสริมเหล็กในปริมาณที่มากขึ้นภายในโครงสร้างแล้ว คอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างจำเป็นต้องมีคุณสมบัติด้านกำลังที่สูงขึ้น เพื่อให้โครงสร้างของอาคารยังคงความแข็งแรง อีกทั้งเนื่องจากความซับซ้อน และปริมาณของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างที่มากขึ้น ทำให้คอนกรีตจะต้องมีความสามารถในการทำงานที่ดีเพิ่มขึ้นอีกด้วย

คอนกรีตสมรรถนะสูงเป็นคอนกรีตที่พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความทนทาน และความสามารถในการทำงานที่ดีขึ้นมากกว่าคอนกรีตปกติ แต่อย่างไรก็ตามคอนกรีตสมรรถนะสูงจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก ซึ่งการผลิตปูนซีเมนต์มีส่วนทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก อันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อน ดังนั้นการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ เช่นวัสดุพอซโซลาน จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกเพื่อลดปัญหาดังกล่าว เถ้าก้นเตาเป็นหนึ่งในวัสดุพอซโซลานที่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหิน โดยนำไปทิ้ง หรือถมที่มากกว่าการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ นอกจากทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการนำไปทิ้งแล้ว ยังก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ต่อมาได้มีงานวิจัยมากมายที่ได้ทำการพัฒนา และปรับปรุงคุณภาพ

เถ้ากันเทาเพื่อนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตกำลังสูง โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเถ้ากันเทาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 จากนั้นนำไปบดละเอียดเพื่อให้อนุภาคมีขนาดค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 1 สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี อีกทั้งสามารถปรับปรุง หรือเพิ่มสมบัติบางประการให้กับคอนกรีตได้อีกด้วย [1-2]

คอนกรีตยังคงเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้าง เนื่องจากมีคุณสมบัติด้านความคงทนแข็งแรง และทนทานต่อสภาพแวดล้อมมากกว่าวัสดุอื่นๆ อย่างไรก็ตามคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการรับแรงดึงที่ต่ำ การใช้เส้นใยเหล็กในคอนกรีตจึงมีบทบาทสำคัญในการแก้ไขข้อเสียดังกล่าว โดยเส้นใยเหล็กนอกจากช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอนกรีต และทำให้คอนกรีตมีความเหนียวมากขึ้นแล้ว ยังมีส่วนช่วยในการยับยั้งรอยร้าว และการหดตัวและขยายตัวที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตอีกทางหนึ่ง [3-5] นอกจากนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าขนาด ความยาว รูปร่างและปริมาณของเส้นใยเหล็กส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตด้วย [6-14]

อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีงานวิจัยมากมายได้ทำการศึกษาศสมบัติเชิงกลของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ผสมเส้นใยเหล็ก แต่หากพูดถึงการศึกษาลักษณะของชนิด รูปร่าง และปริมาณของเส้นใยเหล็กต่อพฤติกรรมในระยะยาวของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำค้ำ หรือการคืบนั้นยังคงมีน้อย อีกทั้งเนื่องจากในปัจจุบันนี้มีการต่อเติมและเพิ่มจำนวนชั้นของอาคารสูงที่มากขึ้น ส่งผลให้การรับน้ำหนักขององค์อาคารเพิ่มขึ้น นำมาซึ่งการออกแบบโครงสร้างที่จำเป็นต้องพิจารณาการคืบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษากการใช้เถ้าตาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมากร่วมกับเส้นใยเหล็กที่มีรูปร่าง ความยาว และปริมาณที่แตกต่างกันเพื่อนำไปใช้ได้จริงในงานคอนกรีตสมรรถนะสูง อาทิ งานก่อสร้างอาคารสูง เป็นต้น โดยทำการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ กำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น กำลังรับแรงดัดและการคืบของคอนกรีต

2. วัสดุและวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

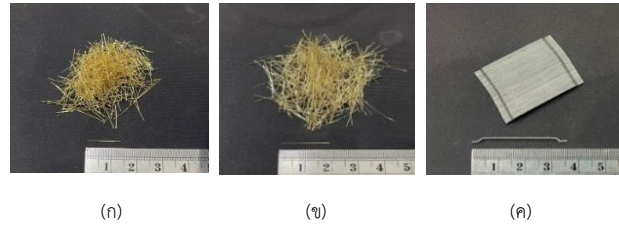
การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) และใช้เถ้ากันเทาบดละเอียด (GBA) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า จังหวัดระยอง ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 จากนั้นนำไปบดละเอียดให้มีขนาดอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มความว่องไวในการทำปฏิกิริยา

2.2 มวลรวม

มวลรวมที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยหินแกรนิตซึ่งเป็นมวลรวมหยาบ มีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 10 มม. (ผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 3/8 นิ้ว และค้ำบนตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 4) และทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด ซึ่งมีขนาดผ่านตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 4

2.3 เส้นใยเหล็ก

รูปที่ 1 แสดงเส้นใยเหล็ก (Steel fiber) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ซึ่งประกอบด้วยเส้นใยเหล็กชนิดตรง เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 มม. มีความยาว 13 และ 20 มม. ตามลำดับ และเส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 มม. มีความยาว 35 มม. โดยสมบัติอื่นๆของเส้นใยแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 เส้นใยเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ

- (ก) เส้นใยเหล็กชนิดตรง ความยาว 13 มม.
- (ข) เส้นใยเหล็กชนิดตรง ความยาว 20 มม.
- (ค) เส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย ความยาว 35 มม.

ตารางที่ 1 สมบัติของเส้นใยเหล็ก*

Steel fiber shape	Diameter (mm)	Length (mm)	Aspect ratio	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)
Straight	0.20	13	65	2,750	200
Straight	0.20	20	100	2,750	200
Hooked-end	0.55	35	65	1,345	200

* ข้อมูลจาก บริษัท เอส.อาร์.ไฟเบอร์ จำกัด

2.4 สารลดน้ำพิเศษ

ใช้สารลดน้ำพิเศษประเภท F ชนิด Polycarboxylate ในอัตราส่วนร้อยละ 1.1, 2.0, 2.4, 1.4 และ 1.6 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อควบคุมค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตตามที่กำหนด ดังตารางที่ 2

2.5 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

สมบัติทางกายภาพของเถ้ากันเทาบดละเอียดที่ทำการทดสอบ ได้แก่ ความละเอียดโดยวิธีการร่อนแบบเปียก (Wet Sieve Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM C430 [15] ความถ่วงจำเพาะของวัสดุตามมาตรฐาน ASTM C188 [16] และทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray fluorescence spectroscope (XRF)

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง

Mix	Mix Proportion (kg/m ³)						SP* (% of binder)	Slump Flow (mm)	T ₅₀ ** (seconds)
	Cement	GBA	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	Water	Steel Fiber			
70GBA	180	420	890	731	162	-	1.1	710	10
70GBA-SF13-0.5	180	420	890	731	162	39	2.0	710	15
70GBA-SF20-0.5	180	420	890	731	162	39	2.4	650	19
70GBA-SF35-0.5	180	420	890	731	162	39	1.4	710	10
70GBA-SF35-1.0	180	420	890	731	162	79	1.6	700	17

* SP = Superplasticizer หรือสารลดน้ำพิเศษ

** T₅₀ = ระยะเวลาของการไหลที่ 50 เซนติเมตร

หมายเหตุ: 70GBA = เล้ากั้นเตาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และ 70GBA-SFXX-Y.Y = เล้ากั้นเตาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานร่วมกับเส้นใยเหล็กขนาดความยาว XX มม. ที่ปริมาณร้อยละ Y.Y โดยปริมาตรของคอนกรีต

2.6 ส่วนผสมและการทดสอบคอนกรีต

นำเล้ากั้นเตาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้เส้นใยเหล็กชนิดตรง ความยาว 13 และ 20 มม. และเส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย ความยาว 35 มม. ในส่วนผสมคอนกรีตอัตราส่วนร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีต และใช้เส้นใยเหล็กชนิดงอปลายในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีตอีกหนึ่งส่วนผสม ทุกส่วนผสมกำหนดปริมาณวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 600 กก/ม³ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.27 ทำการควบคุมค่าการไหลแผ่ระหว่าง 650-750 มม. และควบคุมระยะเวลาของการไหลถึง 500 มม. อยู่ในช่วงระหว่าง 5-20 วินาที โดยการใช้สารลดน้ำพิเศษ ซึ่งในเบื้องต้นส่วนผสมดังกล่าวนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองใช้กับคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ใช้เล้ากั้นเตาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แล้วพบว่า คอนกรีตนอกจากมีความสามารถในการทำงานที่ดีขึ้นและมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่าคอนกรีตควบคุมแล้ว ปฏิกริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นยังคงเพียงพอที่จะทำให้เกิดกำลังอัดในช่วงอายุต้น (3 วัน) อยู่ในเกณฑ์ของคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยส่วนผสมของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 2 การศึกษานี้ทำการทดสอบการไหลแผ่ของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C1611 [17] ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C39 [18] ที่อายุ 3, 28 และ 90 วัน ทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C469 [19] ทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C1609 [20] นอกจากนี้ทำการทดสอบการคืบของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C512 [21] ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยให้แรงกระทำค้างเท่ากับร้อยละ 40 ของกำลังอัดของคอนกรีตแก่ตัวอย่างทดสอบที่มีอายุการบ่ม 28 วัน ทดสอบในห้องทดสอบที่มีการควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 23±1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ให้มีค่าเท่ากับ 50±4% ตลอดระยะเวลาการทดสอบ ทำการเก็บผลการทดสอบทุกวันเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ จากนั้นทำการเก็บผลการทดสอบทุกสัปดาห์ จนถึงระยะเวลา 91 วัน



รูปที่ 2 การทดสอบการคืบของคอนกรีต

3. ผลการทดสอบ

3.1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

ตารางที่ 3 แสดงสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และ เล้ากั้นเตาบดละเอียด พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีขนาดอนุภาคค้ำงตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 11.35 โดยน้ำหนัก ในขณะที่เล้ากั้นเตาบดละเอียดมีขนาดอนุภาคค้ำงบนตะแกรง 325 เท่ากับร้อยละ 0.44 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเล้ากั้นเตาที่มีความละเอียดสูงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานดีขึ้น [2]

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

Materials	OPC	GBA
Retained on a No.325 sieve (% by weight)	11.35	0.44
Specific gravity	3.15	2.65

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และเถ้าถ่านเตาตะลึงเตาดีด ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าเถ้าถ่านเตาตะลึงเตาดีดมี SiO₂ เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 63.2 และมีผลรวมของปริมาณ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 94.9 ซึ่งสอดคล้องกับวัสดุปอซโซลาน Class F ที่กำหนดไว้โดยมาตรฐาน ASTM C618 [22] ที่ระบุไว้ว่า ผลรวมของปริมาณ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก รวมทั้งปริมาณของ SO₃ และค่า LOI ต้องไม่เกินร้อยละ 5 และ 6 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

Chemical composition (%)	OPC	GBA
Silicon dioxide (SiO ₂)	20.9	63.2
Aluminium oxide (Al ₂ O ₃)	4.8	24.4
Ferric oxide (Fe ₂ O ₃)	3.4	7.3
Calcium oxide (CaO)	63.3	2.3
Sulfur trioxide (SO ₃)	2.7	0.1
Magnesium oxide (MgO)	1.3	0.8
Sodium oxide (Na ₂ O)	0.3	0.4
Potassium oxide (K ₂ O)	0.4	1.3
Loss of ignition (LOI)	2.9	0.2

3.2 สมบัติของคอนกรีตสด

ตารางที่ 2 แสดงส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงและการไหลแผ่ของคอนกรีต พบว่าการใช้เส้นใยเหล็กทำให้ความสามารถในการไหลของคอนกรีตลดลง สาเหตุเนื่องจากการเกาะกลุ่ม และการขัดกันระหว่างเส้นใยในส่วนผสมคอนกรีต อีกทั้งเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเนื้อคอนกรีตขึ้น ทำให้ความสามารถในการไหลของคอนกรีตมีค่าลดลง [9,13] ดังนั้นคอนกรีตในงานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อให้คอนกรีตยังคงมีความสามารถในการไหลที่ดี โดยคอนกรีต 70GBA มีการไหลแผ่ และระยะเวลาของการไหลที่ 50 ซม. เท่ากับ 710 มม. และ 10 วินาที ตามลำดับ ซึ่งใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณร้อยละ 1.1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิดตรง (70GBA-SF13-0.5 และ 70GBA-SF20-0.5) พบว่ามีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 710 และ 650 มม. ตามลำดับ และระยะเวลาของการไหลที่ 50 ซม. เท่ากับ 15 และ 19 วินาที ตามลำดับ โดยมีการใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษเท่ากับร้อยละ 2.0 และ 2.4

โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดความยาวของเส้นใย (70GBA-SF20-0.5) ทำให้ค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตลดลง เช่นเดียวกันเมื่อทำการพิจารณาคอนกรีตที่มีการผสมเส้นใยเหล็กชนิดงอปลายในคอนกรีต (70GBA-SF35-0.5 และ 70GBA-SF35-1.0) พบว่ามีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 710 มม. และ 700 มม. ตามลำดับ ในขณะที่ระยะเวลาของการไหลที่ 50 ซม. เท่ากับ 10 และ 17 วินาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าคอนกรีต 70GBA-SF35-1.0 จำเป็นต้องมีการใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 1.4 เป็นร้อยละ 1.6 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การเกาะกลุ่ม การขัดกัน แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเส้นใยเหล็ก ปริมาณและขนาดความยาวของเส้นใยส่งผลกระทบต่อค่าการไหลแผ่ของคอนกรีต อันนำมาซึ่งความต้องการสารลดน้ำพิเศษที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Abbas และคณะ [8]

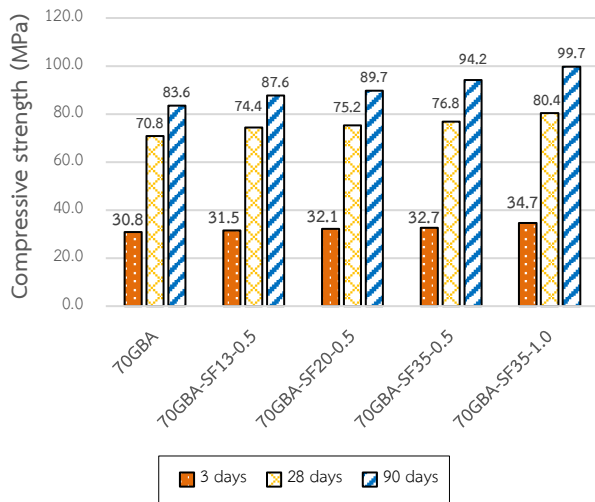
3.3 กำลังอัดของคอนกรีต

รูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านเตาตะลึงเตาดีด และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านเตาตะลึงเตาดีดร่วมกับเส้นใยเหล็กมีค่ากำลังอัดที่สามารถจัดให้เป็นคอนกรีตสมรรถนะสูงได้ [23] ซึ่งมีค่ากำลังอัดมากกว่า 28 และ 70 เมกะปาสคาล ที่อายุ 3 และ 28 วัน ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านเตาตะลึงเตาดีดในปริมาณสูง (70GBA) พบว่ามีค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 28 และ 90 วัน เท่ากับ 30.8, 70.8 และ 83.6 เมกะปาสคาล ตามลำดับ สังเกตได้ว่าคอนกรีต 70GBA สามารถจัดเป็นคอนกรีตสมรรถนะสูงได้ตั้งแต่ช่วงอายุต้น (กำลังอัด 28 เมกะปาสคาล ที่อายุ 3 วัน) เป็นผลมาจากการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าถ่านเตาดีดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 จากนั้นถูกนำไปบดละเอียดจนมีอนุภาคค้ำบดตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้เถ้าถ่านเตามีขนาดอนุภาคที่ลดลง สามารถเข้าไปอุดโพรงช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่เพิ่มสูงขึ้นแม้อยู่ในช่วงอายุต้น นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ดี ส่งผลให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นในช่วงอายุปลาย [2,24]

นอกจากนี้เมื่อเทียบกับคอนกรีต 70GBA-SF35-0.5 การเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย (70GBA-SF35-1.0) มีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงถึง 34.7, 80.4 และ 99.7 เมกะปาสคาล ที่อายุ 3, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณของเส้นใยส่งผลให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอีกทางหนึ่ง [9, 14, 25] อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาคอนกรีต 70GBA-SF13-0.5 และคอนกรีต 70GBA-SF20-0.5 พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตทั้งสองมีความใกล้เคียงกันทุกช่วงอายุ โดยที่อายุ 3, 28 และ 90 วัน คอนกรีต 70GBA-SF13-0.5 มีค่ากำลังอัดต่างจากคอนกรีต 70GBA-SF20-0.5 อยู่ร้อยละ 1.9, 1.1 และ 2.4 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดความยาวของเส้นใยส่งผลกระทบต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoo และคณะ [7] และ Abbas และคณะ [8] ที่ศึกษาอิทธิพลของความยาวของเส้นใยต่อคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ พบว่าคอนกรีตที่ใช้

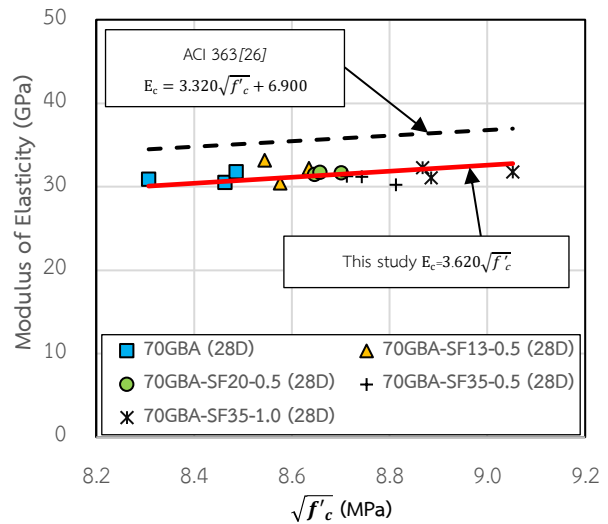
เส้นใยเหล็กที่มีความยาวกว่า ให้ค่ากำลังอัดที่มากกว่าคอนกรีตที่ใช้เส้นใยเหล็กที่ขนาดสั้นกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็ก และคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเส้นใยเหล็ก

3.4 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วันทุกส่วนผสม แสดงดังรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากสมการ ACI363 [26] พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มที่ต่ำกว่าทั้งหมด สาเหตุเนื่องจากคอนกรีตทุกส่วนผสมใช้มวลรวมหยาบที่เป็นหินแกรนิตซึ่งแม้ว่าคอนกรีตนั้นมีค่ากำลังอัดที่สูง แต่อย่างไรก็ตามค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhou และคณะ [27] และ Beushausen และ Dittmer [28] ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบทุกส่วนผสม พบว่ามีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใกล้เคียงกัน โดยคอนกรีต 70GBA, 70GBA-SF13-0.5, 70GBA-SF20-0.5, 70GBA-SF35-0.5 และ 70GBA-SF35-1.0 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 31.0, 31.9, 31.6, 30.9 และ 31.7 จิกะปาสคาล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชนิด ความยาว และปริมาณของเส้นใย ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตสมรรถนะสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen และคณะ [29] ที่พบว่าการผสมเส้นใยในคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษไม่ส่งผลกระทบต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และงานวิจัยของ Abbas และคณะ [8] ที่ศึกษาผลกระทบของความยาว และปริมาณของเส้นใยเหล็กต่อคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ พบว่าคอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 2 ดังนั้นจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตไม่ได้ขึ้นอยู่กับเส้นใยเหล็ก หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กและเนื้อคอนกรีต แต่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวม และการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมเป็นหลัก [30]



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและรากที่สองของกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง

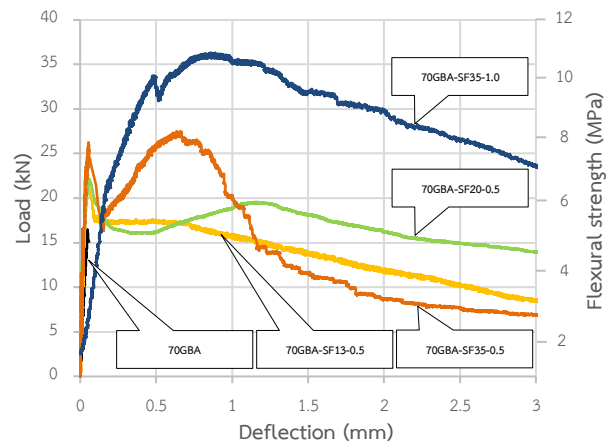
3.5 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต

การศึกษา กำลังรับแรงดัดและพฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตสำหรับการศึกษาครั้งนี้เป็นการทดสอบแบบแรงดัด 4 จุด (4-points bending) ซึ่งค่ากำลังรับแรงดัดคำนวณได้จากสมการ $f = PLbh^2$ โดยที่ f คือค่ากำลังรับแรงดัด, P คือแรงสูงสุดที่กระทำต่อตัวอย่าง, b คือความกว้างของตัวอย่าง, และ h คือความสูงของตัวอย่าง ในขณะที่ค่าความเหนียว (Toughness) ของคอนกรีตคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการรับแรงดัดจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำและการโก่งตัวของคอนกรีตที่แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าพฤติกรรมก่อนการแตกร้าว (Pre-cracking) ของคอนกรีตทุกส่วนผสมมีลักษณะเป็นกราฟเชิงเส้น แสดงให้เห็นว่าเส้นใยเหล็กมีส่วนสำคัญน้อยมากต่อการรับแรงดัดในช่วงดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามภายหลังจากคอนกรีตเกิดรอยร้าว (Post-cracking) ขึ้น เส้นใยเหล็กนอกจากช่วยยับยั้งรอยร้าวเนื่องจากน้ำหนักที่กระทำต่อคอนกรีตแล้ว ยังมีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงดัดที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าแรงดัดสูงสุด (Peak load) และระยะการโก่งตัว ณ จุดที่รับแรงดัดสูงสุด (Deflection at peak load) ระหว่างคอนกรีตในแต่ละส่วนผสมจากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย (70GBA-SF35-0.5 และ 70GBA-SF35-1.0) มีความสามารถในการรับแรงดัดและมีระยะการโก่งตัวของคอนกรีตที่มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิดตรง (70GBA-SF13-0.5 และ 70GBA-SF20-0.5) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoo และคณะ [12] และ Xu และคณะ [13] นอกจากนี้เมื่อพิจารณากำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่มีการผสมเส้นใยเหล็กให้ค่ากำลังรับแรงดัดและค่าความเหนียวของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมด้วยเส้นใยเหล็ก (70GBA) อย่างเห็นได้ชัด โดยกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต 70GBA มี

ค่าเท่ากับ 5.0 เมกะปาสคาล ในขณะที่คอนกรีต 70GBA-SF35-0.5 มีค่ากำลังรับแรงดัดที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิดอื่นในปริมาณเท่ากัน สาเหตุเนื่องจากเส้นใยเหล็กชนิดนี้มีรูปร่างที่มีการดัดงอ ซึ่งมีส่วนช่วยให้เกิดกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเนื้อคอนกรีต (Fiber-matrix bond strength) สูง [4] แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาพฤติกรรมการรับแรงดัดภายหลังจากคอนกรีตเกิดรอยร้าว หรือภายหลังจากคอนกรีตรับแรงดัดสูงสุด พบว่าคอนกรีต 70GBA-SF35-0.5 มีลักษณะเป็นกราฟสูงชันและลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับแรงดัดของคอนกรีตที่ลดลง นอกจากนี้คอนกรีต 70GBA-SF35-0.5 มีค่าความเหนียวที่ต่ำกว่าคอนกรีต 70GBA-SF20-0.5 ซึ่งเป็นผลมาจากเส้นใยเหล็กชนิดงอปลายและเนื้อคอนกรีตมีแรงยึดเหนี่ยวทางกลสูง ทำให้แรงดัดสูงสุดที่กระทำต่อคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น นำมาซึ่งการเกิดรอยร้าวบริเวณรอบๆ ปลายของเส้นใยเหล็ก โดยการเกิดรอยร้าวในลักษณะนี้ส่งผลให้เกิดการลดทอนประสิทธิภาพและความสามารถของเส้นใยเหล็กในการรับแรงดัดในช่วงปลาย (Post peak performance) [12] โดยกำลังรับแรงดัด และความเหนียวของคอนกรีต 70GBA-SF35-0.5 มีค่าเท่ากับ 7.9 เมกะปาสคาล (ระยะโก่งตัวเท่ากับ 0.64 มม.) และ 42.3 จูลส์ ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีต 70GBA-SF20-0.5 มีค่าเท่ากับ 7.3 เมกะปาสคาล (ระยะโก่งตัวเท่ากับ 0.05 มม.) และ 51.4 จูลส์ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาคอนกรีต 70GBA-SF13-0.5 พบว่ามีค่ากำลังรับแรงดัดและค่าความเหนียวเท่ากับ 7.0 เมกะปาสคาล (ระยะโก่งตัวเท่ากับ 0.05 มม.) และ 40.4 จูลส์ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีต 70GBA-SF20-0.5 พบว่าเส้นใยเหล็กที่มีความยาวมากกว่ามีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงดัดภายหลังจากการเกิดรอยร้าวที่ดีกว่าเส้นใยเหล็กที่มีความยาวสั้นกว่า นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มความยาวของเส้นใยช่วยให้คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงดัด และค่าความเหนียวที่มากขึ้น สืบเนื่องจากการเพิ่มขนาดความยาวของเส้นใยทำให้เกิดพื้นที่ยึดเหนี่ยว (Bonding area) ระหว่างเส้นใยและเนื้อคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงดัดที่สูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Abbas และคณะ [8] และ Yoo และคณะ [10] ที่ศึกษาผลกระทบของความยาวของเส้นใยเหล็กต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ พบว่าเมื่อเส้นใยเหล็กมีความยาวเพิ่มขึ้นยิ่งทำให้คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงดัด และค่าความเหนียวที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย (70GBA-SF35-1.0) ช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงดัดภายหลังจากการเกิดรอยร้าวที่ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต 70GBA-SF35-0.5 โดยคอนกรีต 70GBA-SF35-1.0 มีค่ากำลังรับแรงดัด และค่าความเหนียวของคอนกรีตสูงถึง 10.2 เมกะปาสคาล (ระยะโก่งตัวเท่ากับ 0.84 มม.) และ 85.1 จูลส์ ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu และคณะ [9] ที่พบว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กชนิดงอปลายในคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงดัด และค่าความเหนียวให้กับคอนกรีต



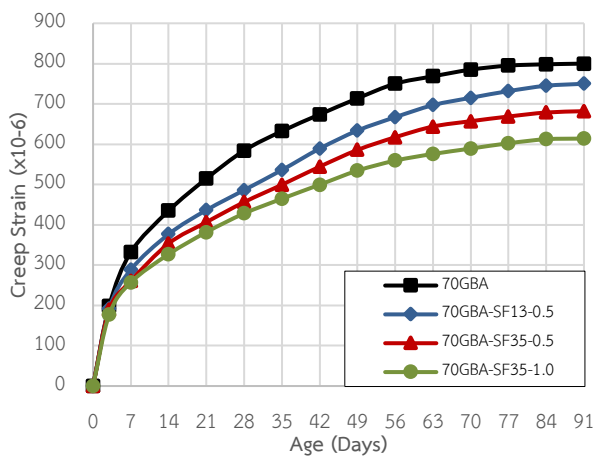
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวของคอนกรีต

3.6 การคืบของคอนกรีต

จากงานวิจัยของ Chern และ Youngt [31] และ Afroughsabet และ Teng [32] พบว่าการคืบของคอนกรีตมีค่าลดลงตามค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้น รวมถึงผลการศึกษาในหัวข้อที่ 3.3 พบว่ากำลังอัดระหว่างคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิดตรง ความยาว 13 มม. (70GBA-SF13-0.5) และคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิดตรง ความยาว 20 มม. (70GBA-SF20-0.5) มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นการศึกษานี้จึงผู้วิจัยจึงทำการเลือกคอนกรีต 70GBA-SF13-0.5 มาเพียงหนึ่งส่วนผสม พิจารณาเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย (70GBA-SF35-0.5) ในปริมาณที่เท่ากัน นอกจากนี้ทำการเลือกส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย ปริมาณร้อยละ 1.0 (70GBA-SF35-1.0) อีกหนึ่งส่วนผสมเพื่อศึกษาผลกระทบของขนาด รูปร่าง และปริมาณของเส้นใยเหล็กต่อการคืบของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้ากันเตาบดละเอียดเพียงอย่างเดียว (70GBA) โดยการคืบหรือความเครียดของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำค้างเป็นระยะเวลาสั้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 28.3, 29.6, 30.7 และ 32.1 เมกะปาสคาล สำหรับคอนกรีต 70GBA, 70GBA-SF13-0.5, 70GBA-SF35-0.5 และ 70GBA-SF35-1.0 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 6 ผลการศึกษาพบว่าในช่วงแรกขณะที่คอนกรีตรับแรงกระทำ เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวขึ้นแบบทันทีทันใด (Instantaneous strain) เมื่อรับแรงกระทำค้างเป็นระยะเวลาสั้น การเปลี่ยนแปลงความยาวนี้ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแม้ว่าแรงกระทำจะมีค่าคงที่ โดยอยู่ในลักษณะโค้งแบบพาราโบลา จากนั้นเมื่อผ่านช่วงระยะเวลาหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงความยาวนี้จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรือมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ลดลงซึ่งอยู่ในรูปแบบของลักษณะกราฟเชิงเส้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Marzouk [33] ที่ทำการทดสอบการคืบของคอนกรีตกำลังสูง พบว่าการคืบของคอนกรีตนั้นเกิดขึ้นในลักษณะดังกล่าวภายหลังจากที่คอนกรีตรับแรงกระทำค้าง

เมื่อพิจารณาคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ผสมเถ้ากันเตาบดละเอียดร่วมกับเส้นใยเหล็ก พบว่าการคืบของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเส้นใยเหล็ก ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง

คอนกรีต 70GBA-SF13-0.5 และคอนกรีต 70GBA-SF35-0.5 ในปริมาณเท่ากัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิดดอปลายช่วยลดการคืบของคอนกรีตได้มากกว่า สาเหตุเนื่องจากเส้นใยเหล็กชนิดนี้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูง อีกทั้งมีความสามารถในการยึดเหนี่ยวที่ดี ทำให้มีความสามารถในการยับยั้งการเกิดรอยร้าวภายในคอนกรีตเนื่องจากการคืบได้มากขึ้น [32,34] ส่งผลให้ค่าการคืบของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิดอื่นเช่นเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กชนิดดอปลายในคอนกรีต (70GBA-SF35-1.0) พบว่าค่าการคืบของคอนกรีตมีค่าลดลงมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chern และ Youngt [31] และ Zhao และคณะ [34] ที่พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของเส้นใยเหล็กในคอนกรีตส่งผลให้การคืบของคอนกรีตมีค่าลดลงยิ่งขึ้น



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุและการคืบของคอนกรีต

4. สรุปผลการทดสอบ

- คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดในปริมาณสูง (70GBA) สามารถจัดเป็นคอนกรีตสมรรถนะสูงได้ตั้งแต่ช่วงอายุต้น โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 3 วัน มีค่าเท่ากับ 30.8 เมกะปาสคาล และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 70.8 และ 83.6 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ
- การผสมเส้นใยเหล็กมีส่วนทำให้ค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตลดลง โดยค่าการไหลแผ่จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขนาดความยาวและปริมาณของเส้นใยเหล็ก
- การเพิ่มขึ้นของความยาวของเส้นใยเหล็ก (70GBA-SF20-0.5) ช่วยให้คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงดัด และค่าความเหนียวที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กที่มีขนาดความยาวที่สั้นกว่า (70GBA-SF13-0.5)
- การผสมเส้นใยเหล็กชนิดดอปลาย (70GBA-SF35-0.5) มีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัด และกำลังรับแรงดัดที่สูงที่สุด แต่อย่างไรก็ตามคอนกรีต 70GBA-SF35-0.5 มีค่าความเหนียวที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิดตรง (70GBA-SF20-0.5)

- คอนกรีต 70GBA-SF35-1.0 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษาครั้งนี้เพราะมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงถึง 80.4 เมกะปาสคาล และสามารถพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุ 90 วัน ได้ถึง 99.7 เมกะปาสคาล ในขณะที่เดียวกับการเพิ่มปริมาณของเส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงดัด และค่าความเหนียวที่เพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าสูงถึง 10.2 เมกะปาสคาล และ 85.1 จูลส์ ตามลำดับ อีกทั้งมีส่วนช่วยให้การคืบของคอนกรีตมีค่าลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น
- การผสมเส้นใยเหล็กในคอนกรีต (70GBA-SF13-0.5, 70GBA-SF35-0.5 และ 70GBA-SF35-1.0) ทำให้การคืบมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต 70GBA โดยคอนกรีต 70GBA-SF35-0.5 มีค่าการคืบที่ต่ำกว่าคอนกรีต 70GBA-SF13-0.5 นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของเส้นใยเหล็ก (70GBA-SF35-1.0) มีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีค่าการคืบที่ลดลงมากขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีต 70GBA-SF35-0.5

5. ข้อเสนอแนะ

องค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าสามารถนำไปใช้ได้จริงในงานคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยเฉพาะงานโครงสร้างอาคารสูง และสามารถผลักดันการใช้เถ้าก้นเตาให้เป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมคอนกรีต เพื่อลดต้นทุนการก่อสร้าง และทำให้อาคารนั้นเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้สามารถนำองค์ความรู้ไปพัฒนาต่อยอดหรือเป็นแนวทางในการวิจัยต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า จังหวัดระยอง ที่สนับสนุนเถ้าก้นเตา ขอขอบคุณบริษัท เอส.อาร์.ไฟเบอร์ จำกัด ที่สนับสนุนวัสดุเส้นใยเหล็ก ขอขอบคุณบริษัท ซิก้า (ประเทศไทย) จำกัด ที่สนับสนุนสารลดน้ำพิเศษเพื่อใช้ในการวิจัยนี้ และขอขอบคุณสำนักงาน คณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (สกว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการ ทุนสนับสนุนงานวิจัยมูลฐาน (Fundamental Fund 2565: โครงการเทคโนโลยีการก่อสร้างขั้นสูง สำหรับ Thailand 4.0)

เอกสารอ้างอิง

- ชลตรงค์ เจริญไวยเจตน์ (2560). การพัฒนาคุณภาพของเถ้าก้นเตาเพื่อใช้ในการงานคอนกรีตกำลังสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 110 หน้า.
- บุษรา มินยฤทธิ์, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2562). คอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดปริมาณสูง. วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, Vol.7 No.2, หน้า 14-24.
- Meng W., and Khayat K.H. (2018). Effect of Fibers on Fresh Properties, Mechanical Properties, and Autogenous

- Shrinkage of Cost-Effective UHPC. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4):04018030.
- [4] Wu Z., Shi C., and Khayat K.H. (2019). Investigation of Mechanical Properties and Shrinkage of Ultra- high Performance Concrete: Influence of Steel Fiber Content and Shape. *Composite Part B*, 174, pp. 1-12.
- [5] Fang C., Ali M., Xie T., Visintin P., and Sheikh A.H. (2020). The Influence of Steel Fibre Properties on the Shrinkage of Ultra- High Performance Fibre Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, 242, 117993.
- [6] Yoo D.-Y., Lee J.-H., and Yoon Y.-S. (2013). Effect of Fiber Content on Mechanical and Fracture Properties of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites. *Composite Structures*, 106, pp. 742-753.
- [7] Yoo D.-Y., Kang S.-T., and Yoon Y.-S. (2014). Effect of Fiber Length and Placement Method on Flexural Behavior, Tension- Softening Curve, and Fiber Distribution Characteristics of UHPFRC. *Construction and Building Materials*, 64, pp. 67-81.
- [8] Abbas S., Soliman A.M., and Nehdi M.L. (2015). Exploring Mechanical and Durability Properties of Ultra- high Performance Concrete Incorporating Various Steel Fiber Lengths and Dosages. *Construction and Building Materials*, 75, pp. 429-441.
- [9] Wu Z., Shi C., He W., and Wu L. (2016). Effects of Steel Fiber Content and Shape on Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete. *Construction and Building Materials*, 103, pp. 8-14.
- [10] Yoo D.-Y., Kang S.-T., and Yoon Y.-S. (2014). Enhancing The Flexural Performance of Ultra-High-Performance Concrete Using Long Steel Fibers. *Composite Structures*, 147, pp. 220-230.
- [11] Yoo D.-Y., Kim S.-W., and Park J.-J. (2017). Comparative Flexural Behavior of Ultra- High- Performance Concrete Reinforced with Hybrid Straight Steel Fibers. *Construction and Building Materials*, 132, pp. 219-229.
- [12] Yoo D.-Y., Kim S., Park G.-J., Park J.-J., and Kim S.-W (2017). Effect of Fiber Shape, Aspect Ratio, and Volume Fraction on Flexural Behavior of Ultra- High- Performance Fiber-Reinforced Cement Composites. *Composite Structures*, 174, pp. 375-388.
- [13] Xu L., Wu F., Chi Y., Cheng P., Zeng Y., and Chen Q. (2019). Effect of Coarse Aggregate and Steel Fibre Contents on Mechanical Properties of High Performance Concrete. *Construction and Building Materials*, 206, pp. 97-110.
- [14] Han J., Zhao M., Chen J., and Lan X. (2019). Effects of Steel Fiber Length and Coarse Aggregate Maximum Size on Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, 209, pp. 577-591.
- [15] ASTM (2015). Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by The 45- μm (No.325) Sieve. ASTM C430. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [16] ASTM (2016). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. ASTM C188. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [17] ASTM (2015). Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. ASTM C1611. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [18] ASTM (2015). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [19] ASTM (2015). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM C469. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [20] ASTM (2015). Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading). ASTM C1609. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [21] ASTM (2015). Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression. ASTM C512. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [22] ASTM (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM C618. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [23] Portland Concrete Association. (1996). *Design and Control of Concrete Mixtures*, Skokie, Illinois, United State.
- [24] ปิยนัฐ เจริญอำนาจสุข (2563). *ศึกษาสมบัติเชิงกลและการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตผสมรณณะสูงที่ใช้เถ้าก้นเตาและเถ้าลอยร่วมกับเถ้าลอยและผงหินปูน*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 115 หน้า.
- [25] Afroughsabet V., and Ozbakkaloglu T. (2015). Mechanical and Durability Properties of High- strength Concrete Containing Steel and Polypropylene Fibers. *Construction and Building Materials*, 94, pp. 73-82.

- [26] American Concrete Institute (ACI) Committee. *Report on High-Strength Concrete*. ACI363 R. American Concrete Institute, 2010
- [27] Zhou F.P., Lydon F.D., and Barr B.I.G. (1995). Effect of Coarse Aggregate on Elastic Modulus and Compressive Strength of High Performance Concrete. *Cement and Concrete Research*, Volume 25 No.1, pp. 177-186.
- [28] Beushausen H., and Dittmer T. (2015). The Influence of Aggregate Type on The Strength and Elastic Modulus of High Strength Concrete. *Construction and Building Materials*, 74, pp. 132-139.
- [29] Chen H.-J., Yu Y.-L., and Tang C.-W. (2020). Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete before and after Exposure to High Temperatures. *Materials*, 13, pp. 770-786.
- [30] Gutierrez P.A., and Canovas M.F. (1995). The modulus of elasticity of high performance concrete. *Materials and Structures*, 28, pp. 559-568.
- [31] Marzouk H. (1991). Creep of High-strength Concrete and Normal-strength Concrete. *Magazine of Concrete Reserach*, 43, No.155, pp. 121-126.
- [32] Afroughsabet V., Teng S. (2020). Experiments on Drying Shrinkage and Creep of High Performance Hybrid-fiber-reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 106, 103481.
- [33] Zhao Q., Yu J., Geng G., Jiang J., and Liu X. (2016). Effect of Fiber Types on Creep Behavior of Concrete. *Construction and Building Materials*, 105, pp. 416-422.
- [34] Chern J.-C., and Youngt Y.-H. (1989). Compressive Creep and Shrinkage of Steel Fiber Reinforced Concrete. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Volume 11 No.4, pp. 205-214.