ผลกระทบของเส้นใยเหล็กต่อสมบัติเชิงกลและการคืบของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด

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

ณัฐวัตร เหมือนเหลา* วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

Corresponding author; E mail address nattawat mhuan@gmail com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเชิงกลและการคืบของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียด (GBA) เป็นวัสดุประสานร่วมกับเส้นใยเหล็ก โดยใช้เถ้าก้นเตาที่มีความละเอียดสูง (มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 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 ควบคุมค่าการไหลแผ่ระหว่าง 650-750 มม. และควบคุมระยะเวลาของการไหลถึง 500 มม อยู่ในช่วงระหว่าง 5-20 วินาที ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดปริมาณสูงร่วมกับเส้นใยเหล็กชนิดงอปลายร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร สามารถพัฒนากำลังอัด และกำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน สูงถึง 80.4 และ 10.2 เมกะปาสคาล ตามลำดับ การเพิ่มขนาดความยาวของเส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงดัดและค่าความเหนียวให้กับคอนกรีต นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของเส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีค่าการคืบที่ลดลง

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 d 8L[0] TJETQ FMC P MCID 87 BDC 0000008869 0 5952 8418 reW nBTE

เถ้าก้นเตาเพื่อนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตกำลังสูง โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเถ้าก้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 จากนั้นนำไปบดละเอียดเพื่อให้อนุภาคมีขนาดค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 1 สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี อีกทั้งสามารถปรับปรุง หรือเพิ่มสมบัติบางประการให้กับคอนกรีตได้อีกด้วย [1-2]

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

อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีงานวิจัยมากมายได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ผสมเส้นใยเหล็ก แต่หากพูดถึงการศึกษาผลกระทบของชนิด รูปร่าง และปริมาณของเส้นใยเหล็กต่อพฤติกรรมในระยะยาวของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำค้าง หรือการคืบนั้นยังคงมีน้อย อีกทั้งเนื่องจากในปัจจุบันนี้มีการต่อเติมและเพิ่มจำนวนชั้นของอาคารสูงที่มากขึ้น ส่งผลให้การรับน้ำหนักขององค์อาคารเพิ่มขึ้น นำมาซึ่งการออกแบบโครงสร้างที่จำเป็นต้องพิจารณาการคืบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการใช้เถ้าเตาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมากร่วมกับเส้นใยเหล็กที่มีรูปร่าง ความยาว และปริมาณที่แตกต่างกันเพื่อนำไปใช้ได้จริงในงานคอนกรีตสมรรถนะสูง อาทิ เช่น งานก่อสร้างอาคารสูง เป็นต้น โดยทำการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ กำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น กำลังรับแรงดัดและการคืบของคอนกรีต

2. วัสดุและวิธีการศึกษา

2.1

การศึกษาครั้งนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) และใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียด (GBA) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า จังหวัดระยอง ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 จากนั้นนำไปบดละเอียดให้มีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มความว่องไวในการทำปฏิกิริยา

2.2

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

2.3

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



(ก) (ข) (ค)

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

2.4

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

2.5

สมบัติทางกายภาพของเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่ทำการทดสอบ 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

T^{50}

70GBA *GBA SFXX Y Y*

XX *Y Y*

นำเถ้าก้นเตาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้เส้นใยเหล็กชนิดตรง ความยาว 13 และ 20 มม. และเส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย ความยาว 35 มม. ในส่วนผสมคอนกรีตอัตราส่วนร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีต และใช้เส้นใยเหล็กชนิดงอปลายในอัตราร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีตอีกหนึ่งส่วนผสม ทุกส่วนผสมกำหนดปริมาณวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 600 กก/ม^3 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.27 ทำการควบคุมค่าการไหลแผ่ระหว่าง 650-750 มม. และควบคุมระยะเวลาของการไหลถึง 500 มม. อยู่ในช่วงระหว่าง 5-20 วินาที โดยการใช้สารลดน้ำพิเศษ ซึ่งในเบื้องต้นส่วนผสมดังกล่าวนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองใช้กับคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แล้วพบว่า คอนกรีตนอกจากมีความสามารถในการทำงานที่ดีขึ้นและมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่าคอนกรีตควบคุมแล้ว ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้นยังคงเพียงพอที่จะทำให้เกิดกำลังอัดในช่วงอายุต้น (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] ทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุ 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 จากนั้นทำการเก็บผลการทดสอบทุกสัปดาห์จนถึงระยะเวลา 91 วัน



รูปที่ 2 การทดสอบการคืบของคอนกรีต

3. ผลการทดสอบ

3.1

ตารางที่ 3 แสดงสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าก้นเตาบดละเอียด พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีขนาดอนุภาคค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 11.35 โดยน้ำหนัก ในขณะที่เถ้าก้นเตาบดละเอียดมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรง 325 เท่ากับร้อยละ 0.44 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเถ้าก้นเตาที่มีความละเอียดสูงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานดีขึ้น [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 และเถ้าก้นเตาบดละเอียด ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียดมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 63.2 และมีผลรวมของปริมาณ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 94.9 ซึ่งสอดคล้องกับวัสดุปอซโซลาน Class F ที่กำหนดไว้โดยมาตรฐาน ASTM C618 [22] ที่ระบุไว้ว่าผลรวมของปริมาณ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก รวมทั้งปริมาณของ SO_3 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_2O_3)	4.8	24.4
Ferric oxide (Fe_2O_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_2O)	0.3	0.4
Potassium oxide (K_2O)	0.4	1.3
Loss of ignition (LOI)	2.9	0.2

3.2

ตารางที่ 2 แสดงส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงและค่าการไหลแผ่ของคอนกรีต พบว่าการใช้เส้นใยเหล็กทำให้ความสามารถในการไหลของคอนกรีตลดลง สาเหตุเนื่องจากการเกาะกลุ่ม และการขัดกันระหว่างเส้นใยในส่วนผสมคอนกรีต อีกทั้งเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเนื้อคอนกรีตขึ้น ทำให้ความสามารถในการไหลของคอนกรีตมีค่าลดลง [9,13] ดังนั้นคอนกรีตในงานวิจัยนี้จึงจำเป็นที่จะต้องใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อให้คอนกรีตยังคงมีความสามารถในการไหลที่ดี โดยคอนกรีต 70GBA มีค่าการไหลแผ่ 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 ในณะที่ระยะเวลาของการไหลที่ 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

รูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับเส้นใยเหล็กมีค่ากำลังอัดที่สามารถจัดให้เป็นคอนกรีตสมรรถนะสูงได้ [23] ซึ่งมีค่ากำลังอัดมากกว่า 28 และ 70 เมกะปาสคาล ที่อายุ 3 และ 28 วัน ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่แทนที่เถ้าก้นเตาบดละเอียดในปริมาณสูง (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) เป็นผลมาจากการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าก้นเตาด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 จากนั้นถูกนำไปบดละเอียดจนมีอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้เถ้าก้นเตามีขนาดอนุภาคที่ลดลง สามารถเข้าไปอุดโพรงช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่เพิ่มสูงขึ้นแม้อยู่ในช่วงอายุต้น นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ดี ส่งผลให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นในช่วงอายุปลาย [2,24]

นอกจากนี้เมื่อเทียบกับคอนกรีต 70GBA-SF35-0.5 การเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย (70GBA-SF35-1.0) มีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีค่ากำลังกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น 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 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดความยาวของเส้นใยส่งผลกระทบเล็กน้อยต่อกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoo และคณะ [7] และ Abbas และคณะ [8] ที่ศึกษาอิทธิพลของความยาวของเส้นใยต่อคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ พบว่าคอนกรีตที่ใช้

เส้นใยเหล็กที่มีความยาวกว่า ให้ค่ากำลังอัดที่มากกว่าคอนกรีตที่ใช้เส้นใยเหล็กที่ขนาดสั้นกว่าเล็กน้อย

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กและคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเส้นใยเหล็ก

3.4

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วันทุกส่วนผสม แสดงดังรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากสมการ ACI363 [26] พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบมีแน้วโน้มที่ต่ำกว่าทั้งหมด 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 ไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตสมรรถนะสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen และคณะ [29] ที่พบว่าการผสมเส้นใยในคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษไม่ส่งผลกระทบต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และงานวิจัยของ Abbas และคณะ [8] ที่ศึกษาผลกระทบของความยาว และปริมาณของเส้นใยเหล็กต่อคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ พบว่าคอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 2 ดังนั้นจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตไม่ได้ขึ้นอยู่กับเส้นใยเหล็ก หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กและเนื้อคอนกรีต แต่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวม และการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมเป็นหลัก [30]

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและรากที่สองของกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง

3.5

การศึกษากำลังรับแรงดัดและพฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีต สำหรับการศึกษาครั้งนี้เป็นการทดสอบแบบแรงดัด 4 จุด (4-points bending) ซึ่งค่ากำลังรับแรงดัดคำนวณได้จากสมการ $f = PL/bh^2$ โดยที่ f คือค่ากำลังรับแรงดัด, P คือแรงสูงสุดที่กระทำต่อตัวอย่าง, b คือความกว้างของตัวอย่าง, และ h คือความสูงของตัวอย่าง ในขณะที่ค่าความเหนียว (Toughness) ของคอนกรีตคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวของคอนกรีต

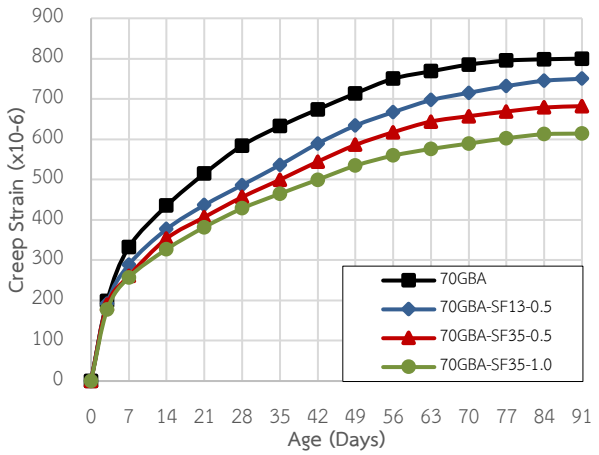
เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการรับแรงดัดจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำและการโก่งตัวของคอนกรีตที่แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าพฤติกรรมก่อนการแตกร้าว (Pre-cracking) ของคอนกรีตทุกส่วนผสมมีลักษณะเป็นกราฟเชิงเส้น แสดงให้เห็นว่าเส้นใยเหล็กมีส่วนสำคัญน้อยมากต่อการรับแรงดัดในช่วงดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามภายหลังจากคอนกรีตเกิดรอยร้าว (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] นอกจากนี้เมื่อพิจารณากำลังรับแรงดัดและความเหนียส

ค่าเท่ากับ 5.0 เมกะปาสคาล ในขณะที่คอนกรีต 70GBA-SF35-0.5 มีค่ากำลังรับแรงดัดที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิดอื่นในปริมาณเท่ากัน สาเหตุเนื่องจากเส้นใยเหล็กชนิดนี้มีรูปร่างที่มีการดัดงอ ซึ่งมีส่วนช่วยให้เกิดกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเนื้อคอนกรีต (Fiber-matrix bond strength) สูง [4] แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาพฤติกรรมการรับแรงดัดภายหลังคอนกรีตเกิดรอยร้าว 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]

ทห

แลด

คอนกรีต 70GBA-SF13-0.5 และคอนกรีต 70GBA-SF35-0.5 ในปริมาณเท่ากัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิดงอปลายช่วยลดการคืบของคอนกรีตได้มากกว่า สาเหตุเนื่องจากเส้นใยเหล็กชนิดนี้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูง อีกทั้งมีความสามารถในการยึดเหนี่ยวที่ดี ทำให้มีความสามารถในการยับยั้งการเกิดรอยร้าวภายในคอนกรีตเนื่องจากการคืบได้มากขึ้น [32,34] ส่งผลให้ค่าการคืบของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิดอื่น เช่นเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กชนิดงอปลายในคอนกรีต (70GBA-SF35-1.0) พบว่าค่าการคืบของคอนกรีตมีค่าลดลงมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chern และ Youngt [31] และ Zhao และคณะ [34] ที่พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของเส้นใยเหล็กในคอนกรีตส่งผลให้การคืบของคอนกรีตมีค่าลดลงยิ่งขึ้น



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุและการคืบของคอนกรีต

4. สรุปผลการทดสอบ

1. คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดในปริมาณสูง (70GBA) สามารถจัดเป็นคอนกรีตสมรรถนะสูงได้ตั้งแต่ช่วงอายุต้น โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 3 วัน มีค่าเท่ากับ 30.8 เมกะปาสคาล และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 70.8 และ 83.6 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

2. การผสมเส้นใยเหล็กมีส่วนทำให้ค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตลดลง โดยค่าการไหลแผ่จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขนาดความยาวและปริมาณของเส้นใยเหล็ก

3. การเพิ่มขึ้นของความยาวของเส้นใยเหล็ก (70GBA-SF20-0.5) ช่วยให้คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงดัด และค่าความเหนียวที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กที่มีขนาดความยาวที่สั้นกว่า (70GBA-SF13-0.5)

4. การผสมเส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย (70GBA-SF35-0.5) มีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัด และกำลังรับแรงดัดที่สูงที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม คอนกรีต 70GBA-SF35-0.5 มีค่าความเหนียวที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิดตรง (70GBA-SF20-0.5)

5. คอนกรีต 70GBA-SF35-1.0 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษาครั้งนี้เพราะมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงถึง 80.4 เมกะปาสคาล และสามารถพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุ 90 วัน ได้ถึง 99.7 เมกะปาสคาล ในขณะเดียวกันการเพิ่มปริมาณของเส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงดัด และค่าความเหนียวที่เพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าสูงถึง 10.2 เมกะปาสคาล และ 85.1 จูลส์ ตามลำดับ อีกทั้งมีส่วนช่วยให้การคืบของคอนกรีตมีค่าลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น

6. 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 และสามารถผลักดันการใช้เถ้าก้นเตาให้เป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมคอนกรีต เพื่อลดต้นทุนการก่อสร้าง และทำให้องค์อาคารนั้นเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้สามารถนำองค์ความรู้ไปพัฒนาต่อยอดหรือเป็นแนวทางในการวิจัยต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

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

เอกสารอ้างอิง

[1] ชลดรงค์ เจริญไวยเจตน์ (2560). . วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 110 หน้า.

[2] บุษรา มีนยุทธ์, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2562). คอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดปริมาณสูง. , Vol.7 No.2, หน้า 14-24.

[3] 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 เจริญอำนวยสุข (2563).

. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต 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.