พฤติกรรมของมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยเหล็กชนิดงอปลายปริมาณสูง ในการรับแรงดึง และแรงดัด

BEHAVIOR OF HIGH VOLUME HOOKED-END STEEL FIBER REINFORCE MORTAR IN TENSILE STRENGTH AND FLEXURAL STRENGTH

ประเทือง กันธสมาส

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พฤติกรรมของมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยเหล็กชนิดงอปลายปริมาณสูง ในการรับแรงดึง และแรงดัด

ประเทือง กันธสมาส

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมของมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย ปริมาณสูงในการรับแรงดึง และแรงดัด Behavior of High Volume Hooked-end Steel Fiber Reinforce Mortar in Tensile Strength and Flexural Strength
ชื่อ - นามสกุล	นายประเทือง กันธสมาส
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_________________________ ประธานกรรมการ
(อาจารย์หมิง จิ๋ง, D.Eng.)

_________________________ กรรมการ
(อาจารย์ณัฐพงศ์ มกระธัช, ปร.ด.)

_________________________ กรรมการ
(อาจารย์บุญชัย ผึ้งไผ่งาม, ปร.ด.)

_________________________ กรรมการและเลขานุการ
(อาจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

_________________________ คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 18 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมของมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยเหล็กชนิดงอปลายปริมาณสูง ในการรับแรงดึงและแรงดัด
ชื่อ - นามสกุล	นายประเทือง กันธสมาส
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

คอนกรีตหรือมอร์ต้าร์เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีคุณสมบัติที่ดีด้านกำลังรับแรงอัด แต่เนื่องจากเป็นวัสดุเปราะมีความสามารถรับแรงดึงได้น้อยและมีความยืดหยุ่นต่ำ จึงมีความพยายามปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าว ด้วยการนำวัสดุเหนียวมาใช้เป็นส่วนผสม มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงเป็นหนึ่งในกลุ่มผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มีประสิทธิภาพสูง ความสามารถในการรับน้ำหนัก การแอ่นตัวและยืดหยุ่นได้มากกว่าคอนกรีตธรรมดา ในการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยเหล็กชนิดงอปลายปริมาณสูงในการรับแรงดึงและแรงดัด

การทดสอบใช้เส้นใยเหล็กชนิดงอปลายขนาด 0.75 x 50 และ 0.75 x 60 มิลลิเมตร ปริมาณส่วนผสมของเส้นใยเหล็กร้อยละ 7 โดยปริมาตร อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 : 0, 1 : 1 และ 1 : 2 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน การทดสอบแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร การทดสอบแรงดัดโดยใช้ตัวอย่างขนาด 10 x 10 x 50 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับการทดสอบแรงดัดของคานมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร ขนาด 10 x 10 x 50 เซนติเมตร โดยใช้ปริมาณของน้ำหนักเหล็กเสริมเท่ากับปริมาณของเส้นใยเหล็ก

จากผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดของมอร์ต้าร์ลดลงตามส่วนผสมของทรายที่เพิ่มขึ้น แต่กำลังอัดของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงมีค่ามากขึ้นตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้น ส่วนกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกและแรงดัดของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง มีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1 มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกมากกว่า 60 มิลลิเมตร แต่มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 60 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดัดมากกว่า 50 มิลลิเมตร และมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น มีกำลังรับแรงดัดมากกว่ามอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง

คำสำคัญ : เส้นใยเหล็กปริมาณสูง เส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด

Thesis Title	Behavior of High Volume Hooked-end Steel Fiber Reinforce Mortar in Tensile Strength and Flexural Strength
Name - Surname	Mr. Pratuang Kuntasamas
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Mr. Jatuphon Tangpagasit, Ph.D.
Academic Year	2013

ABSTRACT

Concrete or mortar is the material which good properties and compressive strength. Due to brittle material has low tensile and flexibility strength. Therefore, it has been developed such properties with ductility materials used in the mix. High volume hooked-end steel fiber reinforce mortar is one of the product which high-performance concrete. The ability to gain weight, deflection and flexibility than normal concrete. In this research, has been studied the behavior of high volume hooked-end steel fiber reinforce mortar in tensile strength and flexural strength.

Test using steel fiber size of 0.75 x 50 and 0.75 x 60 mm the maximum of steel fiber is 7% by volume, cement to sand ratio were investigated at 1: 0, 1: 1 and 1: 2 by weight , w/c was kept at 0.55 and test the age at 28 days.The compressive strength, splitting tensile using a cylinder diameter of 10 cm and high 20 cm test flexural strength beam specimens with a dimension of 10 x 10 x 50 cm and test flexural strength of mortar reinforced RB 9 mm beam specimens with a dimension of 10 x 10 x 50 cm by the weight RB 9 as steel fiber.

The results showed that the compressive strength of mortar is decreased by increasing ratio of sand in mortar, but steel fiber mortar has higher compressive strength with the increase of sand ratio. The splitting tensile strength and flexural strength of steel fiber reinforced mortar volume. The maximum ratio of cement to sand 1 : 1. Mortar reinforced steel fiber length of 50 mm has been splitting tensile strength more than 60 mm, but the mortar reinforced steel fiber length of 60 mm has been flexural strength more than 50 mm The flexural strength of mortar reinforced RB 9 mm more than steel fiber reinforced mortar.

Keywords : high volume steel fiber, hooked-end steel fiber, tensile strength, flexural strength

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.หมิง จิ๋ง ประธานกรรมการสอบ ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช ผู้ทรงคุณวุฒิ และ ดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งาม กรรมการสอบ และ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท สยามเกเบียน จำกัด และ บริษัท เอส อาร์ ไฟเบอร์ จำกัด ที่ให้การอนุเคราะห์วัสดุเส้นใยเหล็กมาใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือรวมทั้งวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและประสิทธิประสาทความรู้วิชาการต่าง ๆ ให้ตลอดระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนพัฒนาบุคลากรตลอดระยะเวลาในการศึกษาของผู้วิจัย

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ประเทือง กันธสมาส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... (3)

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... (4)

กิตติกรรมประกาศ ..... (5)

สารบัญ ..... (6)

สารบัญตาราง ..... (9)

สารบัญรูป ..... (10)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... (11)

บทที่ 1 บทนำ 12

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 12

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 13

1.3 ขอบเขตของการศึกษา 14

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 14

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 15

2.1 บทนำ 15

2.2 ปูนซีเมนต์ 15

2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน 17

2.4 มวลรวมละเอียด 18

2.4.1 แหล่งที่เกิดของทราย 18

2.4.2 ขนาดของทราย 18

2.5 มอร์ต้าร์ (Mortar) 19

2.6 เส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) 19

2.7 มอร์ต้าร์ผสมเส้นใยเหล็ก (Mortar Mixed with Steel Fiber) 20

2.7.1 โครงสร้างของมอร์ต้าร์ผสมเส้นใย (Structure of Fiber Reinforced Mortar) 20

2.7.2 หลักการทำงานของเส้นใย 22

2.7.3 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 23

2.8 กำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) 24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.9 กำลังต้านทานแรงดัด (Flexural Strength) ... 26
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ... 28
2.11 กรอบแนวคิดของการวิจัย ... 32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย ... 33
3.1 งานวิจัยที่ทำการศึกษา ... 33
3.2 วัสดุ ... 33
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ... 34
3.4 ขั้นตอนการศึกษา ... 34
3.5 อัตราส่วนผสมคอนกรีต ... 35
3.6 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ ... 38
3.7 การทดสอบตัวอย่าง ... 40
3.8 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ ... 40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ ... 41
4.1 มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง ... 41
4.1.1 กำลังรับแรงอัด ... 41
4.1.2 รูปแบบการวิบัติ (Failure Pattern) จากการทดสอบกำลังรับแรงอัด ... 42
4.1.3 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก ... 45
4.1.4 รูปแบบการวิบัติ (Failure Pattern) จากการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีก ... 47
4.1.5 กำลังรับแรงดัด ... 50
4.1.6 รูปแบบการวิบัติ (Failure Pattern) จากการทดสอบแรงดัด ... 52
4.2 มอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น ... 58
4.2.1 กำลังรับแรงดัด ... 58
4.2.2 รูปแบบการวิบัติ (Failure Pattern) จากการทดสอบแรงดัดของคาน
มอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น ... 68
4.3 กำลังรับแรงดัดของคานมอร์ต้าร์ ... 61
4.3.1 คานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง ... 61

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2 คานมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลม 61
4.4 ค่าใช้จ่ายของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงกับมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลม 62
4.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงกับมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น 62
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 63
5.1 สรุปผลการทดลอง 63
5.2 ข้อเสนอแนะ 64
รายการอ้างอิง 65
ภาคผนวก 68
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณหาวัสดุผสมต่อลูกบาศก์เมตร 72
ภาคผนวก ข รายการคำนวณมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร 72
ภาคผนวก ค รูปบรรยายประกอบงานวิจัย 86
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบและตารางการคำนวณ 98
ภาคผนวก จ ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์และเผยแพร่ 111
ประวัติผู้เขียน 119

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 16
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) 34
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก 37
ตารางที่ 3.3 ปริมาณวัสดุที่ใช้สำหรับอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ 1 ลูกบาศก์เมตร 38
ตารางที่ 4.1 กำลังรับแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต 56

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การเรียงตัวแบบเป็นระเบียบ (Continuous Reinforcement) ... 21
รูปที่ 2.2 การเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (Discontinuous Reinforcement) ... 21
รูปที่ 2.3 การทดสอบหากำลังรับต้านทานแรงดึง ... 25
รูปที่ 2.4 การทดสอบหาความต้านทานแรงดัด ... 27
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการศึกษา ... 36
รูปที่ 3.2 แสดงการจัดวางเส้นใยเหล็กและการหล่อตัวอย่าง ... 39
รูปที่ 4.1 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีต ... 42
รูปที่ 4.2 ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด C, C1S และ C2S ... 43
รูปที่ 4.3 ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด C-SF 50, C1S-SF 50 และ C2S-SF 50 ... 44
รูปที่ 4.4 ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด C-SF 60, C1S-SF 60 และ C2S-SF 60 ... 45
รูปที่ 4.5 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของตัวอย่างคอนกรีต ... 46
รูปที่ 4.6 ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก C, C1S และ C2S ... 48
รูปที่ 4.7 ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก C-SF 50, C1S-SF 50 และ C2S-SF 50 ... 49
รูปที่ 4.8 ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก C-SF 60, C1S-SF 60 และ C2S-SF 60 ... 49
รูปที่ 4.9 กำลังดัดของคานมอร์ต้าร์และคานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก ... 51
รูปที่ 4.10 กำลังดัดของคานมอร์ต้าร์และคานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กอัตราส่วนผสม 1:0, 1:1 และ 1:2 ... 52
รูปที่ 4.11 ผลจากการทดสอบแรงดัด C, C1S และ C2S ... 53
รูปที่ 4.12 การทดสอบและผลจากการทดสอบแรงดัด C-SF 50, C1S-SF 50 และ C2S-SF 50 ... 54
รูปที่ 4.13 การทดสอบและผลจากการทดสอบแรงดัด C-SF 60, C1S-SF 60 และ C2S-SF 60 ... 55
รูปที่ 4.14 กำลังดัดของคานมอร์ต้าร์เสริมเหล็ก RB-9 ... 59
รูปที่ 4.15 กำลังดัดของคานมอร์ต้าร์ คานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก และคานมอร์ต้าร์เสริมเหล็ก RB-9 ... 59
รูปที่ 4.16 การทดสอบและผลจากการทดสอบแรงดัด C-RB 9, C1S-RB 9 และ C2S-RB 9 ... 60

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

b	ความกว้างเฉลี่ยของคานคอนกรีตที่รอยแตกร้าว, ซม.
c	ระยะจาก Neutral Axis ถึงผิวนอกของคาน, ซม.
C	ปูนซีเมนต์
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างทรงกระบอก, ซม.
d	ความลึกเฉลี่ยของคานคอนกรีตที่รอยแตกร้าว, ซม.
f_c'	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปอนด์ต่อตารางนิ้ว
f_t	โมดูลัสของการแตกหักปอนด์ต่อตารางนิ้ว
I	Moment of inertia ของหน้าตัด, ซม.^{3}
k	ค่าคงที่มีค่าอยู่ระหว่าง 8 ถึง 10
l	ความยาวของแท่งตัวอย่างทรงกระบอก, ซม.
L	ช่วงความยาวของคานระหว่างจุดรองรับ (Span length), ซม.
M	ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่หน้าตัด, กก.- ซม.
P	แรงกดสูงสุด, กก.
R	โมดูลัสของการแตกหัก, กก./ซม.^{2}
RB	เหล็กเส้นกลม
S	ทราย
SF	เส้นใยเหล็ก
T	ความต้านทานแรงดึงแยกของคอนกรีต, กก./ซม.^{2}
W	น้ำ

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้วัสดุก่อสร้างมีคุณภาพและประสิทธิภาพในการใช้งาน โดยเฉพาะการเสริมเส้นใยเหล็กในคอนกรีตหรือมอร์ต้าร์เป็นการพัฒนาวัสดุในรูปแบบหนึ่งที่ใช้ในการก่อสร้างคล้ายกับการเสริมเหล็กในคอนกรีตโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการรับแรงดึงให้กับคอนกรีตและประสิทธิภาพที่แสดงถึงความยืดหยุ่นของโครงสร้างที่สูงขึ้น ซึ่งโครงสร้างของอาคารโดยส่วนใหญ่จะเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ทนทาน ประหยัดและยังสามารถก่อสร้างให้มีรูปร่างต่างๆตามรูปแบบสถาปัตยกรรมได้ แต่อย่างไรก็ตามคอนกรีตเป็นวัสดุเปราะและมีความยืดหยุ่นต่ำซึ่งเป็นจุดด้อย จึงมีความพยายามที่จะหาวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวด้วยการนำวัสดุที่มีความเหนียวมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต เช่น เส้นใยเหล็ก เส้นใยแก้ว เส้นใยสังเคราะห์อะคลิลิก เส้นใยโพลิโพรพิลีน หรือกราไฟท์ ซึ่งความสามารถในการรับแรงดึงจะขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้เส้นใยเหล็กเสริมแรง ซึ่งมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงเป็นหนึ่งในกลุ่มผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความสามารถในการรับแรงได้มากกว่าคอนกรีตธรรมดา จึงสามารถออกแบบให้โครงสร้างมีความหนาน้อยกว่าโครงสร้างคอนกรีตปกติ แต่มีความสามารถในการรับน้ำหนัก การแอ่นตัวและยืดหยุ่นได้มากกว่า จากข้อดีของการใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยปริมาณสูง ทำให้เหมาะสำหรับงานก่อสร้างพิเศษหรือก่อสร้างที่มีพื้นที่จำกัด แต่ต้องการรับน้ำหนักสูง

เส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) เป็นวัสดุเส้นใยชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาผสมในคอนกรีตเพื่อเสริมคุณสมบัติในการที่จะทำให้คอนกรีตมีความเหนียว (Ductility) และมีความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ดี (Energy Absorbtion) หลักของการใช้เส้นใยผสมลงในคอนกรีตก็คือ การยึดรั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของคอนกรีตเมื่อถูกแรงกระทำ ซึ่งถ้าเส้นใยมีค่ากำลังรับแรงและมีแรงยึดเหนี่ยวกับมอร์ต้าร์ที่เพียงพอจะทำให้สามารถยับยั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นได้ หรือทำให้คอนกรีตยังคงรับแรงอยู่ได้ในขณะที่ค่าความเครียดเพิ่มสูงขึ้น ความสามารถของคอนกรีตที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหักเรียกว่า ความเหนียว (Toughness) ซึ่งคุณสมบัติด้านความเหนียวและค่าการดูดซับพลังงานของคอนกรีตสามารถทดสอบได้จากแรงดัด (Flexural Toughness) และแรงดึง (Tensile Strength) [1, 2]

มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง (Sifcon) คือ หนึ่งในกลุ่มผลิตภัณฑ์คอนกรีตประสิทธิภาพเป็นผลิตภัณฑ์กลุ่มเพิ่มเติมที่ขยายมาจากกลุ่มคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ส่วนผสมของ Sifcon ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ และทราย ด้วยอัตราส่วน 1 : 1 และเสริมด้วยเส้นใยเหล็กปริมาณสูง ข้อดีของ Sifcon ให้ความหนาน้อยกว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและคอนกรีตปกติ แต่มีความสามารถในการรับน้ำหนัก มีการแอ่นตัวและยืดหยุ่นได้มากกว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและคอนกรีตปกติ [1, 2] เหมาะสำหรับงานก่อสร้างที่มีพื้นที่จำกัดแต่ต้องการกำลังรับน้ำหนักได้สูง มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง เป็นการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่แตกต่างกันในการผลิตเดิม คือ คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กหรือมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง เป็นวัสดุเพื่อใช้สำหรับการใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น การซ่อมผิวทางและผิวพื้นสะพานการซ่อมโครงสร้างสะพาน ซ่อมคานคอนกรีตอัดแรง เสริมพื้นสะพาน โครงสร้างหลังคาโค้งโครงสร้างนิรภัยและโครงสร้างที่ป้องกันแรงกระแทกและมีการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำตลอดเวลาเพราะมีคุณสมบัติในการดูดซับพลังงานที่ดี เนื่องจากโครงสร้างมีการยืดหยุ่นที่ดีเป็นพิเศษ

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการทดลองเพื่อการศึกษาคุณสมบัติในด้านกำลังรับแรงดึง และแรงดัดของมอร์ต้าร์ที่มีอัตราส่วนผสมแตกต่างกัน เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง ที่มีความยาวไม่เท่ากันและเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงดัด ของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงกับมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงในการรับแรงดึง และแรงดัด

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ล้วนและปูนซีเมนต์ผสมทราย

1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงที่ใช้ขนาดความยาวของเส้นใยเหล็กที่แตกต่างกัน

1.2.4 เพื่อศึกษาคุณสมบัติในการรับแรงดัดของมอร์ต้าร์ มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงและมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.3.2 เส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย 2 ขนาด คือ 0.75 x 50 มิลลิเมตร และ 0.75 x 60 มิลลิเมตร

1.3.3 ทดสอบการรับแรงดึงแบบผ่าซีก และแรงดัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ และมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ล้วน ปูนซีเมนต์ผสมทราย และการเสริมเส้นใยเหล็กที่มีขนาดความยาวแตกต่างกัน

1.3.4 ทดสอบการรับแรงดัดของมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น

1.3.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง ที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ล้วนและปูนซีเมนต์ผสมทราย ในอัตราส่วน 1 : 1 และ 1 : 2

1.3.6 เปรียบเทียบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงที่มีขนาดความยาวของเส้นใยเหล็กแตกต่างกัน

1.3.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติในการรับแรงดัดของมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงกับมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงคุณสมบัติในการรับแรงดึงและแรงดัดของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก

1.4.2 ทราบและเลือกใช้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กเพื่อนำมาใช้ในการก่อสร้าง

1.4.3 ทราบและเลือกใช้ความยาวของเส้นใยเหล็กให้เหมาะสมกับการใช้งานของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก

1.4.4 สามารถเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายและเลือกใช้มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กให้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภท

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ความสามารถในการรับน้ำหนักหรือแรงกระทำของโครงสร้างที่ก่อสร้างโดยใช้วัสดุก่อสร้างมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมของมอร์ต้าร์ ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ ทราย และเส้นใยเหล็ก ซึ่งวัสดุดังกล่าวต้องมีคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่ดี

2.2 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีตที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) เมื่อผสมกับน้ำตามสัดส่วนที่เหมาะสมจะสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาต่อกัน เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) อัตราการก่อตัวและการแข็งตัวตลอดจนปริมาณความร้อน ขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูนซีเมนต์ ส่วนความแข็งแรงทนทานเมื่อแข็งตัวแล้ว ขึ้นอยู่กับสัดส่วนผสมและการบ่ม

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบหลักที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีอยู่ 4 ชนิด คือ

1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต C_3S ($3CaO.\ SiO_2$) มีอยู่มากที่สุดในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 45 ถึง 55 โดยมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมสีเทาเข้ม เมื่อผสม C_3S กับ น้ำ จะเกิดการก่อตัวและแข็งตัว ซึ่งให้กำลังค่อนข้างดีในช่วงสัปดาห์แรก ปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับ น้ำทำให้เกิดความร้อนปานกลางประมาณ 500 จูลต่อกรัม ดังตารางที่ 2.1 ความร้อนที่คายออกมาเรียกว่า ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration) [3]

2) ไดแคลเซียมซิลิเกต C_2S ($2CaO.\ SiO_2$) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 15 ถึง 35 C_2S บริสุทธิ์มีอยู่หลายรูปแบบมีเพียง βC_2S เท่านั้นที่มีเสถียรภาพในอุณหภูมิปกติ ซึ่งมีคุณสมบัติยึดเกาะ C_2S มีลักษณะเป็นเม็ดกลมดำ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ความร้อนที่เกิดขึ้นค่อนข้างต่ำมีค่าประมาณ 250 จูล/กรัม และการพัฒนากำลังของ C_2S ค่อนข้างช้ากว่า C_3S มากจะเริ่มให้กำลังหลังจาก 4 สัปดาห์ขึ้นไป [3]

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [3]

คุณสมบัติ	**สารประกอบ**			
	C_3S	**C_2S**	**C_3A**	**C_3AF**
อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วกว่า (นาที)
การพัฒนากำลัง	เร็ว (ชม.)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (1วัน)	เร็วกว่า (1 วัน)
กำลังประลัย	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง

3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต C_3A ($3\ CaO.AI_2O_3$) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 7 ถึง 15 ลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมีสีเทาอ่อน จะเกิดปฏิกิริยารุนแรงมากเมื่อผสมกับน้ำ จึงทำให้ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวทันที ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าสูงมาก คือ มากกว่า 800 จูล/กรัม ดังตารางที่ 2.1 การพัฒนากำลังของ C_3A จะเร็วมาก คือ สามารถพัฒนาได้ภายในวันเดียว แต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ C_3S หรือ C_2S [3]

4) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ C_4AF ($4\ CaO.AI_2O_3.Fe_2O_3$) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 และอยู่ในสภาพของสารละลายแข็ง (Solid Solution) เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาและทำให้ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าปานกลางประมาณ 420 จูล/กรัม โดย C_4AF พัฒนากำลังได้เร็วมากเช่นเดียวกับ C_3A แต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำกว่า C_3A เล็กน้อย [3]

2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้น เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน เนื่องจากปูนซีเมนต์ C_3S เป็นสารประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ การเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรไลซิส ปฏิกิริยานี้จะลดลงเนื่องจากการเกิดชั้นเคลือบบาง ๆ ของเอททริงไกต์ การที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นการเพิ่มของอิออนแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกริยาลดลง จากนั้น ซีเมนต์เพสต์มีสภาพเป็นพลาสติกอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก ปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด CSH เพิ่มขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้เอททริงไกต์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนต และเกิดสารประกอบของ C_4 (A, F) H_{13} แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไป ทำให้เกิด CSH มากขึ้นและขยายเข้าไปในโพรง เมื่อมีปริมาณมากขึ้นก็จะเชื่อมโยงจนเกิดการยึดเกาะกัน [4]

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) เป็นสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$), CSH โดยอัตราส่วนของ CaO, SiO_2 และ H_2O เป็นค่าโดยประมาณ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, Ca $(OH)_2$, CH) [4]

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

1) อายุของซีเมนต์เพสต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรก และอัตราจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป จนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2) องค์ประกอบของปูนซีเมนต์พบว่า สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์จะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดแตกต่างกันโดยเฉพาะ C_3S จะมีอยู่ในปูนซีเมนต์มากที่สุดประมาณร้อยละ 45 ถึง 55 ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในระดับดี และอีกสารหนึ่งคือ C_3A มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 7 ถึง 15 ซึ่งตัวนี้ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างดีเยี่ยม

3) ความละเอียดของปูนซีเมนต์ อย่างที่ทราบกันแล้วว่า ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำได้มากผลก็คือปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดในอัตราที่เร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของปฏิกิริยา

4) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ อย่างที่ทราบกันดีว่าถ้าเราเลือกอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อย ๆ จะทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์หรือคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดที่ระยะแรกมากที่สุด ทำให้การพัฒนากำลังอัดได้เร็ว แต่ระยะหลังจาก 28 วัน ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ จึงต้องมีการบ่มเพื่อป้องกันคอนกรีตสูญเสียน้ำ

5) อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2.4 มวลรวมละเอียด

ทรายเป็นวัสดุที่สำคัญชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นส่วนผสมของคอนกรีตและมอร์ต้าร์ (Mortar) ที่นำมาใช้ก่อหรือฉาบทรายได้จากการแตกตัวของหินก้อนใหญ่ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติทำให้ได้หินเม็ดเล็ก ๆ เรียกว่า ทราย ปัจจุบันเครื่องมือและอุปกรณ์ในการเก็บทราย ได้แก่ เรือดูดทราย สามารถนำทรายขึ้นมาใช้อย่างรวดเร็ว

2.4.1 แหล่งที่เกิดของทราย

ทรายธรรมดามีแหล่งที่เกิดอยู่ 2 ลักษณะด้วยกันคือ

1) ทรายบกหรือทรายบ่อ (Pit Sand or Bank Sand) คือ ทรายที่เกิดจากการตกตะกอนทับถมกันของลำน้ำเก่า ซึ่งเปลี่ยนเป็นดิน โดยมีซากพืชซากสัตว์ทับถมเป็นหน้าดินซึ่งอาจอยู่ลึกประมาณ 2-10 เมตร มีลักษณะเป็นเหลี่ยม มีแง่มุมแข็งแรงดี เป็นทรายที่เหมาะแก่การผสมคอนกรีต เพราะการแทรกตัวของทรายจะทำให้เกิดช่องว่างของคอนกรีตลดน้อยลง แต่ทรายบกจะมีข้อเสียคือคือมีดินและซากพืชซากสัตว์ปะปนอยู่ เวลานำทรายไปใช้งานจะต้องล้างหรือทำความสะอาดทรายเสียก่อน ซึ่งปัจจุบันเป็นทรายที่หาได้ยาก

2) ทรายแม่น้ำ (River Sand) คือ ทรายที่เกิดจากการกัดเซาะของกระแสน้ำ ซึ่งทรายละเอียดนั้นจะถูกกระแสน้ำพัดพามารวมกันอยู่ที่ท้ายน้ำ มารวมตัวกันอยู่ในแถบราบลุ่ม ตามท้องแม่น้ำ ลำคลอง ปัจจุบันใช้ทรายชนิดนี้มาก เพราะหาได้ง่ายกว่าทรายบก มีลักษณะกลมเกลี้ยงสะอาด จึงทำให้การประสานกับส่วนผสมของคอนกรีตหรือมอร์ต้าร์ไม่ดีเท่าที่ควร

2.4.2 ขนาดของทราย

ในการก่อสร้างทั่วไป ทรายที่นิยมใช้กันคือ ทรายแม่น้ำ มีอยู่ 3 ขนาดด้วยกัน คือ

1) ทรายหยาบหรือที่เรียกว่า ทรายราชบุรี เป็นทรายเม็ดใหญ่ มีเหลี่ยม แง่มุมแข็งแรงดี เหมาะสำหรับใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่ต้องการความต้านทานกำลังสูง เวลาจะใช้ต้องนำไปร่อนด้วยตะแกรงเพื่อทำความสะอาดเสียก่อน

2) ทรายกลางหรือที่เรียกว่า ทรายอ่างทอง เป็นทรายที่มีขนาดปานกลาง ไม่หยาบและไม่ละเอียดนัก เหมาะสำหรับงานปูนทั่วไป ทรายชนิดนี้เวลาจะใช้จะต้องร่อนเอาเปลือกหอยและสิ่งอื่นๆ ที่ไม่ต้องการออกเสียก่อน

3) ทรายละเอียดหรือที่เรียกว่า ทรายอยุธยา เป็นทรายเม็ดละเอียดมาก นำมาใช้กับงานที่ไม่ต้องรับกำลังมากนักเหมาะสำหรับนำมาเป็นส่วนผสมของปูนฉาบผิวหน้า ก่อนใช้จะต้องร่อนทรายเพื่อขจัดสิ่งต่าง ๆ ที่ไม่ต้องการออก

2.5 มอร์ต้าร์ (Mortar)

โดยทั่วๆ ไปวัสดุสำหรับใช้ผสมทำคอนกรีตประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และสารผสมเพิ่ม ซึ่งมอร์ต้าร์ (Mortar) ถือเป็นองค์ประกอบหนึ่งของคอนกรีต คือ ปูนซีเมนต์ผสมด้วยทรายกับน้ำ แตกต่างจากคอนกรีต (Concrete) ที่ไม่ได้ใส่มวลรวมหยาบ คือ หินหรือกรวด เท่านั้น เมื่อนำวัสดุต่างๆ มาผสมกัน จะอยู่ในสถานะของเหลวที่มีความหนืดเวลาหนึ่ง ซึ่งสามารถนำไปเทลงแบบหล่อได้ตามต้องการ เมื่อเวลาผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง จากของเหลวก็จะเปลี่ยนสถานะมาเป็นของแข็งในที่สุด ซึ่งสามารถรับกำลังอัดได้มากขึ้น ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงเวลาหนึ่งกำลังอัดก็จะเริ่มคงที่ โดยทรายที่นำมาผสมลงในมอร์ต้าร์ได้แก่ ทรายแม่น้ำ มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือที่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 และน้ำที่ใช้จะต้องเป็นน้ำที่สะอาด จะเป็นตัวกลางที่ทำหน้าที่ผสมทรายกับปูนซีเมนต์เข้าด้วยกัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และยังช่วยหล่อลื่นให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทลงในแบบหล่อได้

2.6 เส้นใยเหล็ก (Steel Fiber)

เส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) เป็นวัสดุเส้นใยชนิดหนึ่ง ที่นำมาผสมในคอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตมีความเหนียว (Ductility) และการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption) ให้ดีขึ้น วัตถุประสงค์ของการผสมเส้นใยลงในคอนกรีตก็คือ การลดรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของคอนกรีตเมื่อถูกแรงกระทำ ถ้าเส้นใยมีค่ากำลังรับแรงดึงและมีแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตเพียงพอที่จะสามารถยับยั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นหรือทำให้คอนกรีตยังคงรับแรงอยู่ได้ในขณะที่ค่าความเครียดเพิ่มขึ้น จากการศึกษาพบว่าความสามารถของคอนกรีตที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้ โดยไม่เกิดการแตกหักเรียกว่า ความเหนียว (Toughness) ซึ่งถ้าคุณสมบัติด้านความเหนียวและค่าการดูดซับพลังงานของคอนกรีตสามารถทดสอบได้จากแรงดัด (Flexural Toughness) เมื่อมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยไฟเบอร์ (FMC) ถูกแรงกระทำ Matrix จะเกิดการแตกร้าว (Cracking) จะมีการถ่ายเทแรงกระทำไปยังเส้นใยผ่านทางผิวสัมผัส

หากแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสดี เส้นใยก็จะรับแรงได้อย่างเต็มที่ซึ่งจะทำให้การแตกร้าวหยุดหรือไม่ขยายตัว แต่หากแรงกระทำภายนอกมีค่าสูงกว่ากำลังที่เส้นใย จะรับได้ก็จะทำให้เกิดการยืดตัวจนขาดออก ซึ่งโดยปกติกำลังของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยจะวัดเป็นค่าความเหนียว (Toughness) ซึ่งค่าจะสูงหรือต่ำจะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยด้วย แต่หากแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสไม่ดีก็จะทำให้เส้นใยไม่ได้ช่วยรับแรงอย่างเต็มที่ ซึ่งมีผลทำให้ค่ากำลังที่ได้ต่ำ ด้วยเหตุผลนี้จึงได้มีการออกแบบรูปร่างและผิวสัมผัสของเส้นใยเป็นลักษณะต่างๆกันตามที่ได้กล่าวมา ข้างต้นเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์และเส้นใย ซึ่งจะทำให้คอนกรีตมีความเหนียวขึ้นหรือดูดซับพลังงานได้ดีขึ้น [5]

2.7 มอร์ต้าร์ผสมเส้นใยเหล็ก (Mortar mixed with Steel Fiber)

มอร์ต้าร์เป็นส่วนประกอบหนึ่งในคอนกรีต เพียงแค่มอร์ต้าร์ไม่ได้ผสมมวลรวมหยาบเท่านั้น ซึ่งทั้งมอร์ต้าร์และคอนกรีตมีคุณสมบัติหลักที่ไม่ต่างกัน คือ ความสามารถในการรับกำลังอัดได้ดี แต่ความสามารถในการรับแรงดึงต่ำมาก จึงต้องใส่วัสดุเพิ่มกำลังรับแรงดึง เพื่อลดข้อด้อยลงด้วยการผสมเส้นใยเหล็ก เพื่อการรับแรงดึงได้ดีขึ้นซึ่งมีลักษณะกระจายตัวแบบไม่ต่อเนื่องกัน (Discontinuous Discrete Fiber) หรือไร้ทิศทางในระหว่างการผสม แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ เส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ ใยหิน ฟางข้าว ป่าน ปอ เป็นต้น และเส้นใยสังเคราะห์ ได้แก่ เส้นใยเหล็ก เส้นใยเซรามิค เส้นใยคาร์บอน เส้นใยไนลอน และเส้นใยโพลีโพรพีลีน เป็นต้น [6]

2.7.1 โครงสร้างของมอร์ต้าร์ผสมเส้นใย (Structure of Fiber Reinforced Mortar)

ประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ (ก) มอร์ต้าร์ (Matrix) (ข) เส้นใย (Reinforcement) สำหรับมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber Reinforced Mortar) จัดเป็นวัสดุประกอบผสมเส้นใยชนิดไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Fibrous Composite Material) คือเส้นใยที่ผสมลงไปจะมีการกระจายตัวไปในทิศทางที่ไม่แน่นอนอยู่ทั่วไปในเนื้อมอร์ต้าร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2

รูปที่ 2.1 การเรียงตัวแบบเป็นระเบียบ (Continuous Reinforcement)

รูปที่ 2.2 การเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (Discontinuous Reinforcement)

เนื่องจากมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยไฟเบอร์เป็นวัสดุประกอบดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยไฟเบอร์ ภายใต้สภาวะแรงกระทำต่างๆ จำเป็นต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ดังนี้ โครงสร้างของมอร์ต้าร์ ลักษณะการกระจายตัวของเส้นใย และผิวสัมผัสระหว่างมอร์ต้าร์กับเส้นใย

1) โครงสร้างของมอร์ต้าร์ (Structure of the Matrix)ในมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยไฟเบอร์ โครงสร้างของ Matrix จะหมายถึง มอร์ต้าร์ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติไม่แตกต่างจากคอนกรีตธรรมดา การผสมเส้นใยสำหรับมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยเหล็กโดยทั่วไปจะผสมไม่เกินร้อยละ 20 [1, 2]

2) รูปร่างและลักษณะการกระจายตัวของเส้นใย (Shape and Distribution of the Fibers) เส้นใยที่นำมาใช้ผสมมอร์ต้าร์นั้นมีการออกแบบให้มีรูปร่างที่ต่างกันโดยเส้นใยที่มีรูปร่างต่างกันจะทำให้คุณสมบัติของมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยที่ได้แตกต่างกัน [6]

3) ผิวสัมผัสระหว่าง Matrix และเส้นใย (Structure of the Matrix-Fiber Interface) นอกจากคุณสมบัติทั้ง 2 ข้อที่กล่าวมาแล้วเท่านั้น ผิวสัมผัสระหว่าง Matrix กับเส้นใย ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญมากในการศึกษาคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยเหล็ก เนื่องจากผิวสัมผัสจะมีผลโดยตรงกับค่าแรงยึดเหนี่ยว (Bonding) ระหว่าง Matrix กับเส้นใยสำหรับปัจจัยที่มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง Matrix กับเส้นใย คือลักษณะรูปร่างและชนิดของเส้นใย เส้นใยบางชนิดอาจจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับซีเมนต์และอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพไปตามเวลาบริเวณผิวสัมผัส เช่น เส้นใยหิน (Asbestos) เป็นต้น [6] โดยทั่วไปบริเวณรอบๆผิวของเส้นใยจะพบว่ามีความพรุนมากกว่า บริเวณอื่นเนื่องจากมีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการเยิ้มของคอนกรีตเมื่อน้ำหรือฟองเดินทางขึ้นสู่ด้านบนหากมีเส้นใยกั้นอยู่จะทำให้ไปสะสมรอบๆ เส้นใย [7]

2.7.2 หลักการทำงานของเส้นใย

เมื่อคอนกรีตผสมเส้นใยไฟเบอร์ (FRC) ถูกแรงกระทำ Matrix จะเกิดการแตกร้าว (Cracking) จะมีการถ่ายเทแรงกระทำไปยังเส้นใยผ่านทางผิวสัมผัส หากแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสดีเส้นใยก็จะรับแรงได้อย่างเต็มที่ซึ่งจะทำให้การแตกร้าวหยุดหรือไม่ขยายตัวแต่หากแรงกระทำภายนอกมีค่าสูงกว่ากำลังที่เส้นใยจะรับได้ก็จะทำให้เกิดการยืดตัวจนขาดออก ซึ่งโดยปกติกำลังของคอนกรีตผสมเส้นใยจะวัดเป็นค่าความเหนียว (Toughness) ซึ่งค่าจะสูงหรือต่ำจะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยด้วย แต่หากแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสไม่ดีก็จะทำให้เส้นใยไม่ได้ช่วยรับแรงอย่างเต็มที่ซึ่งมีผลทำให้ค่ากำลังที่ได้ต่ำ ด้วยเหตุผลนี้จึงได้มีการออกแบบรูปร่างและผิวสัมผัสของเส้นใยเป็นลักษณะต่างๆกันตามที่ได้กล่าวมา ข้างต้นเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์และเส้นใยซึ่งจะทำให้คอนกรีตมีความเหนียวขึ้นหรือดูดซับพลังงานได้ดีขึ้น [6]

2.7.3 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

1) กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) โดยทั่วไปการผสมเส้นใย ลงในมอร์ต้าร์ ไม่ได้มีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดโดยตรง แต่อาจมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเล็กน้อยประมาณร้อยละ 10 แต่ถ้าใช้ปริมาณมากเกินไปจะมีผลทำให้กำลังอัดลดลงเนื่องจากปริมาณเส้นใยที่มากมีผลทำให้การแทรกซึมของมอร์ต้าร์ในช่องว่างของเส้นใยเหล็กได้ยาก [6, 8]

2) กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) การผสมเส้นใยลงในมอร์ต้าร์ จะทำให้มอร์ต้าร์มีคุณสมบัติในด้านกำลังรับแรงดึงดีขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากตัวเส้นใยมีความเหนียวและรับแรงดึงได้ดีกว่ามอร์ต้าร์ธรรมดา ในสภาวะที่แรงดึงกระทำเมื่อมอร์ต้าร์เกิดการแตกร้าวหน้าที่หลักของเส้นใยไฟเบอร์คือยับยั้งการขยายตัวของรอยแตก สำหรับการผสมเส้นใยเหล็กลงในมอร์ต้าร์จะทำให้กำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเรียงตัวของเส้นใยมีผลมากกับกำลังรับแรงดึง [6]

3) กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) การผสมเส้นใยเหล็กลงในมอร์ต้าร์ จะมีผลทำให้กำลังดัดของมอร์ต้าร์สูงขึ้นมาก มากกว่าการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังอัดและกำลังดึงทั้งนี้ยังเคยพบว่าค่ากำลังดัดเพิ่มขึ้นมากถึงร้อยละ100 และการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (Aspect Ratio) จะทำให้ค่ากำลังดัดสูงขึ้น [6] ซึ่งความสามารถในการรับแรงดึงและแรงดัดจะดีขึ้นมากเท่าใดก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ เช่น การเรียงตัวของเส้นใยเหล็กแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยเหล็กกับซีเมนต์เพสต์ รวมทั้งรูปร่างของเส้นใยเหล็กเป็นต้น [7]

4) ความเหนียว (Toughness) และการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption) จุดประสงค์หลักของการผสมเส้นใยลงในมอร์ต้าร์ก็คือการยึดรั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของมอร์ต้าร์เมื่อถูกแรงกระทำ ซึ่งถ้าเส้นใยมีค่ากำลังรับแรงและมีแรงยึดเหนี่ยวกับ Matrix ที่เพียงพอจะทำให้สามารถยับยั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นหรือทำให้มอร์ต้าร์ยังคงรับแรงอยู่ได้ในขณะที่ค่าความเครียดเพิ่มขึ้นหรือเรียกว่ามีความเหนียว (Ductility) การวัดค่าความเหนียวที่นิยมใช้คือ Flexural Toughness โดยวัดจากพื้นที่ใต้กราฟของ Complete Load-Deflection Curve in Flexure ค่าที่ได้ก็คือค่า พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทำให้ก้อนคอนกรีตแตกหักหรือเรียกว่าการดูดซับพลังงาน มาตรฐานการวัดค่าความเหนียวสามารถวัดได้มี 2 วิธี คือ ASTM C 1018 และ JSCE SF-4 โดยวิธีแรกจะวัดเป็นค่าดัชนีความเหนียว (พื้นที่ใต้กราฟที่ค่า Deflection จุดที่พิจารณาเป็นกี่เท่าของพื้นที่ใต้กราฟที่เกิดรอยร้าวแรก (First Crack) สำหรับวิธี JSCESF-4 จะวัดค่าที่จุด ๆ เดียว และเนื่องจากเส้นใยแต่ละชนิดจะมีพฤติกรรมภายหลังการเกิดรอยร้าวแรก (First Crack) ที่แตกต่างกัน ดังนั้นวิธีที่สองนี้จะมีข้อด้อยตรงที่ไม่สามารถบอกพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (FRC) ได้ครบ สำหรับคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (FRC) ที่เส้นใยเหล็กไม่เรียบหรือมีการงอปลายหรือมีค่าอัตราส่วนความยาวของเส้นใย (Aspect Ratio) สูง จะให้ค่าความเหนียว

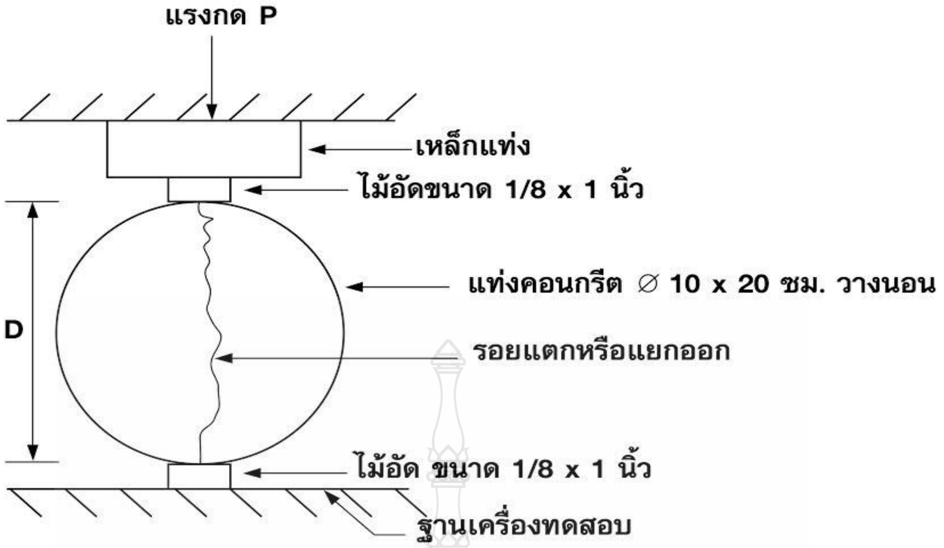
และการดูดซับพลังงานที่มากกว่าเส้นใยเหล็กชนิดผิวเรียบ การเพิ่มปริมาณเส้นใยมีผลทำให้ค่าความเหนียวและค่าการดูดซับพลังงานเพิ่มมากขึ้น การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก ที่สัดส่วนผสมร้อยละ 0.5, 1 และ 1.5 โดยปริมาตรและทำการวัดค่าความเหนียว (Toughness) ตามมาตรฐาน ASTM C1018 พบว่า เส้นใยเหล็กมีผลทำให้คอนกรีตมีค่าความเหนียว และการดูดซับพลังงานดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา สำหรับเส้นใยเหล็กมีการเพิ่มขึ้นของกำลังและความเหนียวตั้งแต่เริ่มมีการแอ่นตัว ส่วนในแง่ปริมาณสัดส่วนผสมของเส้นใยพบว่า การผสมเส้นใยเหล็กมากขึ้นมีผลทำให้ทั้งกำลังและการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น [5]

5) ความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact Resistance) ของมอร์ต้าร์ธรรมดามีความสามารถในการรับแรงกระแทกค่อนข้างต่ำ การผสมเส้นใยไฟเบอร์เหล็กลงในคอนกรีตจะทำให้มอร์ต้าร์มีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ดีขึ้น [9]

2.8 กำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)

การออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก จะสมมุติให้คอนกรีตรับแรงดึงไม่ได้เลย ทั้งนี้เนื่องจากความต้านทานของคอนกรีตในด้านรับแรงดึงมีค่าต่ำมากประมาณร้อยละ10 ของกำลังอัดประลัย อีกทั้งยังมีคุณสมบัติที่เปราะด้วย แต่ค่าความต้านทานแรงดึงของคอนกรีต จะใช้ช่วยในการพิจารณาเกี่ยวกับการแตกร้าวของคอนกรีตอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ การหดตัว หรือการอัดแรงในงานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรง

การทดสอบหาความต้านทานรับแรงดึงของคอนกรีตโดยตรงนั้นไม่สะดวกเหมือนกับการทดสอบหากำลังอัดประลัยของคอนกรีต เนื่องจากเครื่องมือทดสอบอาจทำให้เกิดหน่วยแรงอื่นที่ไม่ต้องการขึ้นได้ ทำให้ผลการทดสอบผิดพลาดได้ โดยทั่วไปการทดสอบหาความต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ทำโดยการอัดแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ซึ่งวางให้แกนยาวอยู่ในแนวนอนดังรูปที่ 2.3 จนกระทั่งแตกหรือแยกออกจากกันในแนวทางดิ่งวิธีนี้เรียกว่า Splitting Test (ASTM C496) [10]



รูปที่ 2.3 การทดสอบหากำลังต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีกของตัวอย่าง [10]

ความต้านทานแรงดึงของคอนกรีตคำนวณได้จากสมการ

$$T = \frac{2P}{\pi l D} \quad \text{กก./ซม.}^2 \tag{2.1}$$

ในเมื่อ T = ความต้านทานแรงดึงแยกของคอนกรีต , กก./ซม.^{2}

P = แรงกดสูงสุด , กก.

l = ความยาวของแท่งตัวอย่างทรงกระบอก , ซม.

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างทรงกระบอก , ซม.

พบว่า ค่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตคำนวณได้จากวิธีนี้ มีค่าสูงกว่าค่ากำลังต้านทานแรงดึงจริงของคอนกรีต ประมาณร้อยละ 15 ค่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 7 ถึง 10 และมีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 10 ของกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต จากการทดสอบ พบว่า เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตยิ่งสูง ค่ากำลังต้านทานแรงดึงสัมพัทธ์ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะยิ่งมีค่าต่ำลง [11]

2.9 กำลังต้านทานแรงดัด (Flexural Strength)

ในงานก่อสร้างพื้นถนนหรือสนามบิน กำลังต้านทานของคอนกรีตมักถูกกำหนดให้ทดสอบหาความต้านทานต่อแรงดัด จากคานตัวอย่างมาตรฐานที่ทำจากคอนกรีตล้วน โดยกำหนดอยู่ในรูปของโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of Rupture) ซึ่งเป็นค่าแรงดึง (หรือแรงอัด) ที่สูงที่สุด ณ จุดที่เกิดการแตกหัก คำนวณได้จากสูตรแรงดัด

$$R = \frac{Mc}{I} \tag{2.2}$$

โดยที่ R = โมดูลัสของการแตกหัก , กก./ซม.^{2}

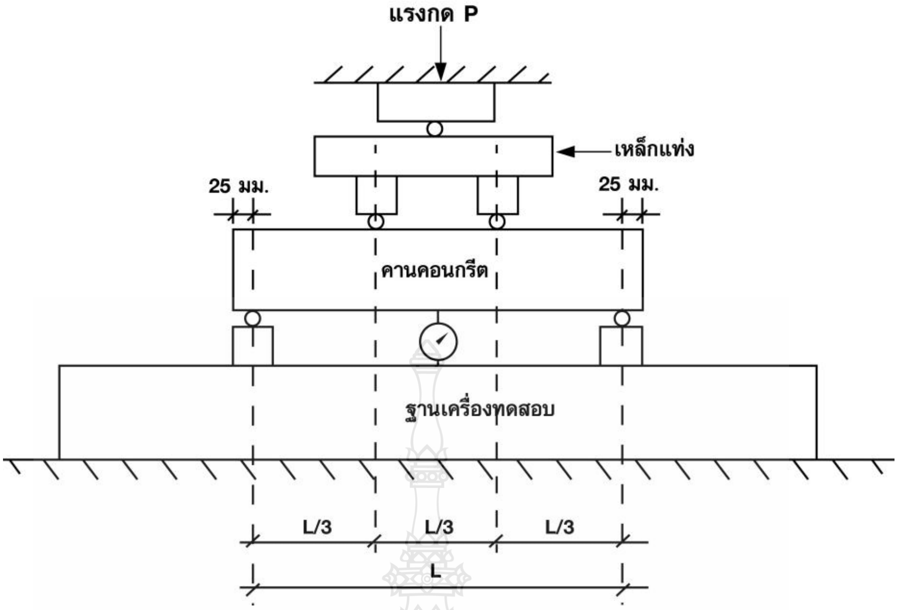
M = ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่หน้าตัด , กก.- ซม.

I = Moment of inertia ของหน้าตัด , ซม.^{4}

c = ระยะจาก Neutral Axis ถึงผิวนอกของคาน , ซม.

การทดสอบเพื่อหากำลังต้านทานแรงดัดงอของคอนกรีต ทำได้โดยการทดสอบคานตัวอย่างมาตรฐานซึ่งอาจเป็นไปตามมาตรฐานอเมริกันหรืออังกฤษ สำหรับมาตรฐานอเมริกันใช้คานคอนกรีตมาตรฐานมีขนาดความยาวประมาณ 3 เท่าของความลึกกับอีกอย่างน้อย 5 เซนติเมตร โดยทั่วไปใช้ขนาด 15 x 15 x 50 เซนติเมตร สำหรับวัสดุผสมที่ไม่โตกว่า 50 มิลลิเมตร แต่ถ้าวัสดุผสมโตกว่า 50 มิลลิเมตร ก็ใช้คานทดสอบมาตรฐานขนาด 20 x 20 x 70 เซนติเมตร แทนสำหรับคานขนาด 15 x 15 x 50 เซนติเมตร ให้ใส่คอนกรีตลงในแบบ 2 ชั้นๆ ละเท่าๆ กันและกระทุ้งแน่นชั้นละ 60 ครั้ง ส่วนคานขนาด 20 x 20 x 70 เซนติเมตร ให้ใส่คอนกรีตลงในแบบ 3 ชั้นๆ ละเท่าๆ กันและกระทุ้งแน่นชั้นละ 112 ครั้ง โดยใช้เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 60 เซนติเมตร ปลายกลมมน

มาตรฐานอังกฤษใช้คานคอนกรีตขนาด 15 x 15 x 70 เซนติเมตร สำหรับวัสดุผสมโตกว่า 20 มิลลิเมตร และใช้ขนาด 10 x 10 x 50 เซนติเมตร สำหรับวัสดุผสมไม่โตกว่า 20 มิลลิเมตร โดยเทคอนกรีต หนาชิ้นละ 5 เซนติเมตร และกระทุ้งแน่นด้วยเหล็กกระทุ้งซึ่งหนัก 4 ปอนด์ เนื้อที่หน้าตัด 1 ตารางนิ้ว ยาว 37.5 เซนติเมตร ปลายกลมมน



รูปที่ 2.4 การทดสอบหาความต้านทานแรงดัด [12]

วิธีการทดสอบคานตัวอย่างกระทำโดยการใช้น้ำหนักกดลงบนจุดแบ่งสามของช่วงคาน เพิ่มน้ำหนักในอัตราสม่ำเสมอโดยให้เกิดหน่วยแรงที่ผิวนอกประมาณ 8 ถึง 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อหนึ่งนาที จากค่าน้ำหนักสูงสุดที่คานสามารถรับไว้ได้ นำมาคำนวณหากำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีตโดยใช้สูตรแรงดัด ซึ่งจะได้ค่าโมดูลัสของการแตกหัก

$$R = \frac{PL}{bd^2} \tag{2.3}$$

ในเมื่อ R = โมดูลัสของการแตกหัก , กก./ซม.^{2}

P = แรงกดสูงสุด , กก.

L = ช่วงความยาวของคานระหว่างจุดรองรับ (Span length) , ซม.

b = ความกว้างเฉลี่ยของคานคอนกรีตที่รอยแตกร้าว , ซม.

d = ความลึกเฉลี่ยของคานคอนกรีตที่รอยแตกร้าว , ซม.

จากการทดลอง พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีต สูงกว่ากำลังต้านทานแรงดึงประมาณร้อยละ 60 ถึง 100 ค่าโมดูลัสของการแตกหักอยู่ในช่วงร้อยละ 11 ถึง 23 ของกำลังต้านทานแรงอัด การใช้วัสดุผสมที่มีผิวหยาบขรุขระและมีเหลี่ยมมุม จะทำให้ค่ากำลังต้านทานแรงดัดสูงขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงดัดต่อกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต อาจเขียนได้ในรูปของสมการคือ [11]

$$f_c' = \left(f_t / K\right)^2 \tag{2.4}$$

ในเมื่อ f_c' = กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

f_t = โมดูลัสของการแตกหัก ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

K = ค่าคงที่ มีค่าอยู่ระหว่าง 8 ถึง 10

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sudarsana Rao และ Ramana [1] ได้ศึกษาพฤติกรรมของแผ่นคอนกรีตขนาด 600 x 600 x 50 มิลลิเมตร รับแรงเฉือนทะลุ โดยแผ่นตัวอย่างของ Sifcon มีส่วนผสม ปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:1 โดยน้ำหนัก สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ มีค่าเท่ากับ 0.45 และเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 8, 10 และ 12 โดยปริมาตร ตัวอย่าง FRC อัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อหิน เท่ากับ 1 : 1.54 : 3.17 โดยน้ำหนักและน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.50 โดยน้ำหนัก และเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 2 โดยปริมาตร ตัวอย่าง RCC อัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อหิน เท่ากับ 1 : 1.54 : 3.17 โดยน้ำหนักและน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.50 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองที่ได้ ความสามารถรับแรงเฉือนทะลุของตัวอย่าง Sifcon สูงกว่าตัวอย่าง FRC และ RCC การเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยในตัวอย่าง Sifcon ทำให้กำลังรับแรงเฉือนและค่าการแอ่นตัวมีมากขึ้น และสูงกว่า ตัวอย่าง FRC และ RCC ค่อนข้างมากและความเสียหายที่เกิดกับตัวอย่าง Sifcon น้อยกว่า FRC และ RCC

H Sudarsana Rao [2] ได้ศึกษาพฤติกรรมของแผ่นคอนกรีตขนาด 600 x 600 x 50 มิลลิเมตร รับแรงดัด โดยแผ่นตัวอย่างของ Sifcon มีส่วนผสม ปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:1 โดยน้ำหนัก สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ มีค่าเท่ากับ 0.45 และเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 8, 10, และ 12 โดยปริมาตร ตัวอย่าง FRC อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเท่ากับ 1 : 1.54 : 3.17 โดยน้ำหนักและน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.50 โดยน้ำหนัก และเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 2 โดยปริมาตร ตัวอย่าง RCC อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเท่ากับ 1 : 1.54 : 3.17 โดยน้ำหนักและน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.50 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบแผ่นพื้น Sifcon-12 มีประสิทธิภาพมากมากกว่า ตัวอย่าง FRC และ RCC

ทวีชัย สำราญวานิช, อภินันท์ ภูชัน และสุรสิทธิ์ หมั่นวิชา [13] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก และเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิก ในอัตราส่วนร้อยละ 0.1, 0.2 และ 0.5 โดยปริมาตร พบว่า เมื่อให้ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดัดในคานคอนกรีตเสริมเหล็กเท่ากัน กำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยมีค่าสูงกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ผสมเส้นใย และที่อัตราส่วนร้อยละ 0.1 ถึง 0.2 กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิกมีค่าสูงกว่าคานคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและเส้นใยแก้ว แต่ที่อัตราส่วนเส้นใยร้อยละ 0.5 กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเส้นใยเหล็กผสมเส้นใยเหล็กมีค่าสูงกว่าที่ผสมเส้นใยแก้วและเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิก

ประพนธ์ เฟื่องฟู [14] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเส้นใยและการต้านทานแรงกระแทกด้วยวิธีตุ้มน้ำหนัก โดยมีปริมาณส่วนผสมของเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.5, 0.75 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กรับแรงอัด แรงดึงแบบผ่าซีกและแรงดัดได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสามารถรับจำนวนครั้งจากการกระแทกได้สูงกว่าคอนกรีตธรรมดาถึง 5 เท่า พลังงานกระแทกที่ทำให้เกิดรอยร้าวครั้งแรกและเกิดการวิบัติมีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา

ชูชัย สุจิวรกุล [15] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลขนาดชิ้นส่วนรับโมเมนต์ดัดของวัสดุผสมซีเมนต์เสริมไฟเบอร์ที่มีต่อกำลังดัดและพฤติกรรมการรับแรงดัดโดยใช้คานขนาดต่าง ๆ ที่มีความลึกและอัตราส่วนของความยาวช่วงต่อความลึกของคานแตกต่างกัน ผลที่ได้คานที่มีความลึกมากกว่า ความเค้นดัดเทียบเท่าสูงสุด หรือโมดูลัสแตกร้าวน้อยกว่าคานที่มีความลึกน้อยกว่า คานที่มีความลึกเท่ากัน การเพิ่มความยาวช่วงคานจะส่งผลต่อประสิทธิผลของกำลังดัดน้อยมาก โดยพฤติกรรมการรับแรงดึงขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฟเบอร์และวัสดุประสานซีเมนต์

ปิติ สุขคนธสุขกุล และสุรชัย [16] จากการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและพลาสติกสังเคราะห์ ที่มีสัดส่วนผสมร้อยละ 1 และ 2 โดยปริมาตร และทำการวัดค่าความเหนียว (Toughness) ตามมาตรฐาน ASTM C 1018 พบว่า เส้นใยมีผลทำให้คอนกรีตมีค่าความเหนียว และการดูดซับพลังงานดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา สำหรับค่าที่เพิ่มนั้นเริ่มตั้งแต่หลังการแตกร้าวครั้งแรกกำลังจะตกลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นค่าการรับกำลังจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยเริ่มยืดตัวออกเล็กน้อยจึงเกิดแรงยึดเหนี่ยวประสานของเส้นใยบริเวณที่เกิดรอยร้าวมีผลทำให้ทั้งกำลังและการดูดซับพลังงานเพิ่มมากขึ้น

Eren และ Celik [17] ได้ทำการตรวจสอบผลของไอซิลิก้าและเส้นใยเหล็กที่ส่งผลต่อคุณสมบัติบางอย่างของคอนกรีตความแข็งแรงสูง ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของจำนวนไอซิลิก้าและเส้นใยส่งผลต่อความสามารถในการทำงานพบว่า ขณะที่ไอซิลิก้ามีผลกระทบต่อความทนต่อแรงกดอัดเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของเส้นใยเหล็กมีผลกระทบน้อยมาก

Qian และ Stroeven [18] ได้ตรวจสอบข้อเท็จจริงเกี่ยวกับการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของขนาดเส้นใย ปริมาณเส้นใย และปริมาณเถ้าลอยในคอนกรีตเส้นใยโพลีโพรพีลีนเส้นใยที่มีปริมาณเส้นใยต่ำเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลทั่วไป ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของอนุภาคละเอียดเป็นสิ่งที่พบได้ในเถ้าลอยเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการกระจายตัวของเส้นใยที่สม่ำเสมอ

Mansur และคณะ [19] ได้รายงานถึงการทดสอบแรงเฉือนทะลุบนแผ่นปูซีเมนต์สี่เหลี่ยมแสดงให้เห็นถึงผลการทดลองที่อธิบายถึงพฤติกรรมของ Sifcon เสริมเหล็กที่รองรับแผ่นปูในแรงเฉือนทะลุ ในการศึกษาเชิงการทดลองได้แสดงให้เห็นว่า แผ่นปู Sifcon ถูกสร้างขึ้นมาโดยใช้เส้นใยลวดเหล็ก การตรวจสอบได้แสดงให้เห็นถึงการศึกษาเรื่องความแข็งแรงและพฤติกรรมการแอ่นตัวของแผ่นปู Sifcon เสริมเหล็กภายใต้แรงเฉือนทะลุ ผลที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับ แผ่นปูที่สร้างขึ้นมาจากคอนกรีตผสมซีเมนต์เสริมแรง (RCC) และคอนกรีตเสริมแรงเส้นใย (FRC)

Yan และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลและการวิเคราะห์ภาพดิจิตอลของ Sifcon พร้อมกับค่าร้อยละ 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณปริมาตรเส้นใย ขนาดเป็นสัดส่วนถูกนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์เพื่อหาลักษณะเฉพาะรูปแบบการแตกร้าวที่มีต่อพื้นผิวของ Sifcon และสรุปได้ว่ามีความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างคุณสมบัติทางกลและขนาดตามสัดส่วน

Gutierrez และคณะ [21]ได้ทำการศึกษาผลของปอซโซลานสำหรับประสิทธิภาพของปูนฉาบเสริมเส้นใยพวกเขาได้มีการรายงานว่า วัสดุปอซโซลานโดยเฉพาะอย่างยิ่งไอซิลิก้าและปูนขาวเมต้า ซึ่งเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพทางกลและความทนทานของวัสดุเสริมเส้นใยการเพิ่มเถ้าลอยมีประสิทธิภาพต่ำซึ่งมีส่วนทำให้มีระดับความเป็นปอซโซลานที่ต่ำลง

Ali และ Majid [22] เป็นการศึกษาอิทธิพลของความยาว และร้อยละของปริมาตรของเส้นใยเหล็กดูดซึมพลังงานจากแผ่นพื้นคอนกรีต จุดแข็งคอนกรีตต่าง ๆ ภายใต้เส้นโค้งและผลแสดงให้เห็นว่า ความยาวของเส้นใยและปริมาณเส้นใยสูงทำให้การดูดซึมพลังงานสูงขึ้น

Yazici และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาผลของการใช้ปริมาตรที่สูงของเถ้าลอยเกรด C เกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลและขนาดตามสัดส่วนของ Sifcon ที่ผ่านการอบด้วยเตาอบความร้อนสูงและสรุปว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาตรเส้นใยอย่างชัดเจนจะเป็นการเพิ่มความทนต่อความยืดหยุ่นและความเหนียวของ Sifcon พฤติกรรมนี้พบว่า มีปริมาตรเส้นใยมากขึ้นที่ร้อยละ 10

Topcu และ Canbaz [24] ได้ทำการศึกษาผลของเส้นใยเหล็กและเส้นใยโพลีโพรพีลินที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ประกอบด้วยเถ้าลอย ตามผลการศึกษาที่ได้การเพิ่มเส้นใยสามารถที่จะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าสำหรับคอนกรีต ขณะที่เถ้าลอยในส่วนผสมอาจจะเป็นการปรับความสามารถในการทำงานและการสูญเสียความแข็งแรงที่เกิดขึ้นโดยเส้นใย และการปรับปรุงความแข็งแรงอีกครั้งหนึ่ง

Ahmed และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาการตอบสนองความยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตซีเมนต์เสริมเส้นใยเหล็ก - โพลีเอทีลีนผสม ซึ่งพบว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมที่สุดในวัสดุคอมโพสิตเส้นใยผสม

Cengiz Duran Atis และ Okan Karahan [26] ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ประกอบด้วยเถ้าลอยและเส้นใยเหล็ก ปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ร้อยละ 0, 15 และ 30 โดยน้ำหนัก และเส้นใยเหล็กที่ใช้ร้อยละ 0.25, 0.5, 1 และ 1.5 โดยปริมาตรผลการทดลองที่ได้ การเพิ่มเส้นใยเหล็กในคอนกรีตไม่ว่าจะเป็นคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือเถ้าลอย จะมีคุณสมบัติทนต่อแรงดึง การหดตัวเมื่อแห้งและต้านทานการเสียหายเนื่องจากการแข็งตัวและการละลายแต่ความสามารถเทได้ลดลง การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้การแข็งตัวลดลง แต่เพิ่มความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กทำให้การหดตัวเมื่อแห้งลดลงและเพิ่มความทนทานในการแช่แข็ง

2.11 กรอบแนวคิดของการวิจัย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาคอนกรีตเสริมเส้นใยมีความเหนียว และดูดซับพลังงานได้มากกว่าคอนกรีตธรรมดา มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก มีคุณสมบัติในการรับแรงเฉือน แรงดัด แรงยึดหยุ่นและการแอ่นตัวได้มากกว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและคอนกรีตธรรมดา และมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กที่เสริมแรงด้วยเหล็ก Dowel มีความทนต่อแรงเฉือนได้มากกว่าโครงสร้างแบบเดิม (ไม่เสริมเหล็ก Dowel) การผสมเถ้าลอยในคอนกรีตเป็นการปรับความสามารถในการทำงานแต่ทำให้สูญเสียความแข็งแรงและปรับปรุงความแข็งแรงด้วยการเสริมเส้นใยเหล็กและเส้นใย โพลีโพรพีลีน ความยาวของเส้นใยและเสริมปริมาณเส้นใยสูงทำให้การดูดซับพลังงานสูงขึ้น

งานวิจัยที่มีการศึกษาค่อนข้างน้อย การทดสอบหาการรับแรงดึงและแรงดัดของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงคุณสมบัติในการรับแรงของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงที่ใช้อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทรายที่แตกต่างกัน การใช้ความยาวของเส้นใยเหล็กไม่เท่ากันและการเปรียบเทียบการรับแรงดัดของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงกับมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงต้องศึกษาการรับแรงดึง และแรงดัดของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ล้วน ปูนซีเมนต์ผสมทรายในอัตราส่วน 1:1 และ 1:2 และการใช้ความยาวของเส้นใยเหล็กสองขนาดคือ 50 และ 60 มิลลิเมตร และศึกษาคุณสมบัติในการรับแรงดัดของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึง รายละเอียดในการดำเนินงานวิจัยซึ่งครอบคลุมไปถึง วัสดุที่ใช้ในการทดสอบวิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ เครื่องมือในการทดสอบ สัดส่วนผสม และขั้นตอนการทดสอบ

3.1 งานวิจัยที่ทำการศึกษา

3.1.1 การทดสอบการรับแรงอัด แรงดึง และแรงดัดของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง

3.1.2 ใช้อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ล้วน ปูนซีเมนต์ผสมทรายในอัตราส่วน 1 : 1 และ 1 : 2

3.1.3 ใช้ความยาวของเส้นใยเหล็กสองขนาด คือ 50 และ 60 มิลลิเมตร

3.1.4 ศึกษาคุณสมบัติการรับแรงดัดของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น

3.2 วัสดุ

3.2.1 ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement : Type I) มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C 150

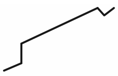
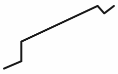
3.2.2 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ใช้ทรายแม่น้ำร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33

3.2.3 น้ำ ใช้น้ำประปาสะอาดผสมคอนกรีต (Water) มีความขุ่นไม่เกิน 2000 ppm ปราศจากกรด ด่าง น้ำมัน และอินทรีย์สารอื่น ๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีต

3.2.4 เส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) Dramix RC-60/70-BN มาตรฐาน ASTM A820 ชนิดงอปลาย (Hook End) ขนาดความยาว คุณสมบัติเป็นดังแสดงในตารางที่ 3.1

3.2.5 เหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber)

Name	Material	Specific Gravity	Shape	Length (mm)	Section	Diameter (mm)	Aspect Ratio (l/d)	Tensile Strength (N/mm^2(ksc))
SFH 50	Steel	7.86		50	Circle	0.75	66.67	1,050 (10,703)
SFH 60	Steel	7.86		60	Circle	0.75	80	1,050 (10,703)

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 เครื่องผสมคอนกรีต ขนาด 0.15 ลูกบาศก์เมตร

3.3.2 แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 สูง 20 เซนติเมตร

3.3.3 แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงคาน ขนาด 10 x 10 x 50 เซนติเมตร

3.3.4 เครื่องมือสั่นสะเทือน

3.3.5 เครื่องทดสอบกำลังอัด กำลังดึงและกำลังดัดคอนกรีต

3.4 ขั้นตอนการศึกษา

3.4.1 นำวัสดุปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำ และทรายมาเป็นส่วนผสมของแท่งตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร และแท่งตัวอย่างคานขนาด 10 x 10 x 50 เซนติเมตร

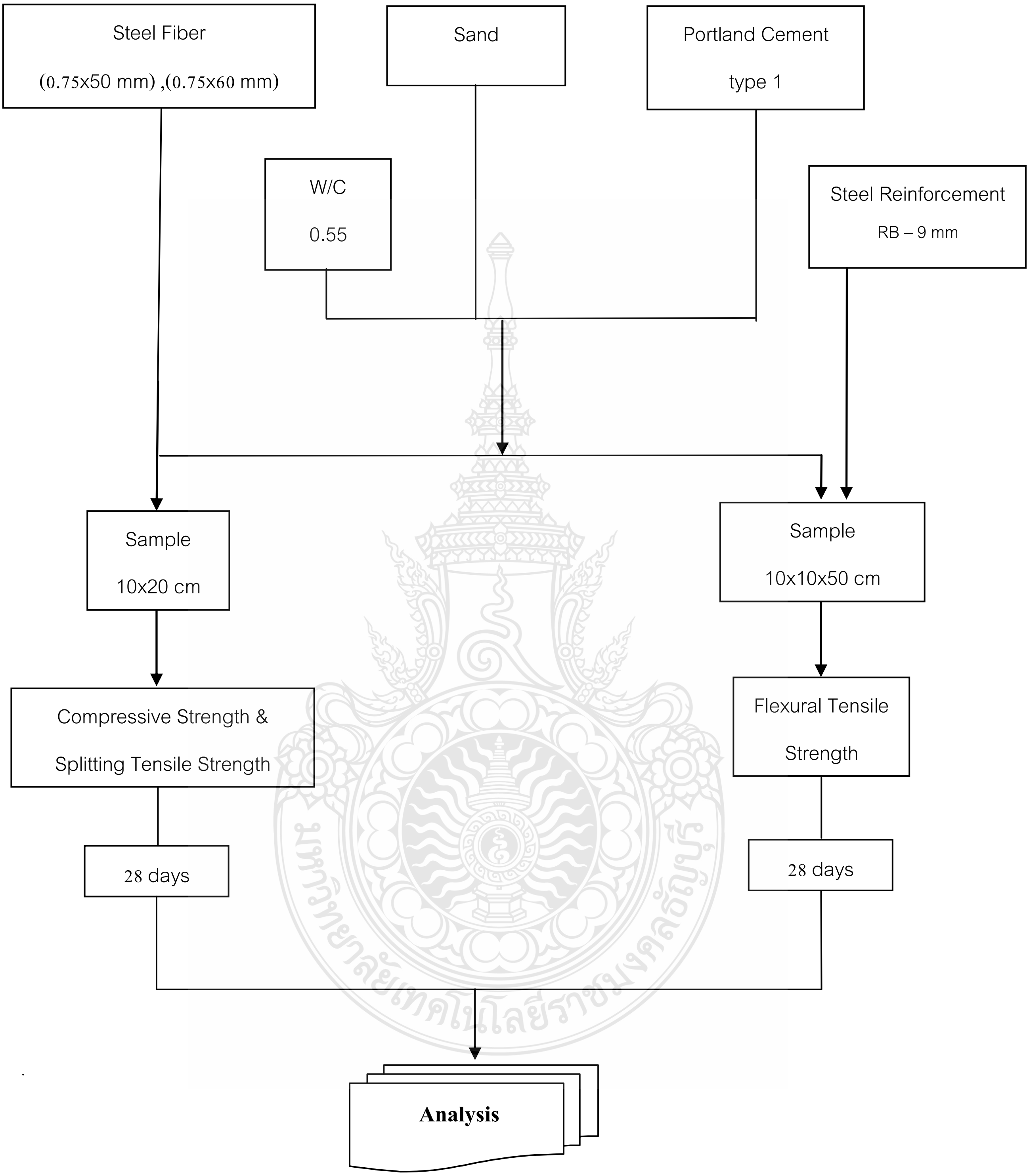
3.4.2 นำวัสดุปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำ ทราย และเส้นใยเหล็กมาเป็นส่วนผสมของแท่งตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร และแท่งตัวอย่างคานขนาด 10 x 10 x 50 เซนติเมตร

3.4.3 นำวัสดุปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำ ทรายและเหล็กเสริม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร มาเป็นส่วนผสมของแท่งตัวอย่างคานขนาด 10 x 10 x 50 เซนติเมตร

3.4.4 ทดสอบวัสดุเมื่ออายุครบ 28 วัน โดยตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด และแรงดึงผ่าซีก ตัวอย่างขนาด 10 x 10 x 50 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัด โดยขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ แสดงในรูปที่ 3.1

3.5 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 อัตราส่วน ปูนซีเมนต์ : ทราย เท่ากับ 1 : 0 , 1 : 1 และ1 : 2 โดยน้ำหนัก และ เส้นใยเหล็กใช้ชนิดงอปลายขนาด D = 0.75 มิลลิเมตร L= 50 มิลลิเมตร และ D = 0.75 มิลลิเมตร L= 60 มิลลิเมตร ในอัตราส่วนร้อยละ 7 โดยปริมาตร และเหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตรในอัตราส่วนร้อยละ 7 โดยปริมาตร และคิดน้ำหนักเฉพาะเหล็กเสริมในแนวแกนคานเพื่อรับแรงดัดไม่รวมน้ำหนักของเหล็กปลอกที่เสริมเพื่อป้องกันการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน โดยแสดงอัตราส่วนผสมในตารางที่ 3.2 และปริมาณวัสดุที่ใช้สำหรับอัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์ 1 ลูกบาศก์เมตร แสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการศึกษา

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก

สัดส่วน	ปูนซีเมนต์ ร้อยละ โดยน้ำหนัก	ทราย ร้อยละ โดยน้ำหนัก	เส้นใยเหล็ก ร้อยละโดยปริมาตร		เหล็กเสริม RB 9 ร้อยละโดยปริมาตร
			SF 50	SF 60	
C	100	-	-	-	-
C 1 S	50	50	-	-	-
C 2 S	33.33	66.67	-	-	-
C – SF 50	100	-	7	-	-
C 1 S-SF 50	50	50	7	-	-
C 2 S-SF 50	33.33	66.67	7	-	-
C – SF 60	100	-	-	7	-
C 1 S-SF 60	50	50	-	7	-
C 2 S – SF 60	33.33	66.67	-	7	-
C –RB 9	100	-	-	-	7
C 1 S-RB 9	50	50	-	-	7
C 2 S-RB 9	33.33	66.67	-	-	7

C = ปูนซีเมนต์

S = ทราย

- SF 50 = เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 50 มิลลิเมตร

- SF 60 = เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 60 มิลลิเมตร

C1S-SF 50 = ปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1 เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 50 มิลลิเมตร

C2S-SF 60 = ปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 2 เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 60 มิลลิเมตร

- RB 9 = เสริมเหล็กเส้นกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.3 ปริมาณวัสดุที่ใช้สำหรับอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ 1 ลูกบาศก์เมตร

สัดส่วน	**สัดส่วนผสม**					
	ปูนซีเมนต์ (กก.)	**ทราย (กก.)**	**น้ำ (กก.)**	**เส้นใยเหล็ก ขนาด 0.75 x 50 มม. (กก.)**	**เส้นใยเหล็ก ขนาด 0.75 x 50 มม. (กก.)**	**เหล็กเสริม RB 9 (กก.)**
C	2,032.26	-	1,117.74	-	-	-
C 1 S	1,016.13	1,339.00	558.87	-	-	-
C 2 S	677.42	1,733.33	372.58	-	-	-
C - SF 50	1,890.00	-	1,039.50	550.20	-	-
C1S - SF 50	945.00	1,209.00	519.75	550.20	-	-
C2S - SF 50	630.00	1,612.00	346.50	550.20	-	-
C - SF 60	1,890.00	-	1,039.50	-	550.20	-
C1S - SF 60	945.00	1,209.00	519.75	-	550.20	-
C2S - SF 60	630.00	1,612.00	346.50	-	550.20	-
C - RB 9	2,032.26	-	1,117.74	-	-	550.20
C1S - RB 9	1,016.13	1,339.00	558.87	-	-	550.20
C2S - RB 9	677.42	1,733.33	372.58	-	-	550.20

3.6 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบจะถูกเตรียมตามสัดส่วน ที่กำหนดตามตารางที่ 3.2 โดยในการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกใช้ตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร การทดสอบกำลังดัด ใช้ตัวอย่างคานทดสอบ ขนาด 10 x 10 x 50 เซนติเมตร โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ทำความสะอาดแบบหล่อ ทาน้ำมันด้านผิวในแบบหล่อให้ทั่ว

2) นำเส้นใยเหล็กและเหล็กเสริมใส่ลงในแบบหล่อและโดยให้เส้นใยเหล็กกระจายตัวให้เต็มแบบหล่อ

3) ทำการผสมมอร์ต้าร์และนำมาเทลงในแบบหล่อ แล้วทำการสั่นสะเทือนให้แน่นเพื่อให้มอร์ต้าร์แทรกซึมในช่องว่างของเส้นใยเหล็ก

4) ทำการถอดแบบหล่อคอนกรีตออก เมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง นำแท่งตัวอย่างไปบ่มในน้ำจนถึงอายุที่ต้องการทดสอบ โดยขึ้นจากน้ำมาวางไว้ประมาณครึ่งชั่วโมงก่อนการทดสอบ

รูปที่ 3.2 การจัดวางเส้นใยเหล็กและการหล่อตัวอย่าง

3.7 การทดสอบตัวอย่าง

3.7.1 การทดสอบตัวอย่างรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกโดยใช้แท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร

3.7.2 การทดสอบตัวอย่างรับแรงดัด โดยใช้คานตัวอย่างขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร

3.8 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างที่แข็งตัวแล้ว ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ดังนี้

1) การทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐาน ASTM C 39 (Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimen) [27]

2) การทดสอบกำลังดึง ตามมาตรฐาน ASTM C 496 (Test for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimen) [10]

3) การทดสอบกำลังดัด ตามมาตรฐาน ASTM C 78 (Test for Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam Third-Point Loading) [12]

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ ทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยปริมาณสูง ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก และกำลังรับแรงดึงจากการทดสอบแรงดัด ซึ่งมีผลการทดสอบและการวิเคราะห์ดังนี้

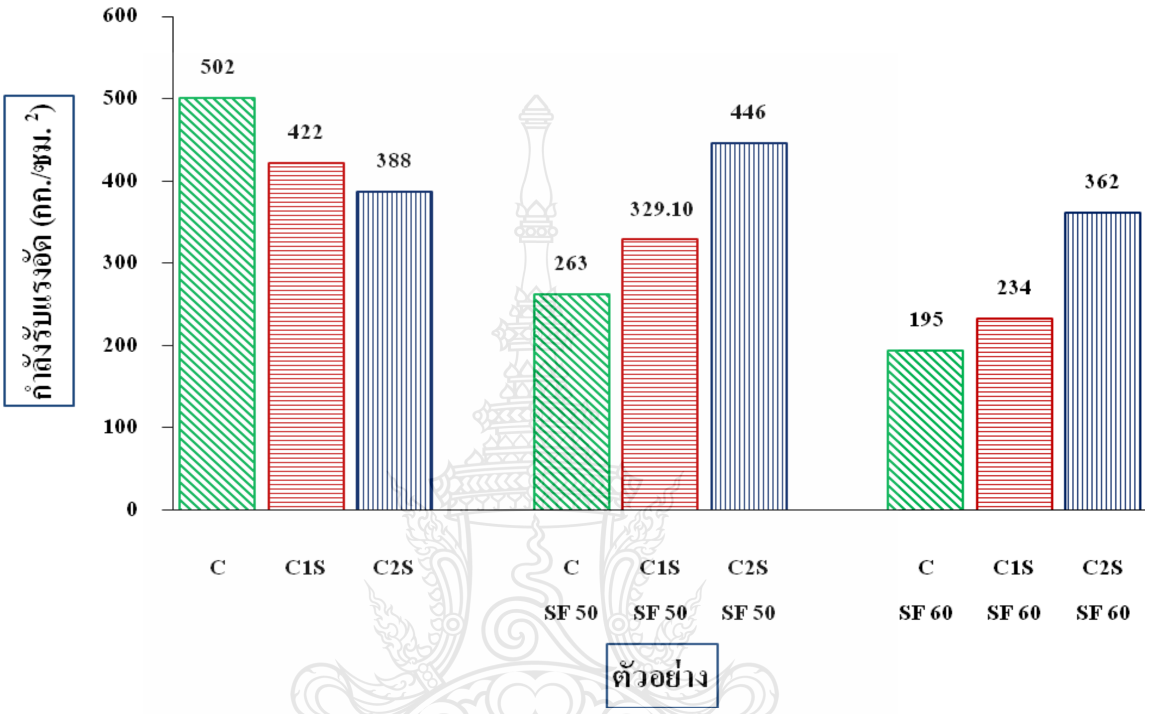
4.1 มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง

4.1.1 กำลังรับแรงอัด

จากผลการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่า ค่าแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็กมีอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0, 1 : 1 และ 1 : 2 ของตัวอย่าง C, C1S และ C2S ตามลำดับ พบว่า ค่ากำลังอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีทิศทางลดลงตามสัดส่วนปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้น ซึ่งกำลังอัดที่ลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้น ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลง จึงมีผลทำให้กำลังอัดลดลง สำหรับกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่เสริมเส้นใยเหล็ก SF 50 พบว่า กำลังอัดมีทิศทางเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนผสมทรายที่มากขึ้นของตัวอย่าง C-SF 50, C1S-SF 50 และ C2S-SF 50 เนื่องจากการที่ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ จะทำให้ส่วนผสมที่ไม่ผสมทราย C-SF 50 และที่ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:1 ของตัวอย่าง C1S-SF 50 มีน้ำเหลืออยู่ในส่วนผสมที่มากกว่าของตัวอย่าง C2S-SF 50 จึงมีผลทำให้กำลังอัดลดต่ำลง เมื่อพิจารณาตัวอย่าง C-SF 60, C1S-SF 60 และ C2S-SF 60 ที่ใช้เส้นใยเหล็ก SF 60 พบว่า มีทิศทางแบบเดียวกับของตัวอย่าง SF 50 ซึ่งมีทิศทางของกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของทรายที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสม โดยมีสาเหตุมาจากปริมาณน้ำส่วนเกินที่อยู่ในส่วนผสมจากผลของการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่

จากผลการทดลองกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0 (C, C-SF 50, C-SF 60) มอร์ต้าร์ C มีกำลังอัดสูงสุด และลดลงเมื่อมีการเสริมเส้นใยเหล็ก C-SF 50 และ C-SF 60 เนื่องจากเส้นใยเหล็กจะไปแทนที่มอร์ต้าร์ ทำให้มอร์ต้าร์มีปริมาณน้อยลง จึงเป็นสาเหตุให้กำลังอัดลดลง และจากผลการทดสอบ พบว่า การใช้เส้นใยเหล็กที่ยาวกว่าก็จะมีผลทำให้กำลังอัดลดลงมากกว่า สำหรับ C-SF 50 มีกำลังอัดสูงกว่า C-SF 60 เนื่องจากเส้นใยเหล็กขนาดสั้นจะกระจายตัว

ในแบบหล่อรูปทรงกระบอกได้ดีกว่า และมีช่องว่างน้อยกว่าเส้นใยเหล็กขนาดยาว ทำให้มีการรับกำลังอัดได้ดีกว่า สำหรับมอร์ต้าร์อัตราส่วนผสม 1 : 1 ของตัวอย่าง C1S, C1S-SF 50 และC1S-SF 60 ก็พบว่ามีทิศทางเดียวกับมอร์ต้าร์อัตราส่วนผสม 1 : 0

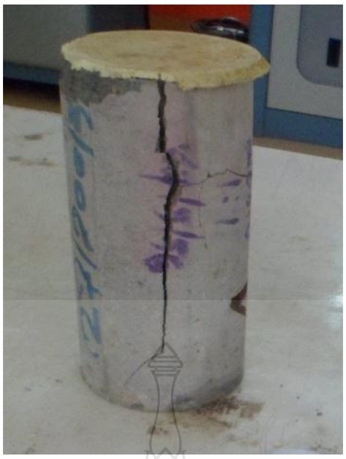


รูปที่ 4.1 กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต

4.1.2 รูปแบบการวิบัติ (Failure Pattern) จากการทดสอบกำลังรับแรงอัด

4.1.2.1 รูปแบบการวิบัติของมอร์ต้าร์ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็ก

มอร์ต้าร์อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0 จะวิบัติด้วยการแตกเปราะที่ผิวรอยต่อและลักษณะการแตกร้าวขนาดใหญ่ การวิบัติจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรง แท่งตัวอย่างจะขาดออกจากกันอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.2(ก) มอร์ต้าร์อัตราส่วนผสม 1 : 1 รูปแบบการวิบัติจะคล้ายกับมอร์ต้าร์ 1 : 0 แต่ลักษณะของการแตกร้าวจะมีขนาดเล็กกว่า ดังรูปที่ 4.2 (ข) มอร์ต้าร์อัตราส่วนผสม 1 : 2 จะมีลักษณะการแตกร้าวมีรอยแตกจำนวนมากกว่ามอร์ต้าร์ 1 : 0 และ 1 : 1 แต่ขนาดของรอยร้าวจะเล็กกว่าดังรูปที่ 4.2 (ค)



(ก) C **(ข) C1S** **(ค) C2S**

รูปที่ 4.2 ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด C, C1S และ C2S

4.1.2.2 รูปแบบการวิบัติของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร

มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร ตัวอย่าง SF 50 ลักษณะการวิบัติจากการทดสอบแรงอัดแตกเป็นแนวเฉียง รวมกับการมีของเส้นใยเหล็กที่อยู่ในส่วนผสมเป็นตัวยึดรั้งรอยร้าวไว้ การเกิดรอยร้าวเป็นไปอย่างช้า ๆ ไม่รุนแรง ไม่พบรอยแตกร้าวขนาดใหญ่ที่นำไปสู่การวิบัติ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยเหล็กมีความสามารถในการยึดรั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น ซึ่งเพิ่มความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวของแท่งตัวอย่างทำให้รอยร้าวที่เกิดขึ้นและไม่สามารถขยายตัวไปเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่ได้ ทำให้หลังการวิบัติจะยังคงรูปและไม่แตกออกจากกัน โดยมอร์ต้าร์อัตราส่วนผสม 1 : 1 จะมีรอยแตกร้าวจำนวนมากและลักษณะการเสียหายมากกว่าอัตราส่วนผสม 1 : 0 และ 1 : 2 สำหรับอัตราส่วนผสม 1 : 2 มีรอยแตกร้าวน้อยและลักษณะการเสียหายน้อยสุด ดังรูปที่ 4.3 (ก), (ข) และ (ค)

(ก) C-SF 50 **(ข) C1S-SF 50** **(ค) C2S-SF 50**

รูปที่ 4.3 ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด C-SF 50, C1S-SF 50 และ C2S-SF 50

4.1.2.3 รูปแบบการวิบัติของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 60 มิลลิเมตร

มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 60 มิลลิเมตร ของตัวอย่าง SF 60 ลักษณะการวิบัติจากการทดสอบแรงอัด จะเป็นรูปแบบคล้ายกับมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร กล่าวคือ มอร์ต้าร์ที่มีเส้นใยเหล็กในส่วนผสมจะมีลักษณะรอยร้าวที่มีขนาดเล็กกว่า โดยที่มอร์ต้าร์อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0 จะพบรอยแตกร้าวจำนวนมากกว่าอัตราส่วนผสม 1 : 1 และ 1 : 2 ตามลำดับ โดยมีจำนวนความเสียหายน้อยลงตามปริมาณของอัตราส่วนผสม 1 : 1 และ 1 : 2 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.4 (ก), (ข) และ (ค)

(ก) C-SF 60

(ข) C1S-SF 60

(ค) C2S-SF 60

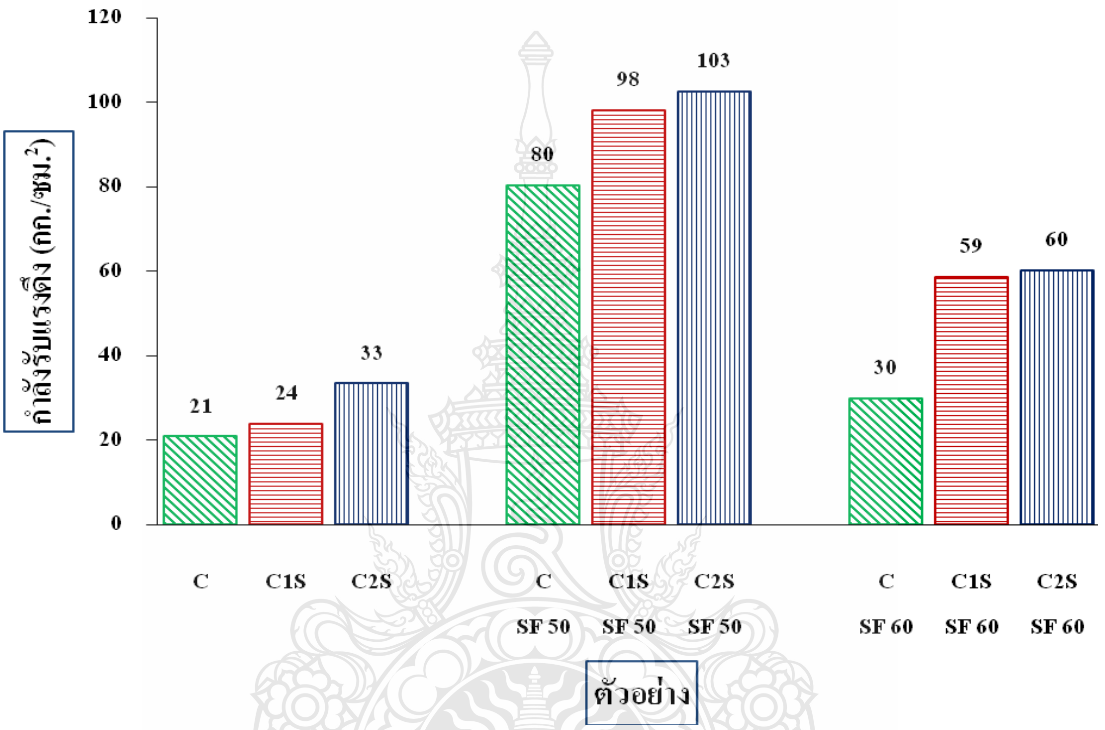
รูปที่ 4.4 ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด C-SF 60, C1S-SF 60 และC2S-SF 60

การวิบัติของตัวอย่างมอร์ต้าร์และมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง ที่เกิดจากการรับแรงอัด มีลักษณะของรอยแตกร้าวคล้ายคลึงกับงานวิจัยของทวีชัย สำราญวานิช และคณะ [13] และงานวิจัยของ ประพนธ์ เฟื่องฟู [14] ที่พบว่า การเสริมเส้นใยเหล็กในมอร์ต้าร์จะมีผลทำให้รอยแตกร้าวของมอร์ต้าร์ลดลง

4.1.3 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกในรูปที่ 4.5 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0 ของตัวอย่าง C, C-SF 50 และ C-SF 60 พบว่า ตัวอย่างมอร์ต้าร์ C-SF 50 และ C-SF 60 มีกำลังรับแรงดึงมากกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ C ที่เป็นผลมาจากเส้นใยเหล็กที่อยู่ในส่วนผสมมอร์ต้าร์ ทำหน้าที่ในการรับแรงดึงที่เกิดขึ้นซึ่งผลที่มีทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของทวีชัย สำราญวานิช และคณะ [13] และงานวิจัยของ ประพนธ์ เฟื่องฟู [14] ที่พบว่า การใช้เส้นใยเหล็กจะมีผลทำให้คอนกรีตรับแรงดึงได้มากขึ้น และมอร์ต้าร์อัตราส่วนผสม 1 : 1 และ 1 : 2 พบว่า มีทิศทางไปในทางเดียวกันกับตัวอย่างมอร์ต้าร์อัตราส่วนผสม 1 : 0 คือ C1S-SF 50 และ C1S-SF 60 มีกำลังรับแรงดึงมากกว่า C1S เมื่อพิจารณาตัวอย่าง C2S-SF 50 และ C2S-SF 60 พบว่า ตัวอย่าง C2S-SF 50 และ C2S-SF 60 มีกำลังรับแรงดึงมากกว่า C2S สำหรับตัวอย่างที่เสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร

มีกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกมากกว่าตัวอย่างเสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 60 มิลลิเมตร เนื่องจากการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กในแบบหล่อของตัวอย่างที่ใช้เส้นใยเหล็กขนาดสั้นจะมีการกระจายตัวในแนวตั้งฉากกับทิศทางแรงกดผ่าซีก จากการทดสอบได้ดีกว่าเส้นใยเหล็กที่มีขนาดยาว ซึ่งผลที่ได้มีทิศทางไปในทางเดียวกับงานวิจัยของ Gilani [28]



รูปที่ 4.5 กำลังดึงแบบผ่าซีกของตัวอย่างคอนกรีต

เมื่อพิจารณาการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของตัวอย่างคอนกรีต C, C1S และ C2S จะพบว่า ค่าแรงดึงแบบผ่าซีกของตัวอย่างมอร์ต้าร์ C, C1S และ C2S จะมีค่าแรงดึงมากขึ้นตามสัดส่วนของทรายที่มากขึ้นในส่วนผสม เนื่องจากทรายที่อยู่ในส่วนผสมอาจจะมีผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวของมอร์ต้าร์ดีขึ้นเมื่อมีการใช้เส้นใยเหล็กในส่วนผสมของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงของตัวอย่าง C-SF 50, C1S-SF 50 และ C2S-SF 50 พบว่า ตัวอย่าง C-SF 50 มีค่าแรงดึงแบบผ่าซีกต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลของกำลังอัดของตัวอย่าง C ที่ให้กำลังอัดน้อยที่สุด จากสาเหตุของมอร์ต้าร์ที่มีน้ำส่วนเกินหรือน้ำส่วนที่เหลือที่ใช้ในการหล่อลื่นส่วนผสมมากกว่าตัวอย่าง C1S และ C2S จึงมีผลทำให้กำลังดึงแบบผ่าซีกต่ำไปด้วย แต่ตัวอย่าง C1S-SF 50 มีค่าแรงดึงแบบผ่าซีกมากที่สุด

เนื่องจากอาจเป็นอัตราส่วนผสมที่ทำให้มีการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุประสานและเส้นใยเหล็กได้ดีที่สุด ในส่วนของตัวอย่าง C2S-SF 50 จะพบว่าค่าแรงดึงแบบผ่าซีกมีค่าน้อยกว่าตัวอย่าง C1S-SF 50 เป็นเพราะตัวอย่าง C2S-SF 50 มีปริมาณทรายที่มากกว่าและมีความข้นเหลวน้อยกว่าของตัวอย่าง C1S-SF 50 ทำให้ความหนาแน่นของตัวอย่าง และการยึดจับระหว่างมอร์ต้าร์และเส้นใยเหล็กทำได้ไม่ดีเท่ากับตัวอย่าง C1S-SF 50 ซึ่งมีค่าแรงดึงแบบผ่าซีกสูงสุดถึง 98.18 กก./ซม.^{2} เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กปริมาณต่ำ ร้อยละ 0.5 มีค่าแรงดึงเท่ากับ 41 กก./ซม.^{2} [13] และคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กร้อยละ 1 มีค่าแรงดึง เท่ากับ 49 กก./ซม.^{2} [14] ซึ่งผลที่ได้ พบว่าเมื่อมีการใช้เส้นใยที่สูงขึ้นค่าแรงดึงก็จะสูงขึ้นด้วย

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับการใช้เส้นใยเหล็ก SF 60 พบว่า ตัวอย่าง C-SF 60 มีค่าแรงดึงผ่าซีกต่ำสุด เนื่องจากมีน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการใช้ในการหล่อลื่นส่วนผสมมากกว่าตัวอย่าง C1S-SF 60 และ C2S- SF 60 แต่ตัวอย่าง C1S-SF 60 มีค่าแรงดึงแบบผ่าซีกมากที่สุดเนื่องจากอาจเป็นอัตราส่วนผสมที่ทำให้มีการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุประสานและเส้นใยเหล็กได้ดีที่สุด ในส่วนของตัวอย่าง C2S- SF 60 พบว่า มีค่าแรงดึงแบบผ่าซีกมีค่าน้อยกว่าตัวอย่าง C1S- SF 60 เป็นเพราะตัวอย่าง C2S- SF 60 มีปริมาณทรายที่มากกว่าและความข้นเหลวน้อยกว่าของตัวอย่าง C1S- SF 60 ทำให้การยึดจับระหว่างมอร์ต้าร์และเส้นใยเหล็ก ทำได้ไม่ดีเท่ากับตัวอย่าง C1S- SF 60 ซึ่งพบว่าผลที่ได้มีทิศทางไปในทางเดียวกันกับตัวอย่างเส้นใยเหล็ก SF 50

4.1.4 รูปแบบการวิบัติ (Failure Pattern) จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

4.1.4.1 รูปแบบการวิบัติของมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็ก

มอร์ต้าร์อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1 : 0 จะเกิดการเสียหายด้วยลักษณะการแตกแบบเปราะ (การผ่าแยก) ที่ผิวรอยต่อและลักษณะการแตกร้าวมีขนาดใหญ่ การวิบัติจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรง แท่งตัวอย่างจะขาดออกจากกันอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.6 (ก) สำหรับมอร์ต้าร์อัตราส่วนผสม 1 : 1 และ 1 : 2 ลักษณะของการวิบัติจะไปในทิศทางเดียวกับมอร์ต้าร์อัตราส่วนผสม 1 : 0 แต่ความรุนแรงของการวิบัติจะน้อยกว่า เนื่องจากมีทรายในส่วนผสมในมอร์ต้าร์ทำหน้าที่ยึดประสานกับปูนซีเมนต์จึงเป็นการช่วยยึดรั้งรอยแตกร้าวได้ดีกว่า ดังรูปที่ 4.6 (ข) และ (ค)

(ก) C

(ข) C1S

(ค) C2S

รูปที่ 4.6 ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก C, C1S และ C2S

4.1.4.2 รูปแบบการวิบัติของมอร์ต้าร์ที่เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 50 มิลลิเมตร

มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1 : 0 มีลักษณะการวิบัติจากการรับแรงกด (ผ่าซีก) เกิดรอยแตกร้าวเป็นไปอย่างช้า ๆ ไม่รุนแรง ไม่พบรอยแตกร้าวขนาดใหญ่ที่นำไปสู่การวิบัติ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยเหล็กมีความสามารถในการยึดรั้งรอยแตกร้าว ซึ่งเพิ่มความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวของแท่งตัวอย่างทำให้รอยร้าวที่เกิดขึ้นไม่สามารถขยายตัวไปเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่ได้ ทำให้หลังการวิบัติจะยังคงรูปและไม่แตกออกจากกัน ดังรูปที่ 4.7 (ก) สำหรับมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร อัตรส่วนผสมมอร์ต้าร์ 1 : 1 และ 1 : 2 ลักษณะการวิบัติจะไปในทิศทางเดียวกับมอร์ต้าร์อัตราส่วนผสม 1 : 0 แต่จะจำนวนรอยแตกร้าวของมอร์ต้าร์ 1 : 2 และ 1 : 1 จะน้อยและเล็กกว่า ความเสียหายจากการวิบัติก็จะน้อยกว่าตามลำดับ ดังรูปที่ 4.7 (ข) และ (ค)

(ก) C-SF 50 **(ข) C1S-SF 50** **(ค) C2S-SF 50**

รูปที่ 4.7 ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก C-SF 50, C1S-SF 50 และ C2S-SF 50

4.1.4.3 รูปแบบการวิบัติของมอร์ต้าร์ที่เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 60 มิลลิเมตร

มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 60 มิลลิเมตร ลักษณะการวิบัติจากการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีก จะมีรูปแบบคล้ายกับมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร โดยที่อัตราส่วนผสม 1 : 0 จะมีรอยแตกร้าวกว้างกว่า อัตราส่วนผสม 1 : 1 และ 1 : 2 และลักษณะความเสียหายหลังการวิบัติของอัตราส่วนผสม 1 : 0 ก็จะมีมากกว่า อัตราส่วนผสม 1 : 1 และ 1 : 2 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8 (ก), (ข) และ (ค)

(ก) C-SF 60 **(ข) C1S-SF 60** **(ค) C2S-SF 60**

รูปที่ 4.8 ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก C-SF 60, C1S-SF 60 และ C2S-SF 60

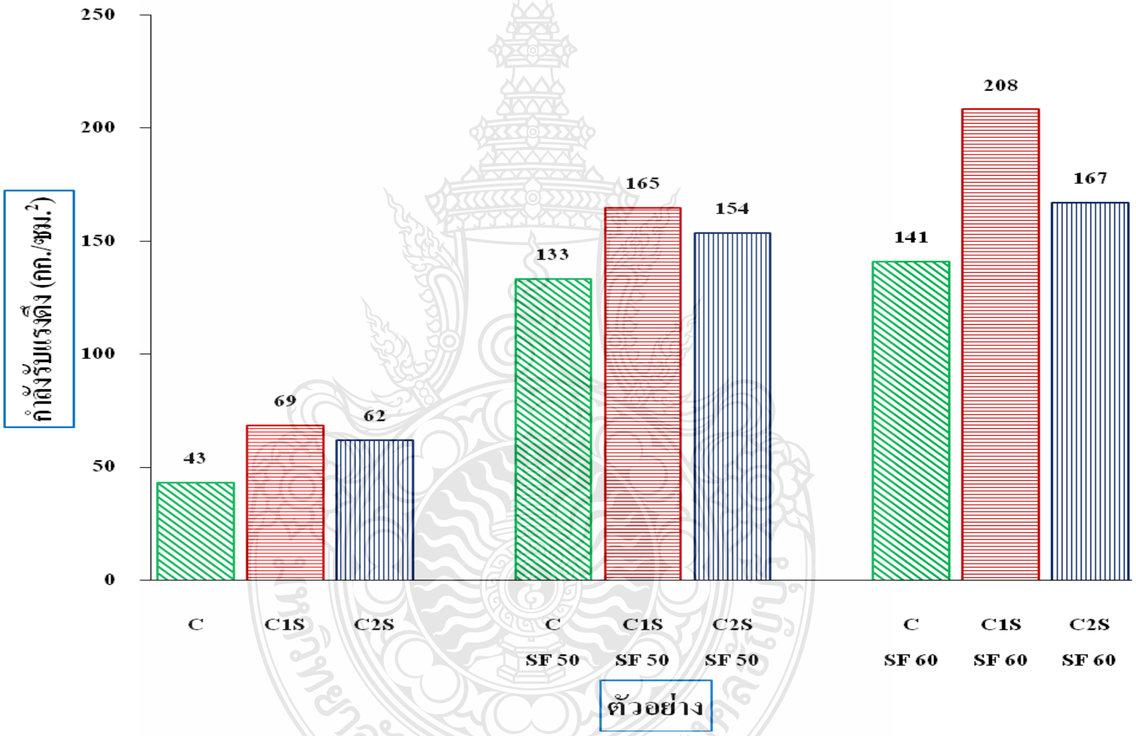
การวิบัติของตัวอย่างมอร์ต้าร์และมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง ที่เกิดจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก มีลักษณะของความเสียหายที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ ทวีชัย สำราญวานิช และคณะ [13] และงานวิจัยของ ประพนธ์ เฟื่องฟู [14] โดยคอนกรีตธรรมดาจะเสียหายด้วยการแตกแบบเปราะ (การผ่าแยก) ที่ผิวรอยต่อในมอร์ต้าร์ลักษณะการแตกร้าวนั้นจึงมีจำนวนรอยร้าวน้อยและมีขนาดใหญ่ ส่วนคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีลักษณะการวิบัติจากการเลื่อนไถลด้วยแรงเฉือนเป็นแนวเฉียงรวมกับการมีอยู่ของเส้นใยเหล็กที่ยึดรั้งรอยร้าวไว้ การเกิดรอยร้าวเป็นไปอย่างช้า ๆ ไม่รุนแรง พบรอยแตกร้าวขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ไม่พบรอยแตกร้าวขนาดใหญ่ที่นำไปสู่การวิบัติ

4.1.5 กำลังรับแรงดัด

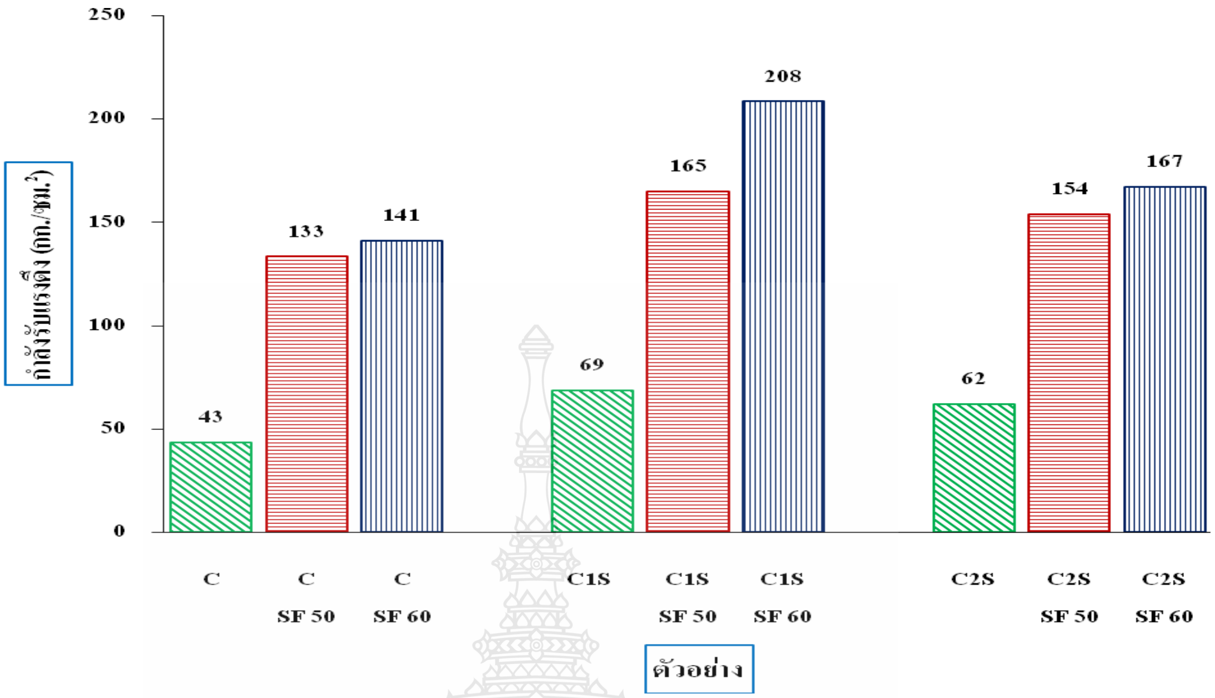
จากผลการทดสอบแรงดัดคานของตัวอย่างมอร์ต้าร์ C, C1S และ C2S ในรูปที่ 4.9 พบว่า ค่าหน่วยแรงดึงที่ได้จากการทดสอบแรงดัดในคานของตัวอย่าง C1S ให้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด แต่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ C ให้ค่ากำลังรับแรงดึงต่ำสุด เป็นผลมาจากส่วนผสมของตัวอย่าง C มีน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการใช้หล่อลื่นส่วนผสมมาก ทำให้มีผลต่อค่าแรงดึงของคอนกรีตที่ได้มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับตัวอย่าง C1S ซึ่งเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมจึงให้ค่าหน่วยแรงดึงสูงสุด สำหรับการทดสอบแรงดัดของคานตัวอย่าง C-SF50, C1S-SF 50 และ C2S-SF 50 ในรูปที่ 4.9 พบว่า มีทิศทางไปในแนวทางเดียวกับตัวอย่างคานมอร์ต้าร์ C, C1S และ C2S คือ ตัวอย่างคาน C1S-SF 50 จะให้ค่าหน่วยแรงดึงดีที่สุด เนื่องจาก ตัวอย่าง C-SF 50 มีน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการใช้หล่อลื่นส่วนผสมมาก ซึ่งมีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้าร์และเส้นใยเหล็ก สำหรับตัวอย่าง C2S-SF 50 จะพบว่า มีปริมาณทรายอยู่ในส่วนผสมมากซึ่งมีผลต่อกำลังของมอร์ต้าร์ ทำให้แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นไม่แข็งแรง จึงทำให้ค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่าตัวอย่าง C1S-SF 50 ในรูปที่ 4.9 แสดงค่าแรงดึงจากการทดสอบแรงดัดของคานของตัวอย่าง C-SF 60, C1S-SF 60 และ C2S-SF 60 พบว่า ทิศทางของค่าแรงดึงเป็นไปในทิศทางเดียวกับตัวอย่าง C-SF 50, C1S-SF 50 และ C2S-SF 50 คือตัวอย่าง C1S-SF 60 ให้ค่าแรงดึงจากการทดสอบแรงดัดในคานสูงสุด แต่ตัวอย่าง C-SF 60, C1S-SF 60 และ C2S-SF 60 มีค่าแรงดึงจากการทดสอบแรงดัดในคานสูงกว่าตัวอย่าง C-SF 50, C1S-SF50 และ C2S-SF 50 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบจากรูปที่ 4.10 ตัวอย่างคานมอร์ต้าร์อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 : 0 (C, C SF-50 และ C SF-60) อัตราส่วนผสม 1 : 1 (C1S, C1S SF-50 และ C1S SF-60) และอัตราส่วนผสม 1 : 2 (C2S, C2S SF-50 และ C2S SF-60) พบว่า ค่าหน่วยแรงดึงที่ได้จากการทดสอบไปในทิศทางเดียวกันคือ คานมอร์ต้าร์SF-50 และ SF-60 มีกำลังรับแรงดึงมากกว่าคานมอร์ต้าร์ C เนื่องจาก

เส้นใยเหล็กช่วยรับแรงดึง โดยที่การเสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 60 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงมากกว่าการเสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 50 มิลลิเมตร เนื่องจากกำลังรับแรงดึงขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยว (Bond) ระหว่างเส้นใยเหล็กกับวัสดุประสานซีเมนต์ เส้นใยเหล็กยาวกว่ามีแรงยึดเหนี่ยวมากกว่า ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ งานวิจัยของ ชูชัย สุจิวรกุล [15] ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การผสมเส้นใยเหล็กในมอร์ต้าร์สามารถเพิ่มสมรรถนะในการรับโมเมนต์ดัดของคานได้เป็นอย่างดี ซึ่งสมรรถนะในการรับโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นใยเหล็ก กำลังของมอร์ต้าร์ที่ใช้และขนาดของคาน โดยพฤติกรรมการรับแรงดึงขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยว (Bond) ระหว่างไฟเบอร์และวัสดุประสานซีเมนต์



รูปที่ 4.9 กำลังดัดของคานมอร์ต้าร์และคานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก



รูปที่ 4.10 กำลังดัดของคานมอร์ต้าร์และคานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กอัตราส่วนผสม 1:0, 1:1 และ 1:2

4.1.6 รูปแบบการวิบัติ (Failure Pattern) จากการทดสอบแรงดัด

4.1.6.1 รูปแบบการวิบัติของคานมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็ก

คานมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็กอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1 : 0 จะพังด้วยการแตกหักแบบเปราะ (จากการรับแรงดัด) ที่ผิวรอยต่อและลักษณะการแตกร้าวจะมีขนาดใหญ่การวิบัติจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงชิ้นตัวอย่างจะขาดออกจากกันอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.11 (ก) สำหรับคานมอร์ต้าร์ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็กอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1: 1 และ 1: 2 จะมีลักษณะการวิบัติไปในทิศทางเดียวกับอัตราส่วนผสม 1 : 0 ดังรูปที่ 4.11 (ข) และ (ค)

(ก) C

(ข) C1S

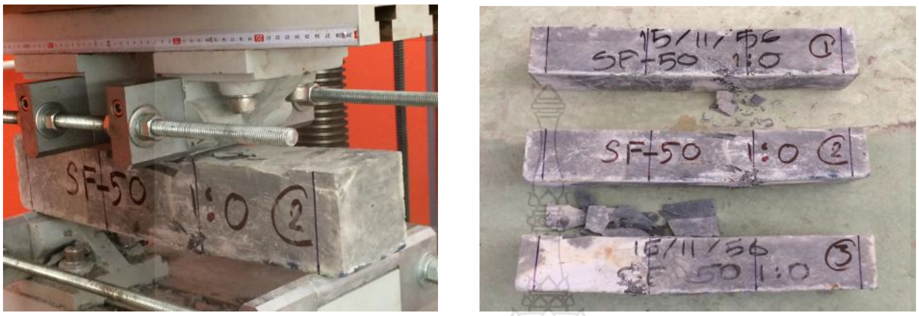
(ค) C2S

รูปที่ 4.11 ผลจากการทดสอบแรงดัด C, C1S และ C2S

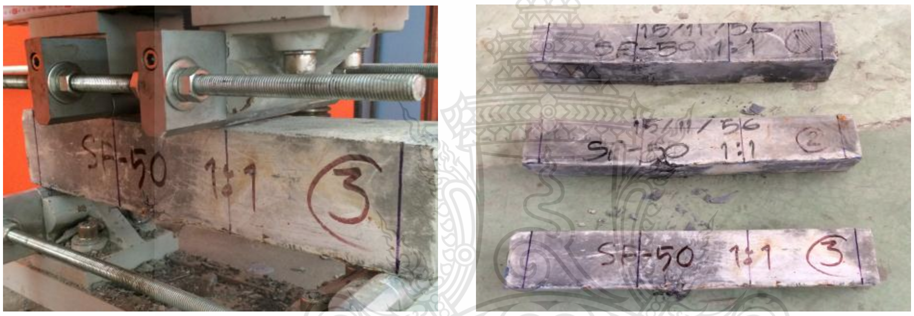
4.1.6.2 รูปแบบการวิบัติของคานมอร์ต้าร์ที่เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 50 มิลลิเมตร

คานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1 : 0, 1 : 1 และ 1 : 2 มีลักษณะการวิบัติจากการรับแรงดัดแตกเป็นแนวเฉียงจากผิวล่าง ตำแหน่ง L/3 ของจุดรองรับเอียงขึ้นด้านผิวบนตำแหน่งรับแรงกด การเกิดรอยร้าวเป็นไปอย่างช้าๆ ไม่รุนแรง พบรอยแตกร้าวขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ไม่พบรอยแตกร้าวขนาดใหญ่ที่นำไปสู่การวิบัติทั้งนี้ เนื่องจากเส้นใยเหล็กมีความสามารถในการยึดรั้งรอยแตกร้าว ซึ่งเพิ่มความสามารถในการต้านทาน

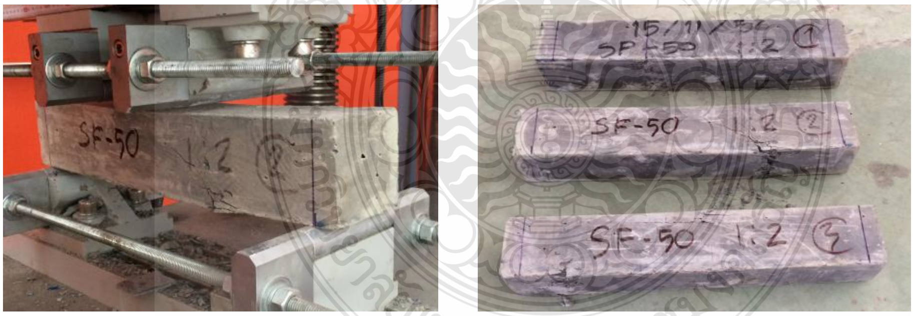
การแตกร้าวของคานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง ทำให้รอยร้าวที่เกิดขึ้นไม่สามารถขยายตัวไปเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่ได้ ทำให้หลังการวิบัติจะยังคงรูปและไม่แตกออกจากกัน ดังรูปที่ 4.12 (ก), (ข) และ (ค)



(ก) C-SF 50



(ข) C1S-SF 50

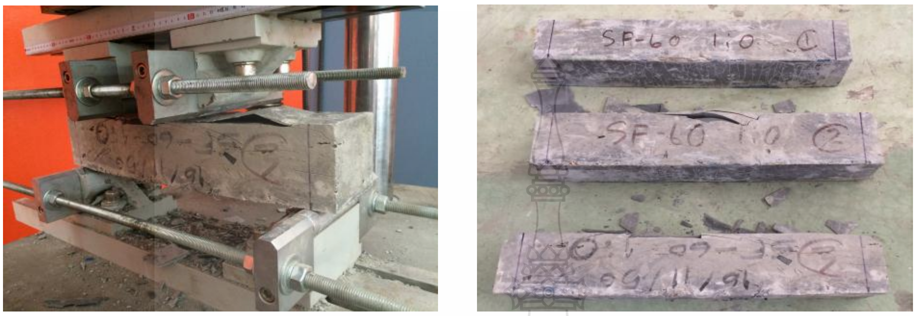


(ค) C2S-SF 50

รูปที่ 4.12 การทดสอบและผลจากการทดสอบแรงดัด C-SF 50, C1S-SF 50 และ C2S-SF 50

4.1.6.3 รูปแบบการวิบัติของคานมอร์ต้าร์ที่เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 60 มิลลิเมตร

คานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 60 มิลลิเมตร อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1 : 0, 1 : 1 และ 1 : 2 มีลักษณะการวิบัติจากการรับแรงดัดไปในทิศทางเดียวกับมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.13 (ก), (ข) และ (ค)



(ก) C-SF 60

(ข) C1S-SF 60

(ค) C2S-SF 60

รูปที่ 4.13 การทดสอบและผลจากการทดสอบแรงดัด C-SF 60, C1S-SF 60 และ C2S-SF 60

ตารางที่ 4.1 กำลังรับแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต

สัดส่วนผสม	**ค่าแรงดึงร้อยละ 10 ของกำลังอัด (กก./ซม.^{2})**	**แรงดึงแบบผ่าซีก (กก./ซม.^{2})**	**แรงดึงจากการทดสอบแรงดัด (กก./ซม.^{2})**
C	50.18	20.94	43.38
C1S	42.22	23.92	68.52
C2S	38.76	33.47	62.15
C-SF 50	26.25	80.47	132.62
C1S-SF 50	32.91	98.18	164.87
C2S-SF 50	44.60	90.89	153.89
C-SF 60	19.49	29.99	141.03
C1S-SF 60	23.38	60.67	208.41
C2S-SF 60	36.22	56.17	169.09

จากตารางที่ 4.1 ค่าแรงดึงร้อยละ 10 ของกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็ก มีค่าแรงดึงลดลงตามอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทรายจาก 1 : 0, 1 : 1 และ 1 : 2 ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลงทำให้กำลังอัดลดลง สำหรับแรงดึงแบบผ่าซีกมีค่าแรงดึงเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เพิ่มขึ้น จาก 1 : 0, 1 : 1 และ 1 : 2 ตามลำดับ เนื่องจากทรายที่อยู่ในส่วนผสมอาจจะมีผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวของมอร์ต้าร์ดีขึ้น และค่าแรงดึงร้อยละ 10 ของกำลังอัดของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 50 มิลลิเมตร มีค่าแรงดึงเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0, 1 : 1 และ 1 : 2 ตามลำดับ เนื่องจากการใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ ทำให้อัตราส่วนผสม 1 : 0 และ1 : 1 มีน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการใช้ในการหล่อลื่นส่วนผสมมากกว่าอัตราส่วนผสม 1 : 2 ซึ่งมีผลต่อกำลังอัดลดลง และการเสริมเส้นใยเหล็กยาว 60 มิลลิเมตร ก็มีผลไปในทิศทางเดียวกันกับเสริมใยเหล็ก ยาว 50 มิลลิเมตร สำหรับค่าแรงดึงแบบผ่าซีกของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง ความยาวของเส้นใยเหล็ก ยาว 50 มิลลิเมตร และ 60 มิลลิเมตร มีผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกัน คือ อัตราส่วนผสม 1 : 0 มีค่าแรงดึงแบบผ่าซีกน้อยสุด เนื่องจากมีน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการใช้ในการหล่อลื่นส่วนผสมมากกว่า อัตราส่วนผสม 1 : 1 และ 1 : 2 จึงมีผลทำให้แรงดึงแบบผ่าซีกต่ำไปด้วย แต่อัตราส่วนผสม 1 : 1 มีค่าแรงดึงแบบผ่าซีกมากที่สุด เนื่องจากเป็น

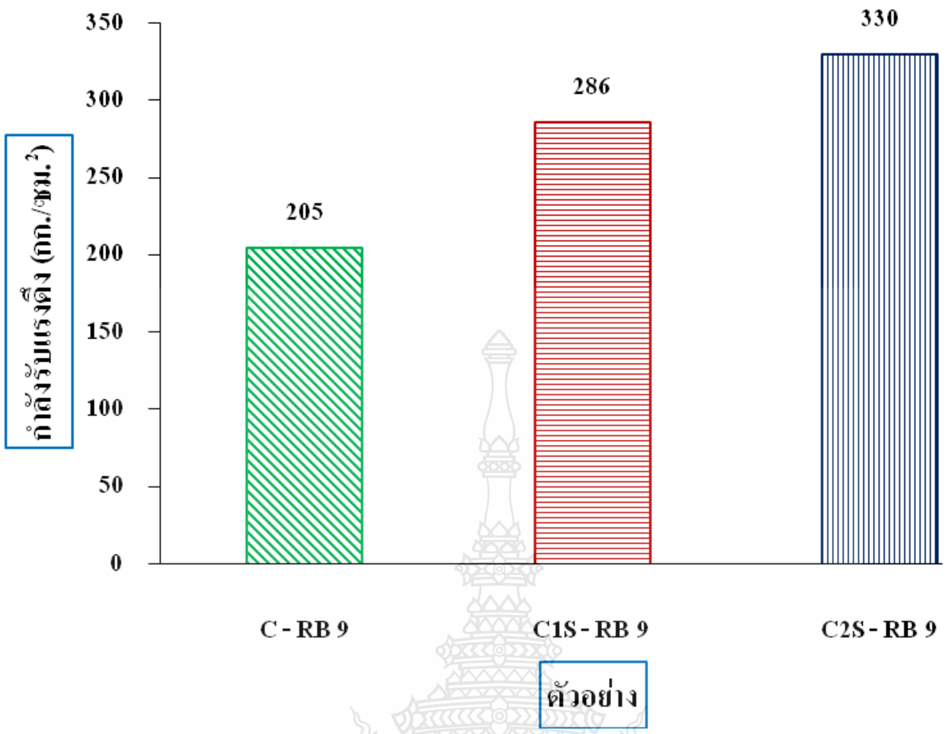
อัตราส่วนผสมที่ทำให้มีการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุประสานและเส้นใยเหล็กดีที่สุดในอัตราส่วนผสม1 : 2 มีค่าแรงดึงแบบผ่าซีกน้อยกว่าอัตราส่วนผสม 1 : 1 เนื่องจากมีปริมาณทรายที่มากกว่า และมีความข้นเหลวน้อยกว่าทำให้ความหนาแน่นและการยึดจับระหว่างมอร์ต้าร์กับเส้นใยเหล็กทำได้ดีไม่เท่ากับอัตราส่วนผสม 1 : 1 และกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 50 มิลลิเมตร มีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 60 มิลลิเมตร เนื่องจากการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กในแบบหล่อขนาดสั้นจะมีการกระจายตัวในแนวตั้งฉากกับทิศทางแรงกดผ่าซีก จากการทดสอบได้ดีกว่าเส้นใยเหล็กที่มีขนาดยาว สำหรับค่าแรงดึงที่ได้จากการทดสอบแรงดัด มีทิศทางไปในทางเดียวกันกับการทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก ทั้งของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 50 มิลลิเมตร และยาว 60 มิลลิเมตร คือ อัตราส่วนผสม 1 : 1 มีค่าแรงดึงจากการทดสอบแรงดัดมากที่สุดและอัตราส่วนผสม 1 : 0 มีค่าแรงดึงน้อยที่สุดและมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 60 มิลลิเมตร ค่าแรงดึงที่ได้จากการทดสอบแรงดัดมากกว่า มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 50 มิลลิเมตร เนื่องจากกำลังรับแรงดึงขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กกับวัสดุประสานซีเมนต์ เส้นใยเหล็กที่ยาวกว่ามีแรงยึดเหนี่ยวมากกว่า และจากการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็กพบว่า ค่าแรงดึงแบบผ่าซีกต่ำกว่าค่าแรงดึงร้อยละ 10 ของกำลังอัด ค่าแรงดึงจากการทดสอบแรงดัดสูงกว่าค่าแรงดึงร้อยละ 10 ของกำลังอัด โดยทั่วไปแรงดึงโดยวิธีผ่าซีกมีค่าประมาณร้อยละ 50 ถึง 75 ของแรงดึงโดยวิธีดัด [3] ซึ่งก็สอดคล้องกับผลที่ได้ สำหรับมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง ความยาวของเส้นใยเหล็กยาว 50 และ 60 มิลลิเมตร มีค่าแรงดึงจากการทดสอบแรงดัดสูงกว่าแรงดึงแบบผ่าซีก เนื่องจากการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กในแบบหล่อของคานทดสอบแรงดัด จะอยู่ในแนวรับแรงดึงได้ดีกว่าแบบหล่อของแท่งทรงกระบอกทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก และแรงดึงแบบผ่าซีกสูงกว่าค่าแรงดึงร้อยละ 10 ของกำลังอัด เนื่องจากมีเส้นใยเหล็กช่วยยึดประสานในการรับแรงดึงจากการทดสอบ และมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร มีค่าแรงดึงร้อยละ 10 ของกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกสูงกว่า มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 60 มิลลิเมตร เนื่องจากการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กในแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดสั้นจะมีการกระจายตัวในแนวตั้งฉากกับทิศทางแรงกด จากการทดสอบได้ดีกว่าเส้นใยเหล็กที่มีขนาดยาว สำหรับค่าแรงดึงจากการทดสอบแรงดัดมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 60 มิลลิเมตร มีค่าสูงกว่ามอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร เนื่องจากเส้นใยเหล็กช่วยรับแรงดึงโดยที่การเสริมเส้นใยเหล็กยาว 60 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงมากกว่าการเสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร เนื่องจาก กำลังรับแรงดึงขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กกับวัสดุประสานซีเมนต์ เส้นใยเหล็กที่ยาวกว่ามีแรงยึดเหนี่ยวมากกว่า

4.2 มอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น

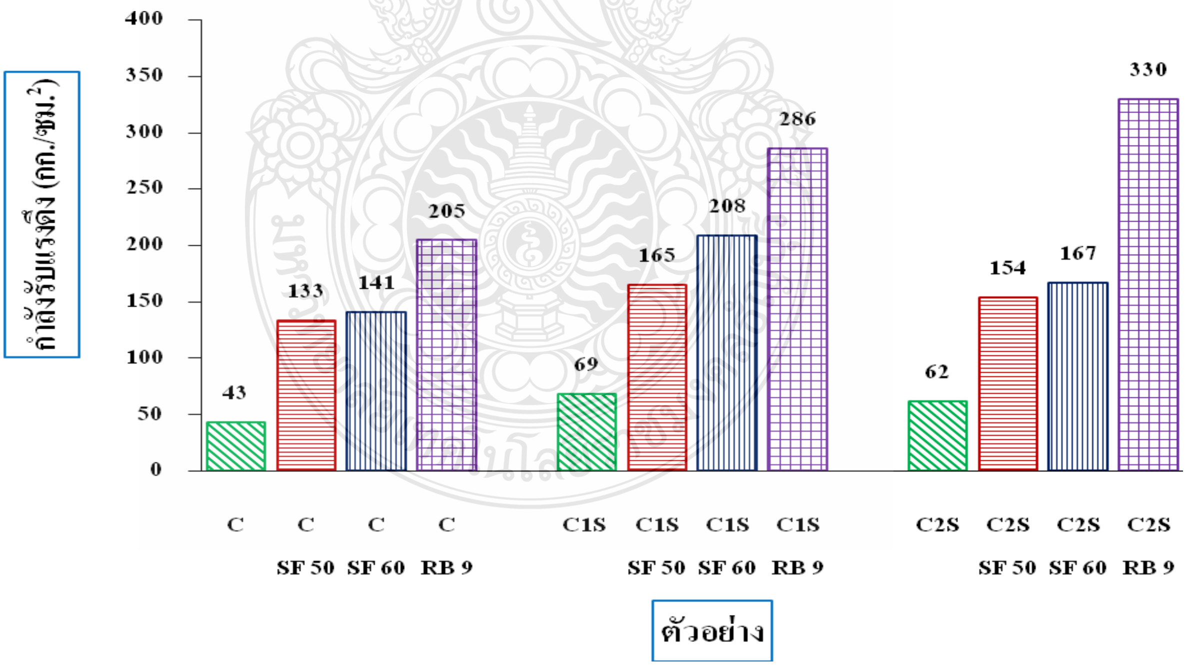
4.2.1 กำลังรับแรงดัด

จากผลการทดสอบแรงดัดของตัวอย่างคานเสริมเหล็กเส้น C-RB 9, C1S-RB 9 และ C2S-RB 9 ในรูปที่ 4.14 พบว่า ค่าหน่วยแรงดึงที่ได้จากการทดสอบแรงดัดในคานตัวอย่าง C1S-RB 9 ให้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด แต่ตัวอย่างคานมอร์ต้าร์ C-RB 9 ให้ค่ากำลังรับแรงดึงต่ำสุด เป็นผลมาจากส่วนผสมของตัวอย่าง C-RB 9 มีน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการใช้ในการหล่อลื่นส่วนผสมมาก ทำให้มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ต้าร์กับเหล็กเสริมมีผลทำให้หน่วยแรงดึงที่ได้มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับตัวอย่าง C1S ซึ่งเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมจึงให้ค่าหน่วยแรงดึงสูงสุด สำหรับตัวอย่างคานมอร์ต้าร์ C2S-RB 9 จะพบว่า มีปริมาณทรายอยู่ในส่วนผสมมากซึ่งมีผลต่อกำลังของมอร์ต้าร์ ทำให้แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นไม่แข็งแรง จึงทำให้ค่าหน่วยแรงดึงที่ได้น้อยกว่าตัวอย่างคานมอร์ต้าร์ C1S-RB 9 ซึ่งผลการทดสอบแรงดัดที่ได้มีทิศทางไปในแนวทางเดียวกับตัวอย่างคานมอร์ต้าร์ C-SF 50, C1S-SF 50, C2S-SF 50 , C-SF 60, C1S-SF 60 และ C2S-SF 60 คือ อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1 มีค่าหน่วยแรงดึงสูงกว่าอัตราส่วนผสม 1 : 2 และ 1 : 0 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบจากรูปที่ 4.15 ตัวอย่างคานมอร์ต้าร์อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 : 0 (C, C-SF 50, C-SF 60 และ C-RB 9) อัตราส่วนผสม 1 : 1 (C1S, C1S-SF 50, C1S-SF 60 และ C1S-RB 9) และอัตราส่วนผสม 1 : 2 (C2S, C2S-SF 50, C2S-SF 60 และ C2S-RB 9) พบว่า ค่าหน่วยแรงดึงที่ได้จากการทดสอบไปในทิศทางเดียวกัน คือ คานมอร์ต้าร์ RB 9 มีกำลังรับแรงดึงมากกว่า SF 60 , SF 50 และคานมอร์ต้าร์ C ตามลำดับ เนื่องจากความสามารถในการรับแรงดึงของคานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กและวัสดุประสานซีเมนต์ โดยปกติแล้วแรงยึดเหนี่ยวจะลดลงเมื่อขนาดความกว้างของรอยร้าวมากขึ้น คานที่ลึกกว่าจะให้รอยร้าวที่กว้างกว่าส่งผลให้กำลังดัดลดลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ ชูชัย สุจิวรกุล [15] โดยพฤติกรรมการรับแรงดึงขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฟเบอร์และวัสดุประสานซีเมนต์ จะลดลงเมื่อขนาดความกว้างของรอยร้าวมากขึ้น จากเหตุผลนี้ทำให้คานที่ลึกกว่าจะให้รอยร้าวที่กว้างกว่าซึ่งส่งผลทำให้กำลังดัดลดลง และคานมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นตำแหน่งเหล็กเสริมจะอยู่ใกล้รอยแตกร้าว คานที่ลึกจะรับแรงดัดได้มากกว่า



รูปที่ 4.14 กำลังดัดของคานมอร์ต้าร์เสริมเหล็ก RB – 9



รูปที่ 4.15 กำลังดัดของคานมอร์ต้าร์ คานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก และคานมอร์ต้าร์เสริมเหล็ก RB-9

4.2.2 รูปแบบการวิบัติ (Failure Pattern) จากการทดสอบแรงดัดของคานมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น

คานมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นมีลักษณะการวิบัติจากการรับแรงดัดแตกเป็นแนวเฉียงจากจุดรองรับไปยังจุดที่รับแรงกดรวมกับการมีอยู่ของเหล็กปลอกและเหล็กเสริมตามยาวที่ยึดรั้งรอยร้าวไว้ การเกิดรอยร้าวเป็นไปอย่างช้า ๆ ไม่รุนแรง พบรอยร้าวจำนวนหลายรอย ไม่พบรอยร้าวขนาดใหญ่ที่นำไปสู่การวิบัติ ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กเสริมมีความสามารถยึดรั้งรอยแตกร้าว ซึ่งเพิ่มความสามารถต้านทานการแตกร้าวของคานมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น ทำให้รอยร้าวที่เกิดขึ้นไม่สามารถขยายตัวไปเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่ได้ ทำให้หลังการวิบัติจะยังคงรูปและไม่แตกออกจากกัน ดังรูปที่ 4.16 (ก), (ข) และ (ค)ซึ่งลักษณะของการวิบัติที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัย ของ ทวีชัย สำราญวานิช และคณะ [13] และงานวิจัยของ H Sudarsana และคณะ [1] ที่แสดงให้เห็นว่า การเสริมเส้นใยเหล็กมีผลทำให้รอยร้าวที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลง

(ก) C-RB 9

(ข) C1S-RB 9

(ค) C1S-RB 9

รูปที่ 4.16 แสดงการทดสอบและผลจากการทดสอบแรงดัด C-RB 9, C1S-RB 9, C2S-RB 9

4.3 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดระหว่างคานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงกับคานมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลม

4.3.1 คานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง

จากผลการทดสอบแรงดัดของคานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงพบว่า ค่าแรงดัดที่ได้ทั้งมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร และ 60 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดัดน้อยกว่ามอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร เนื่องจากการรับแรงดึงของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยว ระหว่างเส้นใยเหล็กและวัสดุประสานซีเมนต์ ซึ่งผลที่ได้มีทิศทางไปในแนวทางเดียวกับงานวิจัยของ ชูชัย สุจิวรกุล [15] โดยคานที่ทำจากวัสดุผสมซีเมนต์เสริมไฟเบอร์ที่มีความลึกมากกว่าจะให้ความเค้นดัดเทียบเท่าสูงสุด หรือโมดูลัสการแตกร้าวที่น้อยกว่าคานที่มีความลึกน้อยกว่าสำหรับคานที่มีความลึกเท่ากัน การเพิ่มความยาวช่วงคานจะส่งผลต่อประสิทธิผลของกำลังดัด หรือโมดูลัสการแตกร้าวของวัสดุผสมซีเมนต์เสริมไฟเบอร์น้อยมาก หรือแทบไม่มีความแตกต่าง และความยาวที่มีสัดส่วนความยาวช่วงต่อความลึก (S/D) เท่ากัน จะให้ระดับความยืดหยุ่น (Ductility) ที่มีค่าใกล้เคียงกันแม้คานจะมีความลึกและความยาวแตกต่างกัน ซึ่งอิทธิพลต่าง ๆ ของคานที่กล่าวมา เกิดจากพฤติกรรมการรับแรงดึงหลังการแตกร้าวของวัสดุประสานซีเมนต์ (Post Cracking Behavior) ซึ่งกำลังนี้เกิดจากการที่ไฟเบอร์ยึดเหนี่ยวรอยแตกร้าวนี้ โดยพฤติกรรมการรับแรงดึงขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฟเบอร์และวัสดุประสานซีเมนต์ ซึ่งโดยปกติแล้วแรงยึดเหนี่ยวนี้จะลดลงเมื่อขนาดความกว้างของรอยร้าวมากขึ้น จากเหตุผลนี้ทำให้คานที่ลึกกว่าจะให้รอยร้าวที่กว้างกว่า ซึ่งส่งผลทำให้กำลังดัดลดลง

4.3.2 คานมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลม

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดขอคานมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร ที่มีขนาดความยาวช่วงและความลึก (S/D) เท่ากับขนาดของคานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง ซึ่งผลที่ได้โมดูลัสการแตกร้าวของคานมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลมมีค่ามากกว่าโมดูลัสการแตกร้าวของคานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง แต่คานมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลมต้องมีการเสริมเหล็กปลอกเพื่อป้องกันการวิบัติ เนื่องจากแรงเฉือนและการเสริมเหล็กเส้นกลมของคานมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลมออยู่ที่ตำแหน่งผิวบนและผิวล่างของคาน คานที่มีความลึกมากมีกำลังรับแรงดัดมาก คานที่มีความลึกน้อยกำลังรับแรงดัดน้อย

4.4 ค่าใช้จ่ายของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงกับมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลม

4.4.1 มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก

1. เส้นใยเหล็ก เท่ากับ 2.751 กก.ๆ ละ 60.00 เป็นเงิน 165.06 บาท

4.4.2 มอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร และเสริมเหล็กปลอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จำนวน 14 ปลอก

1. เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร เท่ากับ 2.744 กก.ๆ ละ 21.07 เท่ากับ 57.82 บาท
2. เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เท่ากับ 1.243 กก.ๆ ละ 22.19 เท่ากับ 27.58 บาท
3. ค่าตัดและผูกเหล็ก เท่ากับ 3.987 กก.ๆ ละ 2.80 เท่ากับ 3.99 บาท

รวมเท่ากับ 89.39 บาท

4.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงกับมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น

4.5.1 ราคา

มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงมีราคาสูงกว่ามอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น

4.5.2 ความรวดเร็วในการทำงาน

มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงใช้เวลาในการทำงานน้อยกว่า เนื่องจากมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น ต้องใช้เวลาในการทำงาน ตัด ดัด และผูกเหล็กส่วนมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงนำเส้นใยเหล็กมาวางกระจายลงในแบบหล่อได้เลย

4.5.3 ความหนาของโครงสร้าง

มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงมีความเหมาะสมกับโครงสร้างที่มีความหนาน้อยและพื้นที่จำกัดได้มากกว่ามอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้น เนื่องจาก สามารถจัดวางเส้นใยเหล็กในพื้นที่จำกัดได้ดีกว่าการเสริมเหล็กเส้น

4.5.4 ความแข็งแรง

โครงสร้างที่มีความหนามากมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นจะมีความสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่า แต่ถ้าโครงสร้างที่มีความหนาน้อย เช่นลักษณะของแผ่นพื้น ที่มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงจะมีความสามารถรับน้ำหนักได้ดีกว่า

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ความยาวของเส้นใยเหล็กและอัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายแตกต่างกันมีผลกระทบต่อกำลังอัด แรงดึงและแรงดัดของมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยเหล็กชนิดงอปลายในปริมาณสูง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 คุณสมบัติในด้านกำลังรับแรงอัด

กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็กจะมีกำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณสัดส่วนผสมของทรายที่เพิ่มขึ้น สำหรับมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง จะมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้ทรายที่เพิ่มขึ้น และในอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0 และ 1 : 1 พบว่ามอร์ต้าร์ที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็กมีกำลังรับแรงอัดมากกว่ามอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง และจากการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงอัดมากกว่ามอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 60 มิลลิเมตร

5.1.2 คุณสมบัติในด้านกำลังรับแรงดึง

กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็ก จะมีค่าแรงดึงมากขึ้นตามสัดส่วนของทรายที่มากขึ้นในส่วนผสม สำหรับมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง มีกำลังรับแรงดึงมากกว่ามอร์ต้าร์ที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็ก และมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงในอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:1 มีค่าแรงดึงมากสุด และจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร พบว่า มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกมากกว่ามอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กยาว 60 มิลลิเมตร

5.1.3 คุณสมบัติในการรับแรงดัด

กำลังรับแรงดึงจากการทดสอบแรงดัดของคานมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็กค่าหน่วยแรงต่ำสุดที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0 และอัตราส่วนผสม 1 : 1 จะให้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด ซึ่งเป็นส่วนผสมที่เหมาะสม

กำลังรับแรงดึงจากการทดสอบแรงดัดของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง มีค่าหน่วยแรงดึงมากกว่าคานมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็ก และมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กในอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1 มีค่าแรงดึงจากการทดสอบแรงดัดสูงกว่าอัตราส่วนผสม 1 : 0 และ 1 : 2 และการเสริมเส้นใยเหล็กยาว 60 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงมากกกว่าการเสริมเส้นใยเหล็กยาว 50 มิลลิเมตร

กำลังรับแรงดึงจากการทดสอบแรงดัดของคานมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1 มีค่าแรงดึงจากการทดสอบแรงดัดสูงสุด อัตราส่วนผสม 1:0 มีค่าแรงดึงน้อยกว่าอัตราส่วนผสม 1 : 2 และ 1 : 1 ตามลำดับคานมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลมที่มีความลึกมาก จะรับแรงดัดได้มาก แต่ต้องมีการเสริมเหล็กปลอก เพื่อป้องกันการวิบัติ เนื่องจากแรงเฉือน ดังนั้นในพื้นที่จำกัดที่ต้องการความหนาของโครงสร้างน้อยๆ การใช้มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง จึงเหมาะสมกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งนี้ผลที่ได้เป็นเพียงข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้นเกี่ยวกับ แนวทางการนำเส้นใยเหล็กมาใช้ในงานโครงสร้างมอร์ต้าร์โดยได้ศึกษาถึงอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทรายและความยาวของเส้นใยเหล็ก และทำการทดสอบตัวอย่างแท่งทรงกระบอกและตัวอย่างคานที่มีขนาดคงที่เท่านั้น ควรทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในด้านอื่น ๆ อีกซึ่งผู้วิจัยขอเสนอแนวทางไว้สำหรับผู้ที่สนใจจะทำการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

5.2.1 ควรมีการศึกษาการใช้มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงสำหรับงานโครงสร้างเปลือกบางที่มีความหนาน้อย

5.2.2 ควรมีการศึกษาการนำมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงมาใช้กับงานซ่อมผิวพื้นสะพานและถนน

รายการอ้างอิง

[1] Sudarsana Rao,H. , Gnaneswar,K., & Ramana,N.V., "Behaviour of simply supported steel reinforced SIFCON two way Slab in punching shear,"Indian Journal of Engineering & Materials Science, vol.15, pp.326-333, Aug 2008.

[2] H Sudarsana Rao, "Performance of Steel Reinforced Sifcon two-way Slab in Flexure," 35 th Conference on OUR World in Concrete & Structures, 25-27 Aug. 2010, Singapore.

[3] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัยจาตุรพิทักษ์กุล. (2551). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพมหานคร.

[4] ชัชวาล เศรษบุตร. (2540). คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพมหานคร.

[5] ปิติ สุคนธสุขสกุล, สมยศ วิวัฒน์พัฒนพงศ์ และรณรงค์ แสงพันธ์. (2547). พฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและเส้นใยโพลีโพรพีลีน. (พิมพ์ครั้งที่ 2). การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ สมาคมคอนกรีตไทย.

[6] Bentur, A., & Mindess, S., (1990), Fiber Reinforced Cementitious Composites, Northern Ireland : The Universities Press (Belfast).

[7] Kosmatka, S. H., et al.,(1995),Design and Control of Concrete Mixtures. (6th ed.). United State of America . Engineering Bulletin of Canadian Portland Cement Association.

[8] เทเวศ พรหมจา และวีรชัย ศรีวงษ์คล. (2542). พฤติกรรมของซิลิก้าฟูมคอนกรีตและเส้นใยเหล็ก (ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ).

[9] Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D.(2002).Concrete. (2nd ed.), New Jersey : Pearson Education.,Inc.

[10] ASTM DESIGNINATION : C496-71., Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

[11] วินิต ช่อวิเชียร. (2554). คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพมหานคร.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

[12] ASTM DESIGNINATION : C78, Standard Test Mothod for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Centre –Point Loading)

[13] ทวีชัย สำราญ , อภินันท์ ภูชัย และสุรสิทธิ์ หมั่นวิชา. (เมษายน – มิถุนายน 2550). พฤติกรรมและวิธีการคำนวณกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใย. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. 30 (2).

[14] ประพนธ์ เฟื่องฟู. (2555). พฤติกรรมของคอนกรีตผสมเส้นใยและการต้านทานแรงกระแทกด้วยวิธีตุ้มน้ำหนัก. (ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัญฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).

[15] ชูชัย สุจิวรกุล. (2-4 พฤษภาคม 2548). อิทธิพลขนาดชิ้นส่วนรับโมเมนต์ดัดของวัสดุผสมซีเมนต์
เสริมไฟเบอร์เหล็ก. เอกสารการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 10. ชลบุรี.

[16] ปิติ สุคนธสุขกุล และสุรชัย สุทธิธรรมมา. (2549). ดรรชนีความเหนียวคอนกรีตผสมเส้นใยไฟเบอร์เหล็กและพลาสติกสังเคราะห์โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM และ JSCE. (พิมพ์ครั้งที่ 2). เอกสารการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี. กรุงเทพมหานคร.

[17] Eren, O., & Celik,T., “Effect of silica fume and steel fibers on some properties of high-strength concrete,” Construction and Building Materisl, vol. 11, pp. 373-382,1997.

[18] C.X.Qian & P.Stroeven, “ Development of hybrid polypropylene-steel fiber reinforced concrete,” Cement and Concrete Research, vol. 30, pp. 63-69, Jan 2000.

[19] Mansur, M., Ahmad, I. & Paramasivam, P., “Punching shear strength of simply supported forrocement slabs,” Journal of Meterials in Civil Engineering, vol. 3, pp. 418-426, Dec 2001.

[20] An Yan, Keru Wu & Xiong Zhang, “A Quantitative study the surface crack pattern of concrete with high content of steel fiber,” Cement and Concrete Research, vol. 32, pp.1371-1375, Sep 2002.

[21] R.M.de Gutierrez, L.N.Diaz & S.Delvasto, “Effect of pozzolans on the performance of fiber-reinforced mortars ,” Cement and Concrete Composites, vol. 27, pp. 593-598, May 2005.

[22] Ali R. Khaloo & Majid Afshari, “Flexural behavior of small steel fibre reinforced concrete slabs ,” Cement and concrete Composites, vol. 27, pp. 141-149, Jan 2005.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

[23] Halit Yazici, Hueyin Yigiter , Serdar Aydin & Bulent Baradan , “Auto claved SIFCON with high volume class C fly ash binder phase,” Cement and Concrete Research, vol. 36, pp. 481- 486, Mar 2006.

[24] Topcu , I.B., & Canbaz, M., “Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash,” Construction and Building Materials, vol. 21, pp.1486-1491, Jul 2007.

[25] Ahmed S.F.H.,Maalej, M. & Paramasivam, P. “Flexural respnoses of hybrid steel-polythylene fiber reinforced cement composites containing high volume fly ash,” Construction and Building Materials, vol. 21, pp. 1008-1097, May 2007.

[26] Atis,C.D. & Karahan ,O., “ Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete,” Construction and Building Materials, vol. 23, pp. 392-399, Dec 2009.

[27] ASTM DESIGNINATION : C39., Standard Test Method for Compressive of Cylindrecal Concrete Specimens.

[28] Adel Mohamed Gilani. (September 2007). Various Durability Aspect Of Slurry Infiltrated Fiber Concrete.(In partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in civil engineering middle east technical university).

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณหาวัสดุผสมต่อลูกบาศก์เมตร

ตัวอย่างการคำนวณหาวัสดุผสมต่อลูกบาศก์เมตร

โดยใช้ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ = 0.55

จะได้น้ำหนักรวม = น้ำหนักปูนซีเมนต์ + น้ำหนักน้ำ

$$1.0 = \frac{C}{3{,}150} + \frac{0.55 \times C}{3{,}150}$$

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย = 1 : 0

ปูนซีเมนต์ $= \dfrac{1.0 \times 3{,}150}{1.55} = 2{,}032.26$ kg

น้ำ $= 2{,}032.26 \times 0.55 = 1{,}117.74$ kg

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย = 1 : 1

ปูนซีเมนต์ $= \dfrac{1.0 \times 3{,}150}{2 \times 1.55} = 1{,}016.13$ kg

น้ำ $= 1{,}016.13 \times 0.55 = 558.87$ kg

ทราย $= 1{,}016.13 \times 1 = 1{,}016.13$ kg

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย = 1 : 2

ปูนซีเมนต์ $= \dfrac{1.0 \times 3{,}150}{3 \times 1.55} = 677.42$ kg

น้ำ $= 677.42 \times 0.55 = 372.58$ kg

ทราย $= 677.42 \times 2 = 1{,}354.84$ kg

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กรณีผสมเส้นใยเหล็ก 7% โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ = 0.55

จะได้น้ำหนักรวม = น้ำหนักปูนซีเมนต์ + น้ำหนักน้ำ

$$0.93 = \frac{C}{3{,}150} + \frac{0.55 \times C}{3{,}150}$$

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย = 1 : 0

ปูนซีเมนต์ = $\frac{0.93 \times 3{,}150}{1.55} = 1{,}890$ kg

น้ำ = $1{,}890 \times 0.55 = 1{,}039.50$ kg

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย = 1 : 1

ปูนซีเมนต์ = $\frac{0.93 \times 3{,}150}{2 \times 1.55} = 945$ kg

น้ำ = $945 \times 0.55 = 519.75$ kg

ทราย = $945 \times 1 = 945$ kg

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย = 1 : 2

ปูนซีเมนต์ = $\frac{0.93 \times 3{,}150}{3 \times 1.55} = 630$ kg

น้ำ = $630 \times 0.55 = 346.50$ kg

ทราย = $630 \times 2 = 1{,}260$ kg

ความถ่วงจำเพาะของเส้นใยเหล็ก = 7,860 kg/m^3

ใช้เส้นใยเหล็ก = $\frac{7 \times 7{,}860}{100} = 550.20$ kg

ภาคผนวก ข

รายการคำนวณมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลม RB-9 มม.

รายการคำนวณมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลม RB-9 มม. อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 2

ออกแบบเหล็กเสริมคาน $0.10 \times 0.10 \times 0.50 \quad m.$

ใช้เหล็กเสริม $2.751 \quad kg.$

ใช้ $11 - RB9 = 2.744 \ \ kg. \quad A_s = 7.04 \ \ cm^2 \ \ F_y = 2{,}400 \quad ksc$

ส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย $1:2 \quad f_c' = \dfrac{387.56}{1.04} = 372.65 \quad ksc$

$280 \ ksc < f_c' \le 560 \quad ksc$

$$\beta_1 = 0.85 - \frac{0.05}{70}\left(f_c' - 280\right) = 0.78$$

$d = 8.50 \quad cm.$

$d' = 1.50 \quad cm.$

$$\rho_{\min} = \frac{14}{F_y} = \frac{14}{2{,}400} = 0.00583$$

$$\rho_b = \beta_1 \frac{0.85 f_c'}{F_y} \cdot \frac{6{,}120}{6{,}120 + F_y}$$

$$= \frac{0.78 \times 0.85 \times 372.65 \times 6{,}120}{2{,}400 \times (6{,}120 + 2{,}400)}$$

$$= 0.07395 > \rho_{\min}$$

$$(\rho - \rho')_{\min} = \beta_1 \frac{0.85 f_c'}{F_y} \cdot \frac{d'}{d} \cdot \frac{6{,}120}{(6{,}120 - F_y)}$$

$$= \frac{0.78 \times 0.85 \times 372.65 \times 1.5 \times 6{,}120}{2{,}400 \times 8.5 \times (6{,}120 - 2{,}400)}$$

$$= 0.02989$$

$$(\rho - \rho') = 0.75 \rho_b$$

$$= 0.75 \times 0.07395$$

$= 0.05546 > (\rho - \rho')_{\min}$ เหล็กเสริมรับแรงอัดคราก $f_s' = F_y = 2{,}400 \quad ksc$

กำหนดให้ $\rho' = 0.4\rho$

$(\rho - \rho')_{\max} = 0.05546$

$\rho - 0.4\rho = 0.05546$

$\rho = 0.09243$

$\rho'_{\max} = 0.03697$

$A_s'_{\max} = 0.03697 \times 10 \times 8.5$

$= 3.142 \quad cm^2$

$(\rho - \rho')_{\min} = 0.02989$

$\rho - 0.4\rho = 0.02989$

$\rho = 0.04982$

$\rho'_{\min} = 0.01993$

$A_s'_{\min} = 0.01993 \times 10 \times 8.5$

$= 1.69 \quad cm^2$

เลือกใช้ $A_s' = 4 - RB9 = 2.54 \quad cm^2$

$A_s = 11 - 4 = 7 - RB9 = 4.45 \quad cm^2$

$$\rho - \rho' = \frac{A_s - A_s'}{bd}$$

$$= \frac{4.45 - 2.54}{10 \times 8.5}$$

$= 0.02247 < (\rho - \rho')_{\min}$ เหล็กเสริมรับแรงอัดไม่คราก $f_s' < F_y$

$$R = \frac{6{,}120A_s' - A_sF_y}{1.7\beta_1 f_c' b}$$

$$= \frac{6{,}120 \times 2.54 - 4.45 \times 2{,}400}{1.7 \times 0.78 \times 372.65 \times 10}$$

$$= 0.98451$$

$$Q = \frac{6{,}120 d' A_s'}{0.85\beta_1 f_c' b}$$

$$= \frac{6{,}120 \times 1.5 \times 2.54}{0.85 \times 0.78 \times 372.65 \times 10}$$

$$= 9.4376$$

$$C = -R \pm \sqrt{R^2 + Q}$$

$$= -0.98451 \pm \sqrt{0.98451^2 + 9.4376}$$

$$= 2.241$$

$$f_s' = 6{,}120\left(1 - \frac{d'}{c}\right)$$

$$= 6{,}120\left(1 - \frac{1.5}{2.241}\right)$$

$$= 2{,}023.61 \quad ksc < F_y$$

$$a = \beta_1 c$$

$$= 0.78 \times 2.241$$

$$= 1.74798$$

$$M_u = \left(A_sF_y - A_s' f_s'\right)\left(d - \frac{a}{2}\right) + A_s' f_s'\left(d - d'\right)$$

$$= \left(4.45 \times 2{,}400 - 2.54 \times 2{,}023.61\right)\left(8.5 - \frac{1.74798}{2}\right) + 2.54 \times 2{,}023.61 \times \left(8.5 - 1.5\right)$$

$$= 78{,}227.94 \quad kg.-cm.$$

$$M = \frac{PL}{6} \; ; \; L = 45 \quad cm.$$

$$P \times \frac{45}{6} = 78{,}227.94 \quad kg.-cm.$$

$$P = 10{,}430.39 \quad kg.$$

$$V_u = \frac{P}{2}$$

$$V_u = 5{,}215.20 \quad kg.$$

$$V_c = 0.53\sqrt{fc'}bd$$

$$V_c = 0.53\sqrt{372.65} \times 10 \times 8.5$$

$$= 869.65 \quad kg.$$

ใช้เหล็กปลอก $RB6 \qquad A_s = 0.57 \quad cm^2$

$$S = \frac{A_s F_y d}{V_u - V_c}$$

$$= \frac{0.57 \times 2{,}400 \times 8.5}{5{,}215.20 - 869.65}$$

$$= 2.68 \quad cm. < \frac{d}{2} = \frac{8.5}{2} = 4.25 \quad cm.$$

กรณีต้องการให้เหล็กเสริมรับแรงอัดคราก

$$A_s' = 3 - RB9 = 1.91 \quad cm^2$$

$$A_s = 8 - RB9 = 5.09 \quad cm^2$$

$$\rho - \rho' = \frac{A_s - A_s'}{bd}$$

$$= \frac{5.09 - 1.91}{10x8.5}$$

$= 0.03741 > (\rho - \rho')_{\min}$ เหล็กเสริมรับแรงอัดคราก

$$f_s' = F_y = 2{,}400 \quad ksc$$

$$a = \frac{(\rho - \rho')f_y}{0.85 f_c'} \cdot d$$

$$= \frac{0.03741x2,400x8.5}{0.85x372.65}$$

$$= 2.409$$

$$M_u = (A_s F_y - A_s' f_s')\left(d - \frac{a}{2}\right) + A_s' f_s'(d - d')$$

$$= (5.09 \times 2,400 - 1.91 \times 2,400)\left(8.5 - \frac{2.409}{2}\right) + 1.91 \times 2,400 \times (8.5 - 1.5)$$

$$= 87,767.256 \quad kg.-cm.$$

$$M = \frac{PL}{6} \;;\; L = 45 \quad cm.$$

$$P \times \frac{45}{6} = 87,767.256 \quad kg.-cm.$$

$$P = 11,702.30 \quad kg.$$

$$V_u = \frac{P}{2}$$

$$V_u = 5,851.15 \quad kg.$$

$$V_c = 0.53\sqrt{f_c'}bd$$

$$V_c = 0.53\sqrt{372.65} \times 10 \times 8.5$$

$$= 869.65 \quad kg.$$

ใช้เหล็กปลอก $RB6$ $A_s = 0.57 \quad cm^2$

$$S = \frac{A_s F_y d}{V_u - V_c}$$

$$= \frac{0.57 \times 2,400 \times 8.5}{5,851.15 - 869.65}$$

$$= 2.33 \quad cm. < \frac{d}{2} = \frac{8.5}{2} = 4.25 \quad cm.$$

ดังนั้นใช้ เหล็กเสริมล่าง $= 8 - RB9$ มม.

เหล็กเสริมบน $= 3 - RB9$ มม.

เหล็กปลอก $RB6$ มม. ข้างละ 7 ปลอก รวม $= 14$ ปลอก

รายการคำนวณมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลม RB-9 มม. อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1

ออกแบบเหล็กเสริมคาน $0.10 \times 0.10 \times 0.50 \quad m.$

ใช้เหล็กเสริม $2.751 \quad kg.$

ใช้ $11 - RB9 = 2.744 \ \ kg. \quad A_s = 7.04 \ \ cm^2 \ \ F_y = 2{,}400 \quad ksc$

ส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย $1:1 \ \ f_c' = \dfrac{422.20}{1.04} = 405.96 \quad ksc$

$280 \ ksc < f_c' \le 560 \quad ksc$

$$\beta_1 = 0.85 - \frac{0.05}{70}\left(f_c' - 280\right) = 0.76$$

$d = 8.50 \quad cm.$

$d' = 1.50 \quad cm.$

$$\rho_{\min} = \frac{14}{F_y} = \frac{14}{2{,}400} = 0.00583$$

$$\rho_b = \beta_1 \frac{0.85 f_c'}{F_y} \cdot \frac{6{,}120}{6{,}120 + F_y}$$

$$= \frac{0.76 \times 0.85 \times 405.96 \times 6{,}120}{2{,}400 \times \left(6{,}120 + 2{,}400\right)}$$

$$= 0.07849 > \rho_{\min}$$

$$\left(\rho - \rho'\right)_{\min} = \beta_1 \frac{0.85 f_c'}{F_y} \cdot \frac{d'}{d} \cdot \frac{6{,}120}{\left(6{,}120 - F_y\right)}$$

$$= \frac{0.76 \times 0.85 \times 405.96 \times 1.5 \times 6{,}120}{2{,}400 \times 8.5 \times \left(6{,}120 - 2{,}400\right)}$$

$$= 0.03172$$

$$\left(\rho - \rho'\right) = 0.75 \rho_b$$

$$= 0.75 \times 0.07849$$

$= 0.05887 > \left(\rho - \rho'\right)_{\min}$ เหล็กเสริมรับแรงอัดคราก $f_s' = F_y = 2{,}400 \quad ksc$

กำหนดให้ $\rho' = 0.4\rho$

$(\rho - \rho')_{\max} = 0.05887$

$\rho - 0.4\rho = 0.05887$

$\rho = 0.09812$

$\rho'_{\max} = 0.03925$

$A_s'_{\max} = 0.03925 \times 10 \times 8.5$

$= 3.336 \quad cm^2$

$(\rho - \rho')_{\min} = 0.03172$

$\rho - 0.4\rho = 0.03172$

$\rho = 0.05287$

$\rho'_{\min} = 0.02115$

$A_s'_{\min} = 0.02115 \times 10 \times 8.5$

$= 1.80 \quad cm^2$

เลือกใช้ $A_s' = 3 - RB9 = 1.91 \quad cm^2$

$A_s = 8 - RB9 = 5.09 \quad cm^2$

$$\rho - \rho' = \frac{A_s - A_s'}{bd}$$

$$= \frac{5.09 - 1.91}{10x8.5}$$

$= 0.03741 > (\rho - \rho')_{\min}$ เหล็กเสริมรับแรงอัดคราก

$f_s' = F_y = 2{,}400 \quad ksc$

$$a = \frac{(\rho - \rho')f_y}{0.85 f_c'} \cdot d$$

$$= \frac{0.03741x2{,}400x8.5}{0.85x405.96}$$

$= 2.212$

$$M_u = (A_s F_y - A_s' f_s')\left(d - \frac{a}{2}\right) + A_s' f_s'(d - d')$$

$$= (5.09 \times 2{,}400 - 1.91 \times 2{,}400)\left(8.5 - \frac{2.212}{2}\right) + 1.91 \times 2{,}400 \times (8.5 - 1.5)$$

$$= 88{,}519.01 \quad kg.-cm.$$

$$M = \frac{PL}{6} \; ; \; L = 45 \quad cm.$$

$$P \times \frac{45}{6} = 88{,}519.01 \quad kg.-cm.$$

$$P = 11{,}802.53 \quad kg.$$

$$V_u = \frac{P}{2}$$

$$V_u = 5{,}901.27 \quad kg.$$

$$V_c = 0.53\sqrt{f_c'}bd$$

$$V_c = 0.53\sqrt{405.96} \times 10 \times 8.5$$

$$= 907.69 \quad kg.$$

ใช้เหล็กปลอก $RB6$ $A_s = 0.57 \quad cm^2$

$$S = \frac{A_s F_y d}{V_u - V_c}$$

$$= \frac{0.57 \times 2{,}400 \times 8.5}{5{,}901.27 - 907.69}$$

$$= 2.33 \quad cm. < \frac{d}{2} = \frac{8.5}{2} = 4.25 \quad cm.$$

ดังนั้นใช้ เหล็กเสริมล่าง $= 8 - RB9$ มม.

เหล็กเสริมบน $= 3 - RB9$ มม.

เหล็กปลอก $RB6$ มม. ข้างละ 7 ปลอก รวม $= 14$ ปลอก

รายการคำนวณมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลม RB-9 มม. อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0

ออกแบบเหล็กเสริมคาน $0.10 \times 0.10 \times 0.50 \quad m.$

ใช้เหล็กเสริม $2.751 \quad kg.$

ใช้ $11 - RB9 = 2.744 \;\; kg. \quad A_s = 7.04 \;\; cm^2 \;\; F_y = 2{,}400 \quad ksc$

ส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย $1:0 \;\; f_c' = \dfrac{501.77}{1.04} = 482.47 \quad ksc$

$280 \; ksc < f_c' \le 560 \quad ksc$

$$\beta_1 = 0.85 - \frac{0.05}{70}\left(f_c' - 280\right) = 0.70$$

$d = 8.50 \quad cm.$

$d' = 1.50 \quad cm.$

$$\rho_{\min} = \frac{14}{F_y} = \frac{14}{2{,}400} = 0.00583$$

$$\rho_b = \beta_1 \frac{0.85 f_c'}{F_y} \cdot \frac{6{,}120}{6{,}120 + F_y}$$

$$= \frac{0.70 \times 0.85 \times 482.47 \times 6{,}120}{2{,}400 \times (6{,}120 + 2{,}400)}$$

$$= 0.08592 > \rho_{\min}$$

$$(\rho - \rho')_{\min} = \beta_1 \frac{0.85 f_c'}{F_y} \cdot \frac{d'}{d} \cdot \frac{6{,}120}{(6{,}120 - F_y)}$$

$$= \frac{0.70 \times 0.85 \times 482.47 \times 1.5 \times 6{,}120}{2{,}400 \times 8.5 \times (6{,}120 - 2{,}400)}$$

$$= 0.03473$$

$$(\rho - \rho') = 0.75 \rho_b$$

$$= 0.75 \times 0.08592$$

$= 0.06444 > (\rho - \rho')_{\min}$ เหล็กเสริมรับแรงอัดคราก $f_s' = F_y = 2{,}400 \quad ksc$

กำหนดให้ $\rho' = 0.4\rho$

$$(\rho - \rho')_{\max} = 0.06444$$

$$\rho - 0.4\rho = 0.06444$$

$$\rho = 0.1074$$

$$\rho'_{\max} = 0.04296$$

$$A_s'_{\max} = 0.04296 \times 10 \times 8.5$$

$$= 3.65 \quad cm^2$$

$$(\rho - \rho')_{\min} = 0.03473$$

$$\rho - 0.4\rho = 0.03473$$

$$\rho = 0.05788$$

$$\rho'_{\min} = 0.02315$$

$$A_s'_{\min} = 0.02315 \times 10 \times 8.5$$

$$= 1.97 \quad cm^2$$

เลือกใช้ $A_s' = 4 - RB9 = 2.54 \quad cm^2$

$$A_s = 11 - 4 = 7 - RB9 = 4.45 \quad cm^2$$

$$\rho - \rho' = \frac{A_s - A_s'}{bd}$$

$$= \frac{4.45 - 2.54}{10 \times 8.5}$$

$= 0.02247 < (\rho - \rho')_{\min}$ เหล็กเสริมรับแรงอัดไม่คราก $f_s' < F_y$

$$R=\frac{6{,}120A_s'-A_sF_y}{1.7\beta_1 f_c'b}$$

$$=\frac{6{,}120\times 2.54-4.45\times 2{,}400}{1.7\times 0.70\times 482.47\times 10}$$

$$=0.84732$$

$$Q=\frac{6{,}120d'A_s'}{0.85\beta_1 f_c'b}$$

$$=\frac{6{,}120\times 1.5\times 2.54}{0.85\times 0.70\times 482.47\times 10}$$

$$=8.122$$

$$C=-R\pm\sqrt{R^2+Q}$$

$$=-0.84732\pm\sqrt{0.84732^2+8.122}$$

$$=2.126$$

$$f_s'=6{,}120\left(1-\frac{d'}{c}\right)$$

$$=6{,}120\left(1-\frac{1.5}{2.126}\right)$$

$$=1{,}802.03\quad ksc<\ F_y$$

$$a=\beta_1 c$$

$$=0.70\times 2.126$$

$$=1.4882$$

$$M_u=\left(A_sF_y-A_s'f_s'\right)\left(d-\frac{a}{2}\right)+A_s'f_s'\left(d-d'\right)$$

$$=\left(4.45\times 2{,}400-2.54\times 1{,}802.03\right)\left(8.5-\frac{1.4882}{2}\right)+2.54\times 1{,}802.03\times\left(8.5-1.5\right)$$

$$=79{,}373.14\quad kg.-cm.$$

$$M = \frac{PL}{6} \; ; \; L = 45 \quad cm.$$

$$P \times \frac{45}{6} = 79{,}373.14 \quad kg.-cm.$$

$$P = 10{,}583.08 \quad kg.$$

$$V_u = \frac{P}{2}$$

$$V_u = 5{,}291.54 \quad kg.$$

$$V_c = 0.53\sqrt{fc'}bd$$

$$V_c = 0.53\sqrt{482} \times 10 \times 8.5$$

$$= 989.53 \quad kg.$$

ใช้เหล็กปลอก $RB6 \quad A_s = 0.57 \quad cm^2$

$$S = \frac{A_s F_y d}{V_u - V_c}$$

$$= \frac{0.57 \times 2{,}400 \times 8.5}{5{,}291.54 - 989.53}$$

$$= 2.70 \quad cm. < \frac{d}{2} = \frac{8.5}{2} = 4.25 \quad cm.$$

กรณีต้องการให้เหล็กเสริมรับแรงอัดคราก

เลือกใช้ $A_s' = 3 - RB9 = 1.91 \quad cm^2$

$$A_s = 8 - RB9 = 5.09 \quad cm^2$$

$$\rho - \rho' = \frac{A_s - A_s'}{bd}$$

$$= \frac{5.09 - 1.91}{10x8.5}$$

$= 0.03741 > (\rho - \rho')_{\min}$ เหล็กเสริมรับแรงอัดคราก

$$f_s' = F_y = 2{,}400 \quad ksc$$

$$a = \frac{(\rho - \rho')f_y}{0.85 f_c'} \cdot d$$

$$= \frac{0.03741x2,400x8.5}{0.85x482.47}$$

$$= 1.86$$

$$M_u = (A_s F_y - A_s' f_s')\left(d - \frac{a}{2}\right) + A_s' f_s'(d - d')$$

$$= (5.09 \times 2,400 - 1.91 \times 2,400)\left(8.5 - \frac{1.86}{2}\right) + 1.91 \times 2,400 \times (8.5 - 1.5)$$

$$= 89,862.24 \quad kg. - cm.$$

$$M = \frac{PL}{6} \; ; \; L = 45 \quad cm.$$

$$P \times \frac{45}{6} = 89,862.24 \quad kg. - cm.$$

$$P = 11,981.63 \quad kg.$$

$$V_u = \frac{P}{2}$$

$$V_u = 5,990.82 \quad kg.$$

$$V_c = 0.53\sqrt{f_c'}bd$$

$$V_c = 0.53\sqrt{482.47} \times 10 \times 8.5$$

$$= 989.53 \quad kg.$$

ใช้เหล็กปลอก $RB6$ $A_s = 0.57 \quad cm^2$

$$S = \frac{A_s F_y d}{V_u - V_c}$$

$$= \frac{0.57 \times 2,400 \times 8.5}{5,990.82 - 989.53}$$

$$= 2.33 \quad cm. < \frac{d}{2} = \frac{8.5}{2} = 4.25 \quad cm.$$

ดังนั้นใช้ เหล็กเสริมล่าง $= 8 - RB9$ มม.

เหล็กเสริมบน $= 3 - RB9$ มม.

เหล็กปลอก $RB6$ มม. ข้างละ 7 ปลอก รวม $= 14$ ปลอก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ภาคผนวก ค

ภาพบรรยายประกอบงานวิจัย

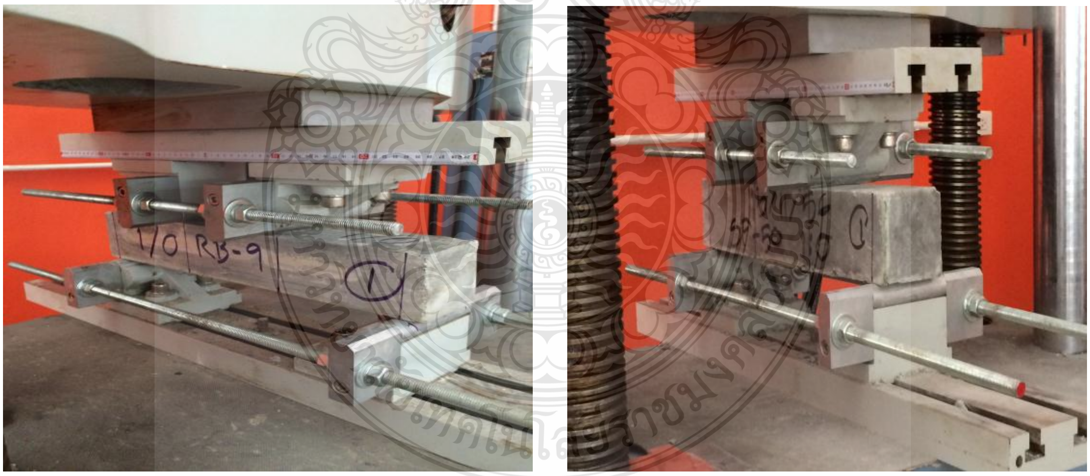
ภาพที่ ค.1 ตัวอย่างที่ได้รับความเสียหายจากการเสริมเส้นใยเหล็กมากเกินไป

ภาพที่ ค.2 การหล่อตัวอย่าง (แท่งทรงกระบอก)

ภาพที่ ค.3 การหล่อตัวอย่าง (คานมอร์ต้าร์)

ภาพที่ ค.4 การทดสอบแรงอัด

ภาพที่ ค.5 การทดสอบแรงดึงแยกแบบผ่าซีก



ภาพที่ ค.6 การทดสอบแรงดัด

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย
1 : 0

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย
1 : 1

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย
1 : 2

ภาพที่ ค.7 ความเสียหายจากการทดสอบแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย
1 : 0

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย
1 : 1

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย
1 : 2

ภาพที่ ค.8 ความเสียหายจากการทดสอบแรงดึงแยกแบบผ่าซีกของตัวอย่างมอร์ต้าร์

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย

1 : 0

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย

1 : 1

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย

1 : 2

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย

1 : 0

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย

1 : 1

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย

1 : 2

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย

1 : 0

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย

1 : 1

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย

1 : 2

ภาพที่ ค.9 ความเสียหายจากการทดสอบแรงดัดของตัวอย่างคานมอร์ต้าร์

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 2

ภาพที่ ค.10 ความเสียหายจากการทดสอบแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก SF-50

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 2

ภาพที่ ค.11 รูปความเสียหายจากการทดสอบแรงดึงแยกแบบผ่าซีกของตัวอย่างมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก SF-50

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 2

ภาพที่ ค.12 ความเสียหายจากการทดสอบแรงดัดของตัวอย่างคานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก SF-50

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย
1 : 0

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย
1 : 1

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย
1 : 2

ภาพที่ ค.13 ความเสียหายจากการทดสอบแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก SF-60

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย
1 : 0

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย
1 : 1

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย
1 : 2

ภาพที่ ค.14 ความเสียหายจากการทดสอบแรงดึงแยกแบบผ่าซีกของตัวอย่างมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก SF-60

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 2

ภาพที่ ค.15 ความเสียหายจากการทดสอบแรงดัดของตัวอย่างคานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก SF-60

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1

อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 2

ภาพที่ ค.16 ความเสียหายจากการทดสอบแรงดัดของตัวอย่างคานมอร์ต้าร์เสริมเหล็กเส้นกลม RB-9 มม.

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบและตารางการคำนวณ

การทดสอบแรงอัดของคอนกรีต

วันที่ทำการทดสอบแรงอัด 26, 27 และ 28/06/2556 วันที่ทำการผสม 29, 30 และ 31/05/2556 อายุของคอนกรีต 28 วัน

ปฏิภาคส่วนผสม 1 : 0 , 1 : 1 และ 1 : 2 โดย(น้ำหนัก)

ชนิดของซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 โดย (น้ำหนัก)

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (kg)	ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ขนาด สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	ปริมาตร (cm^3)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)	น้ำหนักประลัย (kN)	น้ำหนักประลัย (kg)	กำลังอัดประลัย (ksc)	กำลังอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (ksc)
ทรงกระบอก (ทำการ Capping)										
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0 (โดยน้ำหนัก)										
1	3.28	10.20	20.00	81.71	1,634.26	2.01	290.00	29,588.82	362.11	
2	3.12	10.00	20.00	78.54	1,570.80	1.99	490.00	49,994.90	636.55	501.77
3	3.18	10.00	20.50	78.54	1,610.07	1.98	390.00	39,791.86	506.65	
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1 (โดยน้ำหนัก)										
1	3.38	10.00	20.50	78.54	1,610.07	2.10	340.00	34,690.34	441.69	
2	3.56	10.00	20.00	78.54	1,570.80	2.27	265.00	27,038.06	344.26	422.20
3	3.40	10.00	20.00	78.54	1,570.80	2.16	370.00	37,751.25	480.66	
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 2 (โดยน้ำหนัก)										
1	3.50	10.00	20.50	78.54	1,610.07	2.17	470.00	47,954.29	610.57	
2	3.52	10.00	20.50	78.54	1,610.07	2.19	435.00	44,383.23	565.10	552.11
3	3.48	10.00	20.20	78.54	1,586.50	2.19	370.00	37,751.25	480.66	

การทดสอบแรงอัดของคอนกรีต

วันที่ทำการทดสอบแรงอัด 6,7/07/2556 วันที่ทำการผสม 8,9/06/2556 อายุของคอนกรีต 28 วัน

ปฏิภาคส่วนผสม 1 : 0 , 1 : 1 และ 1 : 2 โดย(น้ำหนัก)

ชนิดของซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 โดย (น้ำหนัก)

ขนาดของเส้นใยเหล็ก 0.55 x 50 มม.

ตัวอย่าง	น้ำหนัก	ขนาด		พื้นที่	ปริมาตร	หน่วย	น้ำหนัก	น้ำหนัก	กำลังอัด	กำลังอัด
		เส้นผ่านศูนย์กลาง	สูง	หน้าตัด		น้ำหนัก	ประลัย	ประลัย	ประลัย	เฉลี่ยของตัวอย่าง
	(kg)	(cm)	(cm)	(cm^2)	(cm^3)	(kg/m^3)	(kN)	(kg)	(ksc)	(ksc)
ทรงกระบอก (ทำการ Capping)										
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0 (โดยน้ำหนัก)										
1	3.66	10.00	20.50	78.54	1,610.07	2.27	180.00	18,365.47	233.84	
2	3.54	10.00	20.30	78.54	1,594.36	2.22	240.00	24,487.30	311.78	262.53
3	3.78	10.10	20.50	80.12	1,642.43	2.30	190.00	19,385.78	241.96	
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1 (โดยน้ำหนัก)										
1	4.02	10.00	20.40	78.54	1,602.21	2.51	250.00	25,507.60	324.77	
2	3.94	10.00	20.40	78.54	1,602.21	2.46	250.00	25,507.60	324.77	329.10
3	4.02	10.00	20.20	78.54	1,586.50	2.53	260.00	26,527.91	337.76	
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 2 (โดยน้ำหนัก)										
1	4.20	10.00	20.50	78.54	1,610.07	2.61	305.00	31,119.27	396.22	
2	4.16	10.00	20.40	78.54	1,602.21	2.60	355.00	36,220.79	461.18	446.02
3	4.08	10.00	20.20	78.54	1,586.50	2.57	370.00	37,751.25	480.66	

การทดสอบแรงอัดของคอนกรีต

วันที่ทำการทดสอบแรงอัด 28 และ 30/06/2556 วันที่ทำการผสม 30/4/2556 และ 2/05/2556 อายุของคอนกรีต 28 วัน

ปฏิภาคส่วนผสม 1 : 0 , 1 : 1 และ 1 : 2 โดย(น้ำหนัก)

ชนิดของซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 โดย (น้ำหนัก)

ขนาดของเส้นใยเหล็ก 0.55 x 60 มม.

ตัวอย่าง	น้ำหนัก	ขนาด		พื้นที่	ปริมาตร	หน่วย	น้ำหนัก	น้ำหนัก	กำลังอัด	กำลังอัด
		เส้นผ่านศูนย์กลาง	สูง	หน้าตัด		น้ำหนัก	ประลัย	ประลัย	ประลัย	เฉลี่ยของตัวอย่าง
	(kg)	(cm)	(cm)	(cm ^{2})	(cm ^{3})	(kg/m ^{3})	(kN)	(kg)	(ksc)	(ksc)
ทรงกระบอก (ทำการ Capping)										
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0 (โดยน้ำหนัก)										
1	3.60	10.00	20.30	78.54	1,594.36	2.26	150.00	15,304.56	194.86	
2	3.58	10.00	20.30	78.54	1,594.36	2.25	140.00	14,284.26	181.87	194.86
3	3.68	10.00	20.50	78.54	1,610.07	2.29	160.00	16,324.86	207.85	
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1 (โดยน้ำหนัก)										
1	4.02	10.00	20.50	78.54	1,610.07	2.50	170.00	17,345.17	220.85	
2	3.98	10.00	20.30	78.54	1,594.36	2.50	210.00	21,426.39	272.81	233.84
3	4.02	10.00	20.30	78.54	1,594.36	2.52	160.00	16,324.86	207.85	
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 2 (โดยน้ำหนัก)										
1	4.18	10.00	20.50	78.54	1,610.07	2.60	265.00	27,038.06	344.26	
2	4.30	10.00	20.50	78.54	1,610.07	2.67	280.00	28,568.51	363.75	362.25
3	4.10	9.80	20.20	75.43	1,523.68	2.69	280.00	28,568.51	378.74	

การทดสอบความต้านทานแรงดึงแยกของคอนกรีต

ปฏิภาคส่วนผสม 1 : 0 , 1 : 1 และ 1:2 โดย(น้ำหนัก)

ชนิดของซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

แหล่งและชนิดของมวลรวมละเอียด

โมดูลัสความละเอียด

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 โดย (น้ำหนัก)

วันที่ทำการทดสอบแรงอัด 26, 27 และ 28/06/2556

วันที่ทำการผสม 29, 30 และ 31/05/2556 อายุของคอนกรีต 28 วัน

ตัวอย่างที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ความยาว (cm)	น้ำหนัก (kg)	แรงกด P (kg)	แรงดึงแยก T (kg/cm ^{2})
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0 (โดยน้ำหนัก)					
1	10.10	20.20	3.22	7,630.00	23.81
2	10.00	20.40	3.28	6,875.00	21.45
3	10.00	20.20	3.10	5,575.00	17.57
ความต้านทานกำลังดึงแยกเฉลี่ย					62.83
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1 (โดยน้ำหนัก)					
1	9.90	20.50	3.46	6,385.00	20.03
2	10.00	20.50	3.42	6,725.00	20.88
3	10.10	20.40	3.44	9,980.00	30.84
ความต้านทานกำลังดึงแยกเฉลี่ย					71.75
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 2 (โดยน้ำหนัก)					
1	10.20	20.50	3.54	8,350.00	25.42
2	10.00	20.30	3.40	13,880.00	43.53
3	10.00	20.50	3.50	10,130.00	31.46
ความต้านทานกำลังดึงแยกเฉลี่ย					100.41

การทดสอบความต้านทานแรงดึงแยกของคอนกรีต					
ปฏิภาคส่วนผสม 1 : 0 , 1 : 1 และ 1 : 2 โดย(น้ำหนัก)					
ชนิดของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1					
แหล่งและชนิดของมวลรวมละเอียด					
โมดูลัสความละเอียด					
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 โดย (น้ำหนัก)					
วันที่ทำการทดสอบแรงอัด 6 และ 7/07/2556					
วันที่ทำการผสม 8 และ 9/06/2556 อายุของคอนกรีต 28 วัน					
ขนาดของเส้นใยเหล็ก 0.55 x 50 มม.					
ตัวอย่างที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ความยาว (cm)	น้ำหนัก (kg)	แรงกด P (kg)	แรงดึงแยก T (kg/cm ^{2})
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0 (โดยน้ำหนัก)					
1	10.00	20.50	3.52	25,700.00	79.81
2	10.00	20.00	3.64	23,450.00	74.64
3	10.00	20.50	3.72	28,000.00	86.95
ความต้านทานกำลังดึงแยกเฉลี่ย					80.47
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1 (โดยน้ำหนัก)					
1	10.00	20.50	3.96	26,850.00	83.38
2	10.00	20.50	4.02	38,000.00	118.01
3	10.00	20.50	4.04	30,000.00	93.16
ความต้านทานกำลังดึงแยกเฉลี่ย					98.18
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 2 (โดยน้ำหนัก)					
1	10.00	20.50	4.22	40,500.00	125.77
2	10.20	20.50	4.22	31,500.00	95.90
3	10.00	20.20	4.08	27,250.00	85.88
ความต้านทานกำลังดึงแยกเฉลี่ย					102.52

การทดสอบความต้านทานแรงดึงแยกของคอนกรีต					
ปฏิภาคส่วนผสม 1 : 0 , 1 : 1 และ 1 : 2 โดย(น้ำหนัก)					
ชนิดของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1					
แหล่งและชนิดของมวลรวมละเอียด					
โมดูลัสความละเอียด					
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 โดย (น้ำหนัก)					
วันที่ทำการทดสอบแรงอัด 28 และ 30/06/2556					
วันที่ทำการผสม 31 , 2/05/2556 อายุของคอนกรีต 28 วัน					
ขนาดของเส้นใยเหล็ก 0.55 x 60 มม.					
ตัวอย่างที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ความยาว (cm)	น้ำหนัก (kg)	แรงกด P (kg)	แรงดึงแยก T (kg/cm ^{2})
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:0 (โดยน้ำหนัก)					
1	10.00	20.50	3.66	9,420.00	29.25
2	10.00	20.50	3.70	11,260.00	34.97
3	10.00	20.40	3.68	8,250.00	25.75
ความต้านทานกำลังดึงแยกเฉลี่ย					89.97
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:1 (โดยน้ำหนัก)					
1	10.00	20.50	4.02	22,200.00	68.94
2	10.00	20.80	4.08	16,550.00	50.65
3	10.00	20.60	4.04	20,200.00	62.43
ความต้านทานกำลังดึงแยกเฉลี่ย					182.02
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:2 (โดยน้ำหนัก)					
1	10.00	20.00	4.12	18,775.00	59.76
2	10.00	20.80	4.30	15,875.00	48.59
3	10.00	20.40	4.16	19,275.00	60.15
ความต้านทานกำลังดึงแยกเฉลี่ย					168.50

การทดสอบความต้านทานแรงดัดของคอนกรีต

ปฏิภาคส่วนผสม 1 : 0, 1 : 1 และ 1:2 โดย(น้ำหนัก)

ชนิดของซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 โดย (น้ำหนัก)

วันที่ทำการทดสอบแรงดัด 26, 27 และ 28/06/2556

วันที่ทำการผสม 29, 30 และ 31/05/2556 อายุของคอนกรีต 28 วัน

ตัวอย่างที่	ขนาดเฉลี่ย(mm)			น้ำหนัก (kg)	ช่องระหว่างจุดรองรับ L (cm)								
	กว้าง	ยาว	ลึก										
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 0 (โดยน้ำหนัก)													
1	10.20	50.20	10.20	10.38	45.00	แรงกด : P(kg)	840	928	1,010	980	910		
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25		
						R(ksc)	35.62	39.35	42.83	41.56	38.59		
2	10.20	50.20	10.00	10.32	45.00	แรงกด : P(kg)	820	905	985	970	905		
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25		
						R(ksc)	36.18	39.93	43.46	42.79	39.93		
3	10.00	50.40	10.00	9.90	45.00	แรงกด : P(kg)	800	910	975	960	900		
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25		
						R(ksc)	36.00	40.95	43.88	43.20	40.50		
ค่าเฉลี่ย						R(ksc)	35.93	40.08	43.39	42.52	39.67		
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1 (โดยน้ำหนัก)													
1	9.90	50.40	10.20	11.14	45.00	แรงกด : P(kg)	1,311	1,516	1,605	1,570	1,440		
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25		
						R(ksc)	57.28	66.23	70.12	68.59	62.91		

2	10.50	50.40	10.20	11.50	45.00	แรงกด : P(kg)	1,315	1,520	1,600	1,576	1,450		
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25		
						R(ksc)	54.17	62.61	65.91	64.92	59.73		
3	9.90	50.60	10.20	11.04	45.00	แรงกด : P(kg)	1,316	1,521	1,592	1,590	1,456		
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25		
						R(ksc)	57.50	66.45	69.55	69.47	63.61		
ค่าเฉลี่ย						R(ksc)	56.31	65.10	68.53	67.66	62.08		
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 2 (โดยน้ำหนัก)													
1	10.50	50.40	10.20	11.82	45.00	แรงกด : P(kg)	1,156	1,332	1,445	1,370	1,275		
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25		
						R(ksc)	47.62	54.87	59.52	56.43	52.52		
2	10.00	50.30	10.00	11.38	45.00	แรงกด : P(kg)	1,130	1,305	1,420	1,380	1,280		
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25		
						R(ksc)	50.85	58.73	63.90	62.10	57.60		
3	10.00	50.40	10.00	11.18	45.00	แรงกด : P(kg)	1,140	1,290	1,400	1,385	1,280		
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25		
						R(ksc)	51.30	58.05	63.00	62.33	57.60		
ค่าเฉลี่ย						R(ksc)	49.92	57.21	62.14	60.29	55.91		

การทดสอบความต้านทานแรงดัดของคอนกรีต

ปฏิภาคส่วนผสม 1 : 0, 1 : 1 และ 1 : 2 โดย(น้ำหนัก)

ชนิดของซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และเสริมเส้นใยเหล็ก SF-50

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 โดย (น้ำหนัก)

วันที่ทำการทดสอบแรงดัด 2/12/2556

วันที่ทำการผสม 3/11/2556 อายุของคอนกรีต 28 วัน

ตัวอย่างที่	ขนาดเฉลี่ย(mm)			น้ำหนัก	ช่องระหว่างจุดรองรับ								
	กว้าง	ยาว	ลึก	(kg)	L (cm)								
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:0 (โดยน้ำหนัก)													
1	10.20	50.20	10.10	11.72	45.00	แรงกด : P(kg)	1,690	2,130	2,980	3,400	3,310	2,535	
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	
						R(ksc)	73.09	92.12	128.88	147.04	143.15	109.63	
2	10.50	50.60	9.90	11.66	45.00	แรงกด : P(kg)	1,130	1,760	2,840	3,045	3,215	3,180	
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	
						R(ksc)	49.41	76.96	124.19	133.15	140.58	139.05	
3	10.30	50.40	9.90	11.60	45.00	แรงกด : P(kg)	1,590	1,840	2,350	2,640	2,610	2,620	
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	
						R(ksc)	70.88	82.02	104.75	117.68	116.34	116.79	
ค่าเฉลี่ย						R(ksc)	64.46	83.70	119.27	132.63	133.36	121.83	
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:1 (โดยน้ำหนัก)													
1	10.20	50.20	10.20	13.00	45.00	แรงกด : P(kg)	1,250	2,030	3,250	3,620	3,500	3,200	
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	
						R(ksc)	53.01	86.08	137.81	153.50	148.42	135.69	

2	10.40	50.50	9.90	12.82	45.00	แรงกด : P(kg)	1,190	2,440	3,900	4,350	4,250	4,050	
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	
						R(ksc)	52.54	107.72	172.18	192.04	187.63	178.80	
3	10.50	50.40	10.30	13.02	45.00	แรงกด : P(kg)	1,550	2,230	3,380	3,690	3,610	3,200	
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	
						R(ksc)	62.62	90.09	136.54	149.06	145.83	129.27	
ค่าเฉลี่ย						R(ksc)	56.05	94.63	148.84	164.87	160.63	147.92	
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:2 (โดยน้ำหนัก)													
1	10.70	50.40	9.90	12.98	45.00	แรงกด : P(kg)	1,800	2,790	2,640	2,800	2,770	2,560	
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	
						R(ksc)	77.24	119.72	113.28	120.15	118.86	109.85	
2	10.60	50.30	9.90	12.80	45.00	แรงกด : P(kg)	620	1,250	2,980	3,600	3,500	3,500	
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	
						R(ksc)	26.86	54.14	129.08	155.93	151.60	151.60	
3	10.50	50.20	10.20	13.48	45.00	แรงกด : P(kg)	810	2,050	3,950	4,500	4,350	3,700	
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	
						R(ksc)	33.37	84.45	162.71	185.37	179.19	152.41	
ค่าเฉลี่ย						R(ksc)	45.82	86.10	135.02	153.82	149.88	137.96	

การทดสอบความต้านทานแรงดัดของคอนกรีต

ปฏิภาคส่วนผสม 1:0 , 1:1 , 1:2 โดย(น้ำหนัก)

ชนิดของซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และเสริมเส้นใยเหล็ก SF-60

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 โดย (น้ำหนัก)

วันที่ทำการทดสอบแรงดัด 9/12/2556 วันที่ทำการผสม 10/11/2556 อายุของคอนกรีต 28 วัน

ตัวอย่างที่	ขนาดเฉลี่ย(mm)			น้ำหนัก	ช่องระหว่างจุดรองรับ L (cm)								
	กว้าง	ยาว	ลึก	(kg)									
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:0 (โดยน้ำหนัก)													
1	10.30	50.20	10.00	12.04	45.00	แรงกด : P(kg)	1,100	2,400	2,700	2,780	2,700	2,350	2,000
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
						R(ksc)	48.06	104.85	117.96	121.46	117.96	102.67	87.38
2	10.60	50.20	10.20	12.52	45.00	แรงกด : P(kg)	1,000	1,620	2,550	2,680	2,550	2,220	1,800
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
						R(ksc)	40.80	66.10	104.05	109.36	104.05	90.59	73.45
3	10.50	50.30	9.90	12.08	45.00	แรงกด : P(kg)	700	1,000	2,720	4,100	4,600	4,700	4,570
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.50	0.60
						R(ksc)	30.61	43.73	118.94	179.28	201.15	205.52	199.83
ค่าเฉลี่ย						R(ksc)	39.82	71.56	113.65	136.70	141.05	132.92	120.22
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:1 (โดยน้ำหนัก)													
1	10.40	50.10	10.20	13.00	45.00	แรงกด : P(kg)	1,500	2,950	4,380	5,100	5,050	4,500	4,080
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.50	0.60
						R(ksc)	62.38	122.69	182.16	212.10	210.02	187.15	169.68

2	10.10	50.20	10.40	12.72	45.00	แรงกด : P(kg)	960	1,650	3,150	3,700	4,040	4,000	3,640
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
						R(ksc)	39.55	67.97	129.76	152.41	166.42	164.77	149.94
3	10.40	50.10	10.00	12.94	45.00	แรงกด : P(kg)	725	1,400	3,750	5,540	5,750	5,320	4,930
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.50	0.60
						R(ksc)	31.37	60.58	162.26	239.71	248.80	230.19	213.32
ค่าเฉลี่ย						R(ksc)	44.43	83.74	158.06	201.41	208.41	194.04	177.65
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:2 (โดยน้ำหนัก)													
1	10.30	50.40	10.00	12.44	45.00	แรงกด : P(kg)	950	1,650	2,630	3,750	3,900	3,610	3,600
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.50	0.60
						R(ksc)	41.50	72.09	114.90	163.83	170.39	157.72	157.28
2	10.90	50.40	9.90	13.06	45.00	แรงกด : P(kg)	1,030	2,120	3,600	4,315	4,540	4,080	3,380
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
						R(ksc)	43.39	89.30	151.64	181.76	191.24	171.86	142.37
3	10.50	50.20	10.40	12.38	45.00	แรงกด : P(kg)	950	1,550	2,950	3,350	3,520	3,400	2,910
						ระยะโก่งตัว (cm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.50	0.60
						R(ksc)	37.64	61.42	116.89	132.74	139.48	134.72	115.31
ค่าเฉลี่ย						R(ksc)	40.84	74.27	127.81	159.44	167.03	154.77	138.32

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่

พฤติกรรมของมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยเหล็กชนิดงอปลายปริมาณสูงในการรับกำลังอัด กำลังดึง และกำลังดัด

Behavior of High Volume Hooked-End Steel Fiber Reinforce Mortar in Compressive Strength,Tensile Strength and Flexural Strength

ประเทือง กันธสมาส[1] และ จตุพล ตั้งปกาศิต[2]

บทคัดย่อ

พฤติกรรมของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงในการรับแรงอัด แรงดึงและแรงดัดของเส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย ขนาด 0.75x50 และ 0.75x60 มิลลิเมตร ผลกระทบของปริมาณทรายในส่วนผสมโดยมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1 : 0 , 1 : 1 และ 1 : 2 โดยใช้ปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 7 โดยปริมาตร และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.55 ทำการทดสอบกำลังอัด แรงดึงแบบผ่าซีก และแรงดัด ที่อายุ 28 วัน จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของมอร์ต้าร์ลดลงตามส่วนผสมของทรายที่เพิ่มขึ้น แต่กำลังอัดของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงมีค่ามากขึ้นตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้น ส่วนกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกและแรงดัดของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง มีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1 มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 60 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงมากกว่า 50 มิลลิเมตร

คำสำคัญ : เส้นใยเหล็กปริมาณสูง, เส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย, กำลังรับแรงดึง, กำลังรับแรงดัด

Abstract

Behavior of high volume steel fiber reinforced mortar in compressive tensile and flexural strength by using hooked-end steel fiber size of 0.75 x 50 and 0.75 x 60 mm. The effect of portland cement to sand ratio were investigated at 1 : 0, 1 : 1 and 1 : 2. The maximum of steel fiber is 7% by volume of mortar and w/c was kept at 0.55. The compressive strength, splitting tensile and flexural strength were determined at the age of 28 days . The results showed that the compressive strength of mortar is decreased by increasing ratio of sand in mortar, but steel fiber mortar has higher compressive strength with the increase of sand ratio. The ratio of cement to sand 1:1 of steel fiber mortar has the highest tensile strength of splitting test and flexural strength.The mortar with hooked-end steel fiber of 60 mm. has higher tensile strength than that of 50 mm.

KEYWORD : High volume steel fiber, Hooked-end steel fiber, Tensile strength , Flexural strength

1. บทนำ

คอนกรีตหรือมอร์ต้าร์เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีคุณสมบัติที่ดีด้านการรับกำลังอัดซึ่งมีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้มีคุณภาพและประสิทธิภาพในการใช้งาน แต่เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุเปราะมีความสามารถรับแรงดึงได้น้อยหรือมีความยืดหยุ่นต่ำ ซึ่งเป็นจุดด้อย จึงมีความพยามยามหาวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวด้วยการนำวัสดุที่มีความเหนียวมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต เช่น เส้นใยเหล็ก เส้นใยแก้ว เส้นใยสงเคราะห์ อะคลิลิก เส้นใยโพลิโพรพิลีน หรือ กราไฟท์ ซึ่งความสามารถในการรับแรงดึงจะขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้เส้นใยเหล็กเสริมแรง ซึ่งมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก

[1] นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[2] อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปริมาณสูง เป็นหนึ่งในกลุ่มผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความสามารถในการรับแรงได้มากกว่าคอนกรีตธรรมดา จึงสามารถออกแบบให้โครงสร้างมีความหนาน้อยกว่าโครงสร้างคอนกรีตปกติ แต่มีความสามารถในการรับน้ำหนัก การแอ่นตัวและยืดหยุ่นได้มากกว่า [1] จากข้อดีของการใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยปริมาณสูง ทำให้เหมาะสำหรับงานก่อสร้างพิเศษ หรือก่อสร้างที่มีพื้นที่จำกัด แต่ต้องการรับน้ำหนักได้สูงแต่จากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่ได้มีการศึกษาถึงการนำเส้นใยเหล็กที่มีความยาว 50 และ 60 มิลลิเมตร มาใช้ในปริมาณสูง ในการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของมอร์ต้าร์ผสมเส้นใยปริมาณสูงในการรับกำลังแรงอัด แรงดึงและแรงดัดของเส้นใยเหล็ก ขนาดความยาว 50 และ 60 มิลลิเมตร

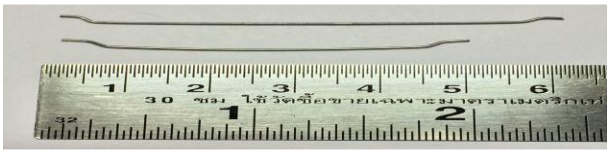
2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการทดลองเพื่อการศึกษาคุณสมบัติในด้านกำลังอัด กำลังดึง และ กำลังดัดของมอร์ต้าร์ที่มีอัตราส่วนผสมแตกต่างกัน เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง ที่มีความยาว 50 และ 60 มิลลิเมตร

3. การทดสอบ

3.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และทรายแห้งมีค่าความชื้นไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.55 และเส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย (Hooked-end steel fiber) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีคุณสมบัติตามในตารางที่ 1 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) = 0.75 มิลลิเมตร ความยาว (L) = 50 มิลลิเมตร มีอัตราส่วน L/D = 67 และ (D)=0.75 มิลลิเมตร(L)= 60 มิลลิเมตรมีอัตราส่วน L/D = 80 โดยมีส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายในอัตราส่วนผสม เท่ากับ 1 : 0, 1 : 1 และ 1 : 2 โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณเส้นใยเหล็กอัตราส่วนร้อยละ 7 โดยปริมาตรซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่สามารถใส่ลงในแบบได้



รูปที่ 1 เส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก

Name	Specific Gravity	Length (mm)	Diameter (mm)	Aspect Ratio (l/d)	Tensile Strength (N/mm^2)
SF-50	7.86	50	0.75	67	1,000
SF-60	7.86	60	0.75	80	1,000

3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

3.2.1 แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีก และแบบหล่อคานขนาด กว้าง 10 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบแรงดัด ดังแสดงในรูปที่ 2

รูปที่ 2 แบบหล่อเสริมเส้นใยเหล็ก

3.2.2 อัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ สำหรับมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง ใช้สำหรับการทดสอบแรงอัด แรงดึงแบบผ่าซีกและแรงดัด รายละเอียดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก

สัดส่วน	ปูนซีเมนต์ (%โดยน้ำหนัก)	ทราย (%โดยน้ำหนัก)	เส้นใยเหล็ก (%โดยปริมาตร)	
			SF 50	**SF 60**
C	100	-	-	-
C 1 S	50	50	-	-
C 2 S	33.33	66.67	-	-
C – SF 50	100	-	7	-
C 1 S-SF 50	50	50	7	-
C 2 S-SF 50	33.33	66.67	7	-
C – SF 60	100	-	-	7
C 1 S-SF 60	50	50	-	7
C 2 S-SF 60	33.33	66.67	-	7

C = ปูนซีเมนต์

S = ทราย

- SF 50 = เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 50 มิลลิเมตร

- SF 60 = เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 60 มิลลิเมตร

C1S-SF 50 = ปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1 เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 50 มิลลิเมตร

C2S-SF 60 = ปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 2 เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 60 มิลลิเมตร

3.3 วิธีการหล่อตัวอย่าง

การหล่อตัวอย่างของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง ดำเนินการโดยการนำเส้นใยเหล็กใส่ลงในแบบหล่อให้เต็ม และจึงนำส่วนผสมมอร์ต้าร์เทลงในแบบหล่อแล้วทำการสั่นสะเทือนให้แน่นเพื่อให้มอร์ต้าร์แทรกซึมลงในช่องว่างของเส้นใยเหล็ก และทำการทดสอบเมื่ออายุครบ 28 วัน โดยวัสดุประสานต้องมีความเหลวพอที่จะแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างเส้นใยเหล็กโดยมีการไหลตามแรงโน้มถ่วงหรือการสั่นสะเทือน [2]

3.4 วิธีการทดสอบ

3.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 39 [3] โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร และทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน

3.4.2 การทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 496 [4] โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร และทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน

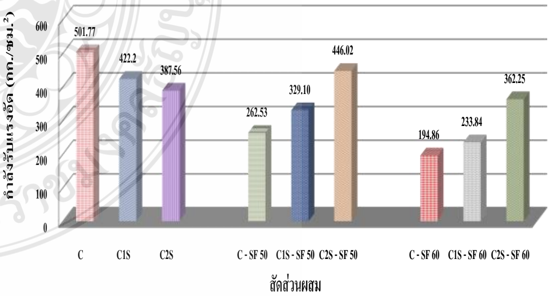
3.4.3 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 78 [5] โดยใช้ตัวอย่างคานขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร และทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 มอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูง

4.1.1 กำลังอัด

จากผลการทดลองกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็ก C, C1S และ C2S มีค่ากำลังอัดลดลง ตามปริมาณสัดส่วนผสมของทรายที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3 เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลง ทำให้กำลังอัดลดลง

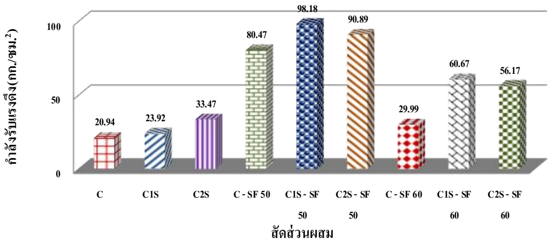


รูปที่ 3 กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต

สำหรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่เสริมเส้นใยเหล็ก (C – SF50 , C – SF60) มีกำลังอัดลดลง เมื่อเทียบกับที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็ก เพราะเส้นใยเหล็กที่เสริมจะไปแทนที่มอร์ต้าร์ ทำให้ปริมาณมอร์ต้าร์น้อยลง กำลังรับแรงอัดจึงลดลงตาม ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ ทวีชัย สำราญวานิช และคณะ [6] สำหรับตัวอย่างมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงC-SF 50, C1S-SF 50 และ C2S-SF 50 จะพบว่าจะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของทราย ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ ทำให้ตัวอย่าง C-SF 50 และ C1S-SF 50 มีน้ำส่วนเกินหรือน้ำส่วนที่เหลือที่ใช้ในการหล่อลื่นส่วนผสมมากกว่าซึ่งมีผลต่อกำลังอัดที่ต่ำลง เมื่อพิจารณาตัวอย่าง C-SF 60 , C1S-SF 60 และ C2S-SF 60 ก็พบว่ามีทิศทางไปในทางเดียวกัน คือกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้ทรายที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสม

4.1.2 กำลังดึงแบบผ่าซีก

เมื่อพิจารณาการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของตัวอย่างคอนกรีต C, C1S และ C2S ในรูปที่ 4 จะพบว่า ค่าแรงดึงแบบผ่าซีกของตัวอย่างมอร์ต้าร์ C, C1S และ C2S จะมีค่าแรงดึงมากขึ้นตามสัดส่วนของทรายที่มากขึ้นในส่วนผสม เนื่องจาก ทรายที่อยู่ในส่วนผสมอาจจะมีผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวของมอร์ต้าร์ดีขึ้น สำหรับตัวอย่างของมอร์ต้าร์ C-SF 50 และ C-SF 60 มีกำลังรับแรงดึงมากกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ C ที่เป็นผลมาจากเส้นใยเหล็กที่อยู่ในส่วนผสมมอร์ต้าร์ ทำหน้าที่ในการรับแรงดึงที่เกิดขึ้นซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ ทวีชัย สำราญวานิช และคณะ [6] และงานวิจัยของประพนธ์ เฟื่องฟู [7] เมื่อพิจารณามอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงของตัวอย่างC-SF 50, C1S-SF 50และC2S-SF 50 พบว่า ตัวอย่าง C-SF 50 มีค่าแรงดึงแบบผ่าซีกต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลของกำลังอัดของตัวอย่าง C ที่ให้กำลังอัดน้อยที่สุด จากสาเหตุของมอร์ต้าร์ที่มีน้ำส่วนเกินหรือน้ำส่วนที่เหลือจากการใช้ในการหล่อลื่นส่วนผสมมากกว่าตัวอย่าง C1S และ C2S จึงมีผลทำให้กำลังดึงแบบผ่าซีกต่ำไปด้วย



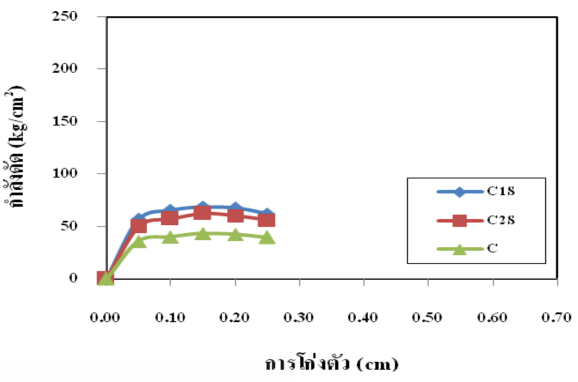
รูปที่ 4 กำลังดึงแบบผ่าซีกของตัวอย่างคอนกรีต

แต่ตัวอย่าง C1S-SF 50 มีค่าแรงดึงแบบผ่าซีกมากที่สุด เนื่องจากอาจเป็นอัตราส่วนผสมที่ทำให้มีการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุประสานและเส้นใยเหล็กได้ดีที่สุด ในส่วนของตัวอย่าง C2S-SF 50 จะพบว่าค่าแรงดึงแบบผ่าซีกมีค่าน้อยกว่าตัวอย่าง C1S-SF 50 เป็นเพราะตัวอย่าง C2S-SF 50 มีปริมาณทรายที่มากกว่าและมีความข้นเหลวน้อยกว่าของตัวอย่าง C1S-SF 50 ทำให้ความหนาแน่นของตัวอย่าง และการยึดจับระหว่างมอร์ต้าร์และเส้นใยเหล็ก ทำได้ไม่ดีเท่ากับตัวอย่าง C1S-SF 50 ซึ่งมีค่าแรงดึงแบบผ่าซีกสูงสุดถึง 98.18 กก./ซม.^{2} เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กปริมาณต่ำ ร้อยละ 0.5 มีค่าแรงดึงเท่ากับ 41 กก./ซม.^{2} [6] และคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กร้อยละ 1 มีค่าแรงดึง เท่ากับ 49 กก./ซม.^{2} [7] ซึ่งผลที่ได้ พบว่าเมื่อมีการใช้ปริมาณเส้นใยที่สูงขึ้นค่าแรงดึงก็จะสูงขึ้นด้วย

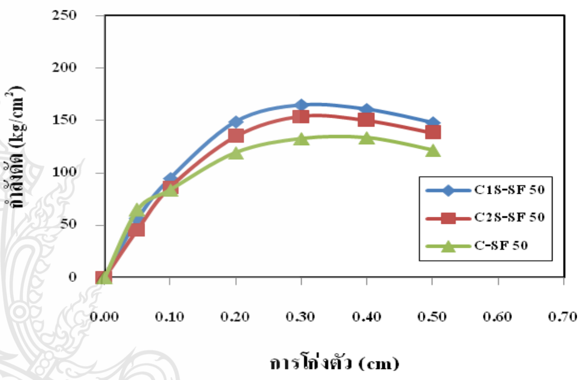
เมื่อทำการเปรียบเทียบกับการใช้เส้นใยเหล็ก SF 60 พบว่า มีทิศทางไปในทางเดียวกันกับตัวอย่างเส้นใยเหล็ก SF 50 ซึ่งตัวอย่าง C1S-SF 60 จะให้ค่าแรงดึงแบบผ่าซีกมากที่สุด สำหรับตัวอย่างที่เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 50 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกมากกว่าตัวอย่างเสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 60 มิลลิเมตร เนื่องจากการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กในแบบหล่อขนาดสั้นจะมีการกระจายตัวในแนวตั้งฉากกับทิศทางแรงกดผ่าซีก จากการทดสอบได้ดีกว่าเส้นใยเหล็กที่มีขนาดยาว ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ GILANI [8]

4.1.3 กำลังดัด

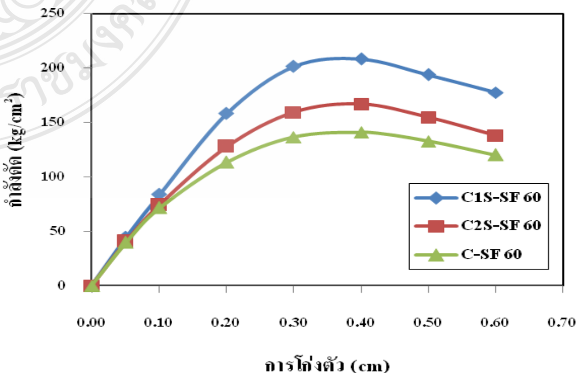
จากผลการทดสอบแรงดัด คานของตัวอย่างมอร์ต้าร์ C, C1S และ C2S ในรูปที่ 5 พบว่าค่าหน่วยแรงดึงที่ทดสอบได้จากการทดสอบแรงดัดในคานของตัวอย่าง C1S จะทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด แต่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ C ให้ค่ากำลังรับแรงดึงต่ำสุด เป็นผลมาจากส่วนผสมของตัวอย่าง C มีน้ำส่วนเกินมาก ทำให้มีผลต่อค่าแรงดึงของคอนกรีตที่ได้มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับตัวอย่าง C1S ซึ่งเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมจึงให้ค่าสูงสุด สำหรับการทดสอบแรงดัดของคานตัวอย่าง C-SF 50, C1S-SF 50 และ C2S-SF 50 ในรูปที่ 6 พบว่า มีทิศทางไปในแนวทางเดียวกับตัวอย่างคานมอร์ต้าร์ C, C1S และ C2S คือ ตัวอย่างคาน C1S-SF 50 จะให้ค่าแรงดึงดีที่สุด เนื่องจาก ตัวอย่าง C-SF 50 มีน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการหล่อลื่นส่วนผสมมาก ซึ่งมีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้าร์และเส้นใยเหล็ก สำหรับตัวอย่างC2S-SF 50 จะพบว่า มีปริมาณทรายอยู่ในส่วนผสมมากซึ่งมีผลต่อกำลังของมอร์ต้าร์ ทำให้แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นไม่แข็งแรง จึงทำให้ค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่าของตัวอย่าง C1S-SF 50 ในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงค่าแรงดึงจากการทดสอบแรงดัดของคานของตัวอย่าง C-SF 60,C1S-SF 60 และ C2S-SF 60 พบว่าทิศทางของค่าแรงดึงเป็นไปในทิศทางเดียวกับตัวอย่าง C-SF 50, C1S-SF 50 และ C2S-SF 50 คือตัวอย่าง C1S-SF 60 ให้ค่าแรงดึงจากการทดสอบแรงดัดในคานสูงสุดแต่ตัวอย่าง C-SF 60, C1S-SF 60 และ C2S-SF 60 มีค่าแรงดึงจากการทดสอบแรงดัดในคานสูงกว่าตัวอย่าง C-SF 50, C1S-SF50 และ C2S-SF 50 ตามลำดับ และจากรูปที่ 8, 9 และ 10 ตัวอย่างคานมอร์ต้าร์ SF-50 และ SF-60 มีกำลังรับแรงดึงมากกว่าคานมอร์ต้าร์ C เนื่องจากเส้นใยเหล็กช่วยรับแรงดึง โดยที่การเสริมเส้นใยเหล็กยาว 60 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงมากกว่าการเสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 50 มิลลิเมตร เนื่องจากกำลังรับแรงดึงขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยว (Bond) ระหว่างเส้นใยเหล็กกับวัสดุประสานซีเมนต์ เส้นใยเหล็กยาวกว่ามีแรงยึดเหนี่ยวมากกว่า ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ งานวิจัยของ ชูชัย สุจิวรกุล [9]



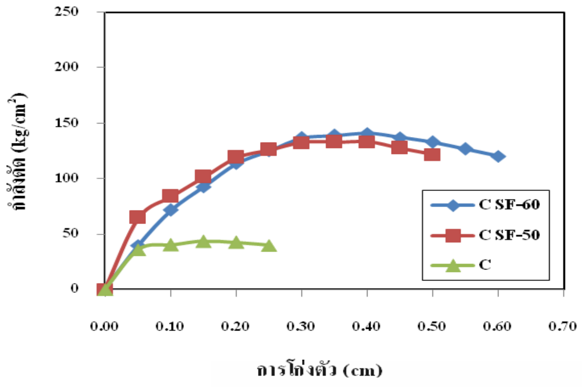
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับการโก่งตัวของคานมอร์ต้าร์ C



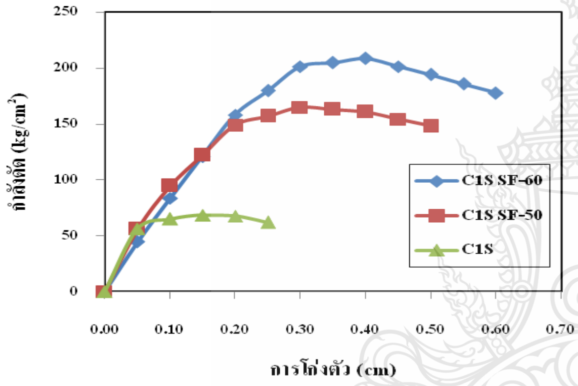
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับการโก่งตัวของคาน SF –50 ผสมเส้นใยร้อยละ 7



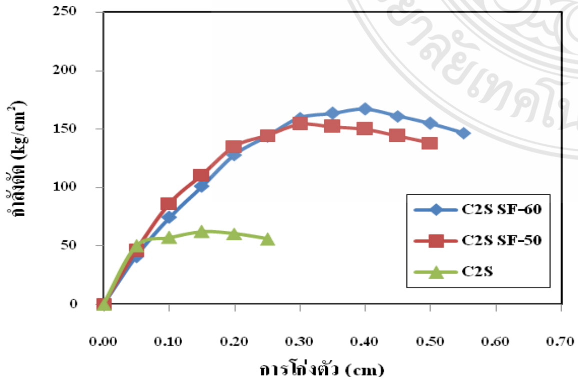
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับการโก่งตัวของคาน SF –60 ผสมเส้นใยร้อยละ 7



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับการโก่งตัวของคานมอร์ต้าร์ อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ : ทราย เท่ากับ 1 : 0



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับการโก่งตัวของคานมอร์ต้าร์ อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ : ทราย เท่ากับ 1 : 1



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับการโก่งตัวของคานมอร์ต้าร์ อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ : ทราย เท่ากับ 1 : 2

5. สรุปผล

จากการวิจัยสามารถสรุปผลดังต่อไปนี้

1. กำลังอัดของมอร์ต้าร์มีกำลังลดลงตามปริมาณส่วนผสมของทรายที่เพิ่มขึ้นกำลังอัดของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงมีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็ก และมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของทรายที่เพิ่มขึ้น

2. กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของมอร์ต้าร์มีค่ามากขึ้นตามปริมาณส่วนผสมของทรายที่เพิ่มขึ้นกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงมีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็ก และมีกำลังรับแรงดีที่สุดเมื่อใช้ทรายเป็นส่วนผสมในอัตราส่วน 1 : 1

3. กำลังรับแรงดึงที่ได้จากการทดสอบแรงดัด ของคานมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็กปริมาณสูงที่ใช้มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมทรายในอัตราส่วน 1 : 1 มีกำลังรับแรงดัดได้ดีที่สุด และมอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 60 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดัดมากกว่ามอร์ต้าร์เสริมเส้นใยเหล็ก ยาว 50 มิลลิเมตร

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณศิริชัย วรรณบูรณ์ จากบริษัท เอสอาร์ไฟเบอร์ จำกัด และ คุณณรงค์กร เมฆวัฒนา จาก บริษัท สยาม เกเบียน จำกัด ที่สนับสนุนเส้นใยเหล็กสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้

7. บรรณานุกรม

1. Sudarsana Rao H., “Performance of steel reinforced sifcon two-way slabs in flexure,” 35th Conference on our world in concrete&structures,25-27 August 2010,Singapore.
2. Lankard, D.R., “Preparation , Applications : Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON),” Concrete International , V.6 , No.12 Dec.1984.

3. American Society for Testing and Materials.2012 ASTM C39 / C39 M – 12a Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Spicimens, **Annual book of ASTM standards vol.04.02**,Philadelphia, USA : American Society for Testing and Materials.
4. American Society for Testing and Materials.2011 ASTM C496 / C496 M – 11 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Spicimens, **Annual book of ASTM standards vol.04.02**,Philadelphia, USA : American Society for Testing and Materials Specimens.
5. American Society for Testing and Materials.2001 ASTM C78-00, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete , **Annual book of ASTM standards vol.04.01**,Philadelphia, USA : American Society for Testing and Materials Specimens.
6. ทวีชัย สำราญวานิช, อภินันท์ ภูชัน และ สุรสิทธิ์ หมั่นวิชา, 2550 , พฤติกรรมและวิธีการคำนวณกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใย, วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.ปีที่ 30 ฉบับที่ 2 เมษายน-มิถุนายน 2550.
7. ประพนธ์ เฟื่องฟู , 2555,พฤติกรรมของคอนกรีตผสมเส้นใยและการต้านทานแรงกระแทกด้วยวิธีตุ้มน้ำหนัก, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
8. Gilani.O.H. : SEPTEMBER 2007 ;Various Durability Aspect of Slurry Infiltrated Fiber Concrete, Middle East Technical University.
9. ชูชัย สุจิวรกุล, 2548 , อิทธิพลขนาดชิ้นส่วนรับโมเมนต์ดัดของวัสดุผสมซีเมนต์เสริมไฟเบอร์เหล็ก, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม 2548,ชลบุรี.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล นายประเทือง กันธสมาส
วัน เดือน ปีเกิด 14 ตุลาคม 2508
ที่อยู่ 19/10 หมู่บ้านกฤษณา 1 ตำบลบางปรอก อำเภอเมืองปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี 12000

การศึกษา

พ.ศ. 2541 วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2549 วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประสบการณ์ทำงาน

พ.ศ. 2542 - ปัจจุบัน วิศวกรโยธา 8 วช องค์การบริหารส่วนจังหวัดปทุมธานี อำเภอเมืองปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี

การฝึกอบรมและศึกษาดูงาน

ระยะเวลาอบรม	**หลักสูตร**	**สถาบัน**
18 กุมภาพันธ์ – 8 มีนาคม 2545	งานเขื่อนป้องกันตลิ่งสำหรับวิศวกร รุ่นที่ 4	สถาบันพัฒนาช่างโยธามหาดไทย
15 - 29 พฤษภาคม 2545	งานทางสำหรับวิศวกร รุ่นที่ 10	สถาบันพัฒนาช่างโยธามหาดไทย
3 – 11 มิถุนายน 2545	งานสะพานสำหรับวิศวกร รุ่นที่ 4	สถาบันพัฒนาช่างโยธามหาดไทย
8 – 16 กรกฎาคม 2545	งานบำรุงรักษาสิ่งสาธารณประโยชน์	สถาบันพัฒนาช่างโยธามหาดไทย
12 – 16 กุมภาพันธ์ 2550	การออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว รุ่นที่ 4	กรมโยธาธิการและผังเมือง