

การศึกษาพฤติกรรมแรงยึดเหนี่ยวของเส้นใยโลหะ ที่มีผลกระทบจากการกัดกร่อนจากสนิมและทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย

Study of Steel Fiber Bond Behavior Affected by Corrosion and Orientation

พรรณภักดิ์ กิวิวัฒน์ศักดิ์¹ พิศดา สารสุข¹ สิริพิมล อินดี¹ และ ปัญญาวุธ จิรดิกล^{1,*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*Corresponding author; E-mail address: punyawut.j@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของการเกิดสนิมบนพื้นผิวและการจัดเรียงตัวของพฤติกรรมแรงยึดเหนี่ยวของเส้นใยโลหะแบบตะขอปลายแบบ 1 ชั้น, 2 ชั้น และ 3 ชั้น ซึ่งฝังอยู่ในมอร์ตาร์ โดยมีการจัดเรียงมุมระหว่าง 0° ถึง 45° เกิดการกัดกร่อนของสนิมบนพื้นผิว 0% ถึง 10% ซึ่งขึ้นตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยโลหะ ซึ่งขึ้นตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยโลหะหล่อโดยใช้แบบหล่อตามมาตรฐาน ASTM C307 มีขนาดหน้าตัด กว้าง 25 มิลลิเมตร ลึก 25 มิลลิเมตร และยาว 75 มิลลิเมตร และมีการทำร่องบากที่กึ่งกลางก้นตัวอย่าง โดยพิจารณากำลังรับแรงดึงสูงสุด และค่าระยะเลื่อนไถลของเส้นใย ของก้อนตัวอย่างที่มีปัจจัยแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าเส้นใยโลหะแบบตะขอปลายชนิด 3 ชั้น (5D) ที่มีการกัดกร่อน 5% และมุมเอียง 30° ให้ประสิทธิภาพแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยโลหะและมอร์ตาร์สูงสุด และพบว่าเมื่อเกิดสนิมบนเส้นใยโลหะในปริมาณน้อย การจัดเรียงตัวมูมองศา และจำนวนชั้นตะขอเพิ่มมากขึ้นจะช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวมากขึ้น

คำสำคัญ: เส้นใยโลหะแบบตะขอ, มุมการจัดเรียงตัว, การกัดกร่อนของสนิมบนพื้นผิว, กำลังรับแรงดึงสูงสุด, แรงยึดเหนี่ยว

Abstract

This study investigates the influence of surface corrosion and fiber orientation on the pull-out behavior of various hooked-end steel fibers embedded in mortar. The inclination angle of the fibers ranged from 0° to 45° , while the degree of surface corrosion varied from 0% to 10%. The test specimens are dog-bone-shaped cast using molds in accordance with ASTM C307 standards. Each specimen has a cross-sectional width of 25 mm, a depth of 25 mm, and a length of 75 mm, with a notch made at the center of the specimen. The analysis focused on the peak pull-out load, and corresponding slip values of specimen with different influence parameters. The results indicate that 5D steel fibers with 5% surface corrosion and an inclination angle of 30° provide optimal fiber bridging capability, enhancing overall bonding performance in mortar. Additionally, the findings suggest that when a small amount of rust forms on the steel fibers, increasing the inclination angle and the number of hooked layers enhances the bonding strength.

Keywords: hooked-end steel fiber, inclination angle, surface corrosion, pull-out load, bonding strength

1. บทนำ

ในปัจจุบัน คอนกรีตเสริมแรงยังคงเป็นวัสดุก่อสร้างหลักที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานโครงสร้าง เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง สามารถรับแรงกดได้ดี และมีต้นทุนที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความสนใจในการเพิ่มความทนทานของคอนกรีตคือ การผสมเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) ลงในเนื้อคอนกรีต โดยเส้นใยทำหน้าที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึง ป้องกันการแตกร้าวก่อนเวลาอันควร และกระจายแรงทั่วทั้งโครงสร้าง ส่งผลให้โครงสร้างมีความเหนียวและรับน้ำหนักได้มากขึ้น ปัจจุบันมีการใช้งานเส้นใยเหล็กอย่างแพร่หลายในโครงสร้างที่ต้องการความทนทานสูง เช่น พื้นโรงงาน ถนน สนามบิน และอาคารกลางแจ้ง

แม้เส้นใยเหล็กจะมีข้อดีหลายประการ แต่ประสิทธิภาพของมันยังคงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน เช่น การเรียงตัวของเส้นใยในเนื้อคอนกรีต และการกัดกร่อนของเส้นใย จากสภาพแวดล้อมภายนอก เส้นใยที่เรียงตัวในทิศทางที่เหมาะสมกับแนวแรงกระทำจะสามารถถ่ายแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่การเรียงตัวแบบสุ่มหรือไม่ควบคุมอาจทำให้บางเส้นใยไม่ช่วยในการรับแรง ในทางกลับกัน การกระจายตัวอย่างเหมาะสมยังช่วยลดการแตกร้าวแบบเฉพาะจุดและเพิ่มการกระจายแรงทั่วทั้งโครงสร้าง

ในส่วนของ การกัดกร่อน แม้โดยทั่วไปจะเป็นปัจจัยลบที่ทำให้สมรรถนะของเส้นใยลดลง แต่ในบางระดับของการกัดกร่อนพบว่าสามารถทำให้พื้นผิวเส้นใยเกิดความขรุขระเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและคอนกรีต อย่างไรก็ตาม หากเกิดการกัดกร่อนในระดับสูงเกินไปจะทำให้เส้นใยเปราะบาง หรือขาดได้ง่าย ส่งผลเสียต่อสมรรถนะโดยรวมและอาจนำไปสู่ความล้มเหลวของโครงสร้าง

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดึงของเส้นใยเหล็กปลายตะขอ (Hooked-End Steel Fiber) ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน โดยพิจารณา ผลของสภาวะการกัดกร่อน มุมการจัดเรียงตัวของเส้นใย และลักษณะของปลายตะขอ ต่อความสามารถในการรับแรงดึงและการยึดเหนี่ยวกับมอร์ตาร์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเส้นใยประเภทต่าง ๆ ในการใช้งานจริง

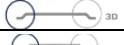
ผลการศึกษานี้จะนำไปสู่แนวทางการเลือกใช้เส้นใยเหล็กที่เหมาะสมกับประเภทของโครงสร้างและสภาพแวดล้อม ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำไปปรับใช้ในการออกแบบมาตรฐานโครงสร้าง และเป็นฐานข้อมูลสำหรับการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์หรือออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเส้นใยในอนาคต

2. วัสดุและวิธีการศึกษา

2.1 เส้นใยเหล็กตะขอปลาย

ใช้เส้นใยเหล็กที่มีลักษณะรูปร่างแบบตะขอปลาย ความยาว 60 มิลลิเมตร ทั้งหมด 3 ลักษณะ คือ ตะขอปลาย 1 ชั้น, 2 ชั้น และ 3 ชั้น และมีความกว้าง 0.9 มิลลิเมตร

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก

Type	Length (L) mm	Width (D) mm	Aspect Ratio L/D	Fiber Family
3D	60	0.9	65	
4D	60	0.9	65	
5D	60	0.9	65	

2.2 มวลรวม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland cement Type 1)

มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ตามมาตรฐานมอก. และ ASTM C150-07 มวลรวมละเอียดเลือกใช้ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 น้ำผสมมอร์ตาร์ใช้น้ำประปาทั่วไป

ตารางที่ 2 ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษา อัตราส่วน m³

Portland Cement Type I	404 kg/m ³
SSD Sand	813 kg/m ³
Water to cement ratio	0.47

2.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.3.1 เส้นใยเหล็ก

ทำการเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนและทำความสะอาดเส้นใยเหล็ก โดยเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนเส้นใยเหล็กจากการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5% ฟันสเปรย์ทุกๆ 24 ชั่วโมง โดยเส้นใยเหล็กจะต้องไม่สัมผัสผิวด้านบน เพราะอาจเกิดข้อผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อนในการทดสอบได้ ทำความสะอาด และปรับปรุงตัวอย่างที่ขึ้นสนิม ตรวจสอบระดับการกัดกร่อนของเส้นใยเหล็กโดยการชิมผ่านของคลอไรด์ (Chloride Attack) เข้าทำลายชั้นป้องกัน (Passive film) ในรูปของคลอไรด์ไอออนที่ผิวเหล็กจนมีปริมาณเพียงพอและก่อให้เกิดการกัดกร่อนโดยการพ่นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 10 นาที เพื่อขจัดคราบสนิมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดกร่อนตามมาตรฐาน ASTM G1-03 [19] แล้วจึงทำการหาปริมาณเหล็กที่สูญเสียไปโดยการชั่งน้ำหนัก และนำค่าที่ได้มาใช้ในการคำนวณเพื่อหาร้อยละปริมาณที่ถูกกัดกร่อน

2.3.2 ขึ้นตัวอย่าง

เตรียมวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ ให้เป็นไปตามสัดส่วนที่กำหนด อุปกรณ์ที่ใช้ในการผสม ได้แก่ ถังผสม เครื่องชั่ง แผ่นพลาสติก เส้นใยเหล็ก และแบบหล่อ นำเส้นใยเหล็กที่เสียบไว้กับแผ่นพลาสติกวางลงในบริเวณกลางแบบหล่อ โดยมีการจัดมุมทิศทางการวางให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ ผสมปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ ให้ได้ตามสัดส่วนที่กำหนดในสูตรการผสมคอนกรีต ผสมจนกระทั่งคอนกรีตมีความสม่ำเสมอและไม่มีเศษวัสดุที่ไม่ละลาย เพื่อให้คอนกรีตมีความแข็งแรงสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน เทคอนกรีตลงในแบบหล่อให้เต็มแบบ ใช้เกรียงช่วยในการอัดและเกลี่ยให้แน่น เพื่อลดฟองอากาศและช่องว่างในคอนกรีต ปลอยตัวอย่างให้คงที่ในแบบหล่อประมาณ 24 ชั่วโมงหรือจนกระทั่งคอนกรีตเริ่มแข็งตัว หลังจากนั้นนำตัวอย่างออกจากแบบหล่อ แล้วจุ่มในน้ำเพื่อบ่มคอนกรีตให้ได้อายุบ่มตามที่กำหนด (7 วัน และ 28 วัน)

2.3.3 การทดสอบ

เตรียมชิ้นทดสอบและเลือกชิ้นทดสอบที่มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐานที่กำหนด ตรวจสอบให้แน่ใจว่าชิ้นทดสอบไม่มีรอยแตก รอยขีดข่วน หรือจุดบกพร่องที่อาจส่งผลกระทบต่อผลการทดสอบ ตั้งค่าและเตรียมเครื่อง UTM ตั้งระยะห่างระหว่างอุปกรณ์จับยึดให้สอดคล้องกับความยาวของชิ้นทดสอบและติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับเครื่อง ตั้ง

ค่าพารามิเตอร์การทดสอบ ตั้งค่าความเร็วในการดึง (strain rate) ตามที่ระบุในมาตรฐานที่ใช้ งาน เช่น 2 mm/min



รูปที่ 1 การทดสอบการรับแรงดึงของเส้นใยเหล็ก

ทำการทดสอบและบันทึกผล เครื่องจะบันทึกข้อมูลแรงดึงและการเปลี่ยนแปลงขนาดชิ้นทดสอบ (elongation) อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเส้นใยเหล็กเกิดการขาดรูด บันทึกข้อมูลการทดสอบ และกราฟแสดงผลการทดสอบ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป นำค่าที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์เพื่อประเมินคุณสมบัติการต้านทานแรงดึงของเส้นใยเหล็กในคอนกรีตสรุปผลการทดลอง

3. ผลการทดสอบ

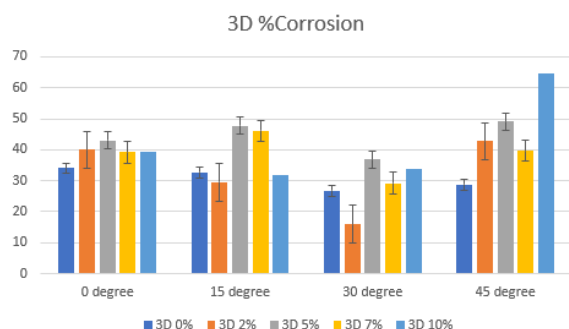
3.1 Compressive Strength มอร์ตาร์

หล่อตามมาตรฐาน BS 1881:Part 108 รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร ตัวอย่างมีอายุ 28 วัน มีค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยที่ 565.12 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

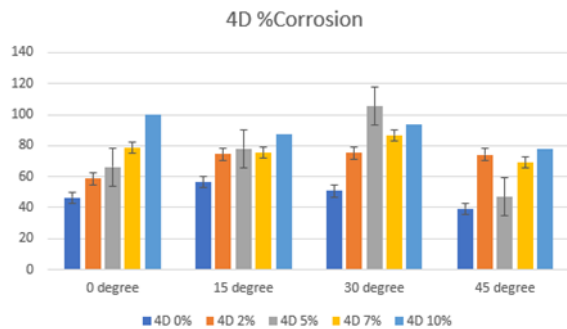
ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	A (cm ²)	W (g)	F(kg)	Stress	Unit
1	51.66	51.30	51.30	26.24	303.90	14925.00	568.79	ksc
	51.05	51.10	51.10					
	50.90	51.35	51.35					
avg	51.20	51.25	51.25					
2	51.00	50.70	51.10	25.83	302.70	14808.00	573.26	ksc
	51.15	50.60	51.30					
	51.00	50.50	51.40					
avg	51.05	50.60	51.27					
3	51.10	51.40	51.60	25.88	300.50	14321.00	553.31	ksc
	51.00	51.10	51.60					
	50.75	49.900	51.20					
avg	50.95	50.80	51.47					
avg							565.12	ksc

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ Compressive Strength ของ mortar อายุ 28 วัน

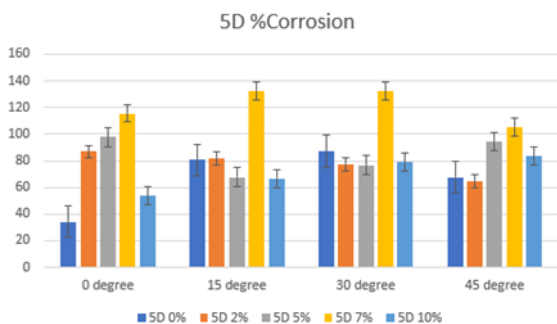
3.2 Tensile Strength ตามมาตรฐาน ASTM C190



รูปที่ 2 การรับแรงดึงสูงสุดของเส้นใยเหล็กแบบตะขอปลาย 1 ชั้น ที่รับผลกระทบจากการกัดกร่อน



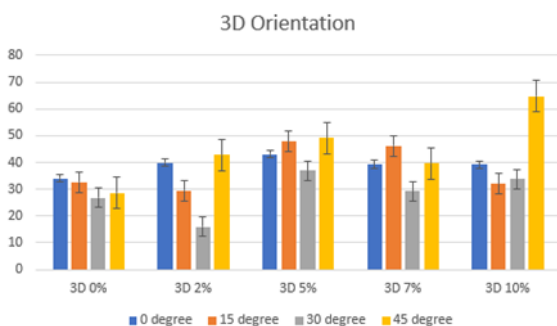
รูปที่ 3 การรับแรงดึงสูงสุดของเส้นใยเหล็กแบบตะขอปลาย 2 ชั้น ที่รับผลกระทบจากการกัดกร่อน



รูปที่ 4 การรับแรงดึงสูงสุดของเส้นใยเหล็กแบบตะขอปลาย 3 ชั้น ที่รับผลกระทบจากการกัดกร่อน

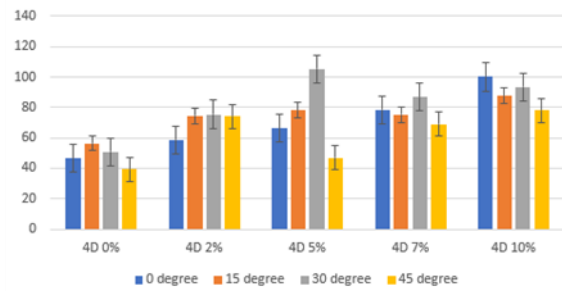
จากรูปที่ 2-4 แสดงการรับแรงดึงสูงสุดของเส้นใยโลหะประเภท 3D, 4D และ 5D ตามลำดับ

ผลกระทบของการกัดกร่อนเส้นใยโลหะต่อค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงการกัดกร่อน 0% ถึง 5% เกิดแรงยึดเกาะเพิ่มขึ้นระหว่างเส้นใยโลหะกับมอร์ต้า เนื่องจากสนิมเพิ่มความขรุขระของพื้นผิวเส้นใยโลหะ และเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างเส้นใยโลหะกับมอร์ต้า จากนั้นค่ามีแนวโน้มลดลงในการกัดกร่อน 7% และ 10% โดยคาดว่าแนวโน้มเกิดจากการที่สนิมมีการกัดกร่อนเข้าไปในเนื้อโลหะทำให้พื้นที่หน้าตัดรับแรงมีขนาดเล็กลง อีกทั้งอาจเกิดการขาดของเส้นใยโลหะได้



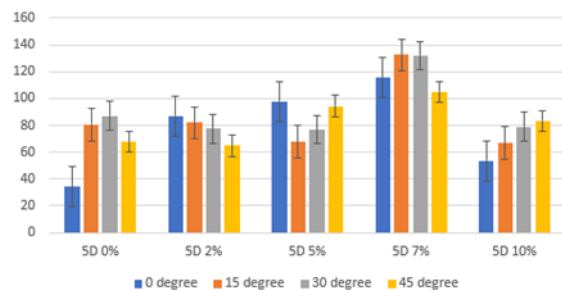
รูปที่ 5 การรับแรงดึงสูงสุดของเส้นใยเหล็กแบบตะขอปลาย 1 ชั้น ที่รับผลกระทบจากมุมการเรียงตัว

4D Orientation



รูปที่ 6 การรับแรงดึงสูงสุดของเส้นใยเหล็กแบบตะขอปลาย 2 ชั้น ที่รับผลกระทบจากมุมการเรียงตัว

5D Orientation



รูปที่ 7 การรับแรงดึงสูงสุดของเส้นใยเหล็กแบบตะขอปลาย 3 ชั้น ที่รับผลกระทบจากมุมการเรียงตัว

จากรูปที่ 6 และ 7 ผลการทดลองพบว่าในเส้นใยประเภท 4D และ 5D ผลกระทบของการกัดกร่อนเส้นใยโลหะต่อค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงมุมองศาการเรียงตัว 0 ถึง 30 องศา เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของมุมทำให้การชะลุดอกของเส้นใยโลหะต้องใช้แรงมากขึ้น จากนั้นค่ามีแนวโน้มลดลงในช่วง 45 องศา จากการที่มุมองศาการเรียงตัวมีค่าที่สูง ส่งผลให้มอร์ต้ามีการแตกร้าวก่อนเกิดการชะลุดอกของเส้นใยโลหะ แต่ในเส้นใยประเภท 3D จากภาพที่ 5 พบว่ากำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้นในช่วง 0° ถึง 45° จากการที่เส้นใยมีจำนวนตะขอเพียง 1 ชั้น มีการใช้แรงดึงที่น้อย จึงมีพฤติกรรมการชะลุดอกก่อนการแตกหักของมอร์ต้า

จากผลการทดสอบ ภาพที่ 2-7 รูปที่ 2 พบว่าเส้นใยโลหะแบบ 3D, 4D และ 5D มีพฤติกรรมการรับแรงดึงที่แตกต่างกัน โดยมีค่าแรงต้านทานเพิ่มขึ้นตามลำดับ ตามจำนวนชั้นของตะขอที่ปลายเส้นใยที่เพิ่มขึ้น รูปร่างของตะขอที่ปลายเส้นใยมีบทบาทสำคัญในการยึดเหนี่ยวกับมอร์ต้า โดยตะขอช่วยเพิ่มแรงเสียดทานและแรงต้านต่อการหลุดดึงของเส้นใยจากมอร์ต้า ในระหว่างการรับแรงดึง พบว่าการหลุดของเส้นใยโลหะไม่ได้เกิดขึ้นทันที แต่เกิดจากกระบวนการชะลุดอกเป็นเส้นตรง ของชั้นตะขอกกล่าวคือ ตะขอแต่ละชั้นจะถูกดึงจนแปดตรง ก่อนที่เส้นใยจะหลุดออกจากเนื้อคอนกรีต เมื่อมีจำนวนชั้นของตะขอมากขึ้น เช่นในกรณีของเส้นใยแบบ 5D จะมีแรงยึดเหนี่ยวมากกว่าเส้นใยแบบ 3D หรือ 4D เนื่องจากต้องใช้แรงมากขึ้นในการดึงและชะลุดอกให้ตรง จึงส่งผลให้เส้นใยสามารถต้านทานแรงดึงได้สูงกว่า

4. สรุปผลการทดสอบ

4.1 ประเภทของเส้นใยโลหะ พฤติกรรมการรับแรงดึงของเส้นใยโลหะแบบตะขอปลายขึ้นอยู่กับ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวเส้นใยโลหะและมอร์ต้า รวมถึง แรงต้านการดึงออก (Pull-out Resistance) ซึ่งเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของตะขอ โดยเส้นใยที่มีตะขอมากขึ้นสามารถรับแรงดึงได้

มากกว่า เนื่องจากการยึดเหนี่ยวทางกล (Mechanical Interlock) ที่สูงขึ้น ตะขอที่ปลายเส้นใยช่วยป้องกันการเลื่อนหลุดของเส้นใยออกจากมอร์ตาร์ โดยเมื่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ส่วนของตะขอจะค่อยๆ ยึดตัวจนกลายเป็นเส้นตรง ก่อนที่เส้นใยจะถูกดึงออกทั้งหมด ส่งผลให้เส้นใยแบบ 3 ชั้น (5D) สามารถรับแรงดึงได้มากที่สุด รองลงมาคือ 2 ชั้น (4D) และ 1 ชั้น (3D) ตามลำดับ การเพิ่มจำนวนชั้นของตะขอช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านการชะลุดอกของเส้นใย ทำให้วัสดุสามารถรับแรงดึงได้สูงขึ้น

4.2 ผลกระทบของการกัดกร่อนของเส้นใยโลหะต่อพฤติกรรม
การรับแรงดึงและแรงยึดเหนี่ยวกับมอร์ตาร์ การรับแรงดึงของเส้นใยโลหะภายในมอร์ตาร์เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวของเส้นใยโลหะและมอร์ตาร์ ซึ่งทำให้เส้นใยโลหะสามารถถ่ายเทแรงไปยังโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม เมื่อเส้นใยโลหะเกิดสนิมบนพื้นผิว จะส่งผลให้พื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระมากขึ้น และเกิดการยึดเกาะระหว่างสนิมและมอร์ตาร์อย่างแน่นหนา ซึ่งอาจช่วยเพิ่มการรับแรงของโครงสร้างได้ในระยะหนึ่ง แต่เมื่อการกัดกร่อนของเส้นใยโลหะเพิ่มขึ้นถึงระดับ 7% จะมีผลทำให้เกิดการขาดของเส้นใยโลหะในบางชั้นตัวอย่าง โดยการขาดของเส้นใยโลหะจะทำให้โครงสร้างสูญเสียความสามารถในการรับแรงไปทันที

4.3 ผลกระทบของมุมมองการเรียงตัวของเส้นใยโลหะต่อพฤติกรรม
การรับแรงดึงและแรงยึดเหนี่ยวกับมอร์ตาร์ จากการทดสอบการจัดเรียงเส้นใยโลหะที่มุม 0°, 15°, 30° และ 45° ภายในมอร์ตาร์ พบว่า ในเส้นใยโลหะประเภท 3D กำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้นในช่วง 0° ถึง 45° จากการที่เส้นใยมีจำนวนตะขอเพียง 1 ชั้น จึงมีพฤติกรรมการชะลุดอกก่อนการแตกหักของมอร์ตาร์ และในเส้นใยโลหะประเภท 4D และ 5D กำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้นในช่วง 0° ถึง 30° เนื่องจากเส้นใยสามารถรับแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแรงดึงที่กระทำจะถูกส่งผ่านไปยังเส้นใยโดยตรง ทำให้เส้นใยทำหน้าที่หลักในการรับแรงดึง อย่างไรก็ตามที่มุม 45° พบว่าเกิดการแตกหักของมอร์ตาร์ เนื่องจากมุมการเรียงตัวของเส้นใยใกล้เคียงกับแนวตั้งฉากกับรอยแตก ส่งผลให้แรงดึงที่กระทำบางส่วนถูกถ่ายไปยังมอร์ตาร์ แทนที่จะถูกถ่ายไปยังเส้นใยโลหะโดยตรง อีกทั้งเมื่อเส้นใยถูกดึงออกรอบๆ เส้นใยจะเกิดแรงเฉือนและแรงดึงแยก ในขณะที่มอร์ตาร์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเปราะและมีความสามารถในการรับแรงดึงต่ำ ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและพังทลายของมอร์ตาร์ก่อนที่เส้นใยจะสามารถถ่ายแรงออกไปได้ทั้งหมด

5. ข้อเสนอแนะ

มีการทดสอบเส้นใยโลหะภายในส่วนผสมคอนกรีตประกอบในชั้นตัวอย่างที่ขนาดใหญ่มากขึ้น เช่นขนาด 10 x 10 x 30 ซม. ในขั้นตอนการเร่งการกัดกร่อนของเส้นใยโลหะ อาจใช้การส่องกล้องความละเอียดสูงในการคำนวณหน้าตัดพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อนเฉลี่ยที่พื้นผิวสัมผัสกับมอร์ตาร์รับแรงดึงของเส้นใยโลหะ เพื่อให้ได้ค่าที่ละเอียดยิ่งขึ้น และสามารถนำลักษณะความขรุขระมาวิเคราะห์ร่วม

กิตติกรรมประกาศ

โครงการปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จได้โดยคำแนะนำ จาก ดร. ปัญญา จิตติกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษานิพนธ์ นายบัณฑิต กาญจนการ และนายอดิชาติ แพรสสี ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในความเอื้อเฟื้อสถานที่ในการศึกษาปฏิบัติการปริญญานิพนธ์ตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จ

ขอขอบคุณครอบครัว เพื่อน ร้านอาหาร และศิลปิน สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือที่มอบให้

สุดท้ายนี้ หากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เกิดข้อผิดพลาดหรือข้อบกพร่องประการใด ทางคณะผู้วิจัยใคร่ขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์แก่ผู้อ่านและผู้สนใจศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ต่อไป

อ้างอิง

- [1] Anas M., Khan M., Bilal H., Jadoon S. and Nadeem M. *Fiber Reinforced Concrete: A Review*. 12th International Civil Engineering Conference (ICEC-2022), Karachi, Pakistan, (2022).
- [2] Abdallah S., Fan M., W.A. Rees D. *Analysis and modelling of mechanical anchorage of 4D/5D hooked end steel fibres*. Materials and Design 112 (2016)
- [3] Minh Khanh Vo. *Simulation of flexural performance of mill-cut steel fiber reinforced concrete beam degraded by mild corrosion*. FACULTY OF ENGINEERING Chulalongkorn University. (2021)
- [4] Tarifa M., Poveda E., Cunha V.M.C.F and Barros J.A.O. *Effect of the displacement rate and inclination angle in steel fiber pullout tests*. International Journal of Fracture (2020) pp 109-122.
- [5] Yoo DY., Gim JY. and Chun B. *Effect of rust layer and corrosion degree on the pullout behavior of steel fibers from ultra-high-performance concrete*. Journal of Materials Research and Technology (2020).
- [6] Mujalli M.A., Diara S., Mushtaha E., Hussien A. and Maksound A. *Evaluation of the Tensile Characteristics and Bond Behaviour of Steel Fiber-Reinforced Concrete: An Overview*. Fibers (2022) Vol.10, 104.
- [7] Austin S., Jones P. and Robins P. *Pull-out behaviour of hooked steel fibres*. Materials and Structures, Vol.35, pp 434-442.
- [8] Abdallah S., Fan M. and Zhou X. *Pull-out Behaviour of Hooked End Steel Fibres Embedded in Ultra-high Performance Mortar with Various W/B Ratios*. International Journal of Concrete Structures and Materials Vol.11, No.2, pp.301-313, June 2017.
- [9] Alizada E., Jandaghi Alae F., and Zabihi S. *Effect of steel fiber corrosion on mechanical Properties of Steel fiber reinforced concrete*. Asian Journal of civil engineering (BHRC) Vol.17, No. 2(2016) pp 147-158.