

พฤติกรรมรับการดัดของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้เส้นใยพอลิโพรพิลีน

Flexural Behavior of Synthetic Fiber Reinforced Concrete Beams using Polypropylene Fiber

สิริพงษ์ เกิดบุญมา^{1,*} นิตพงษ์ ประภาพันธุ์กุล² และ วิฑิต ปานสุข³

^{1,2,3} หน่วยปฏิบัติการวิจัยนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: siriphong10@gmail.com, cnnitpong@outlook.com, Withit.P@chula.ac.th

บทความนี้นำเสนอข้อมูลพฤติกรรมรับการดัดของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้เส้นใยพอลิโพรพิลีน ที่มีความยาว 56-58 มิลลิเมตร รูปแบบผิวลายนูน มีกำลังดึงประมาณ 520 และ 640 MPa โดยผสมลงไป ในคอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมสำหรับพื้นโรงงานอุตสาหกรรมและพื้นถนน โดยออกแบบให้มีกำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ที่อายุ 28 วัน คือ 28 และ 32 MPa และผสมเส้นใยลงไปปริมาณ 0, 2 และ 3 กิโลกรัม ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร และทดสอบคานที่มีรอยบากด้วยการทดสอบการดัดแบบสามจุดตามที่ระบุในมาตรฐาน โดยรายงานผลทดสอบในรูปของแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกที่ให้และค่าการเคลื่อนตัวของช่องเปิดที่ปากรอยแตกกว้าง (CMOD) เพื่อใช้แสดงความแปรปรวนของผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเส้นใยและอิทธิพลของตัวแปรต่างๆต่อผลการทดสอบ และคำนวณพบว่าเมื่อใส่เส้นใยพอลิโพรพิลีนในคอนกรีต จะทำให้ค่ากำลังรับการดัดที่แสดงในรูปของโมเมนต์ดัดสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของหน้าตัดซึ่งสมมติค่าความหนาขององค์อาคาร 150 มิลลิเมตร มีค่าเพิ่มขึ้นไม่ต่ำกว่าประมาณร้อยละ 30 และค่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นไม่ต่ำกว่าประมาณร้อยละ 10 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าดังกล่าวของคอนกรีตล้วนที่ไม่เสริมแรงด้วยเส้นใย

คำสำคัญ: คอนกรีตเสริมเส้นใย, เส้นใยสังเคราะห์, เส้นใยพอลิโพรพิลีน, พื้นโรงงาน, พื้นถนน

Abstract

This article shows results of flexural behavior of synthetic fiber reinforced concrete beams using polypropylene fiber, that made from fiber with 56-58 mm length, embossed surface and has tensile strength about 520 and 640 MPa. It was added to the mixture of concrete industrial ground floor and pavement with 28 and 32 MPa of designed compressive strength at 28 days of cube specimen. By using amount of fiber in 0, 2 and 3 kg for one cubic meter of concrete and test concrete notched beam according to standard with 3-point bending test. Test results are shown in the diagram of relationship between load and crack mouth opening displacement (CMOD). This diagram

represents variance of the results and significant of each variable to the results. The synthetic fiber reinforcement has increased load capacity of concrete by 30 percents in form of maximum bending moment per width of section, assuming member thickness of 150 mm. And shear capacity is increased at least 10 percents compare to the plain concrete, polypropylene.

Keywords: fiber reinforced concrete, synthetic fiber, polypropylene fiber, industrial floor, pavement

1. คำนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญและถูกใช้งานอย่างแพร่หลายมาเป็นเวลานาน คุณสมบัติที่โดดเด่นของคอนกรีตคือมีกำลังอัดที่สูง แต่มีข้อด้อยคือ กำลังดึงที่ต่ำ โครงสร้างโดยทั่วไปจึงออกแบบในรูปแบบของคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยส่วนของคอนกรีตถูกออกแบบเพื่อรับแรงอัดและใช้เหล็กเสริมเพิ่มเติมเข้ามาเพื่อรับแรงดึง คอนกรีตในปัจจุบันถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้มีสมรรถนะในการใช้งานที่ดี มีความต้านทานการกระทำโดยสิ่งแวดล้อม และยังสามารถควบคุมการผลิตให้คอนกรีตมีคุณสมบัติตามต้องการ ทั้งด้านกำลังและด้านการใช้งานอีกด้วย ดังนั้นเพื่อพัฒนาสมรรถนะของคอนกรีตในด้านต่างๆ การศึกษาวัสดุที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติในการรับแรงดึงของคอนกรีตจึงมีบทบาทสำคัญ ซึ่งในบทความนี้จะให้ความสนใจกับการเสริมแรงด้วยเส้นใย

คอนกรีตเสริมเส้นใย คือ คอนกรีตที่มีการผสมเส้นใยเพื่อช่วยรับแรงดึงในสัดส่วนผสม ทำให้คอนกรีตในโครงสร้างมีความสามารถรับแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยเส้นใยดังกล่าวจะกระจายอยู่ทั่วเมทริกซ์ (เนื้อคอนกรีตที่เส้นใยแทรกอยู่) เมื่อเกิดแรงดึงขึ้นจนเกิดรอยแตกกว้างที่พาดผ่านเส้นใย เส้นใยจะช่วยดึงรั้งเมทริกซ์เข้าไว้ด้วยกันจึงทำให้คอนกรีตเสริมเส้นใยมีความสามารถในการรับแรงดึงหลังเกิดรอยแตกกว้างได้มากกว่าคอนกรีตทั่วไป และถือได้ว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยมีความเหนียวมากกว่าคอนกรีตทั่วไป เส้นใยที่ถูกใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตเสริมเส้นใยมีหลายประเภท เช่น เส้นใยประเภทเหล็ก ซึ่งมีจุดเด่นในด้านกำลัง แต่ก็มียุติข้อด้อยในด้านต้นทุนการผลิต ต่อมาจึงมีการพัฒนาเส้นใยขึ้นอีกหลายประเภทโดยเฉพาะเส้นใยสังเคราะห์ โดยเส้นใย

สังเคราะห์นั้นผลิตจากวัสดุหลายชนิด เช่น พลาสติก สามารถผลิตให้มีรูปร่าง ขนาด และลักษณะพื้นผิวได้ตามที่ต้องการ จึงมีศักยภาพที่จะพัฒนาเพื่อใช้เป็นเส้นใยเสริมคอนกรีต

ในบทความนี้ทำการศึกษาการเสริมแรงด้วยเส้นใยสังเคราะห์ที่ทำจากพอลิโพรพิลีน มีลักษณะเป็นเส้นใยสั้น ผิวลายนูน ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่เหมาะสมในการยึดรั้งเมทริกซ์ และทำการวิเคราะห์พฤติกรรมรับการดัดของตัวอย่างทดสอบประเภทคาน (ซึ่งการดัดทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในส่วนหนึ่งของตัวอย่างทดสอบ) เช่น ความเหนียวหลังการแตกร้าวของคาน โดยเปรียบเทียบระหว่างคานคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมเส้นใยและเหล็กเสริมรับแรงดึง กับคานคอนกรีตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิโพรพิลีน โดยมีตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ปริมาณเส้นใย กำลังอัดของคอนกรีต และกำลังดึงของเส้นใย จากนั้นได้คำนวณเพื่อแสดงค่ากำลังรับการดัดและแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นตามมาตรฐานการออกแบบ โดยค่าที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบองค์อาคารที่เหมาะสม เช่น พื้นโรงงานอุตสาหกรรม(แผ่นพื้นวางบนดิน) พื้นถนน(ผิวทางคอนกรีต) ฯลฯ

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตการศึกษา

บทความนี้ทำการศึกษาผลของการผสมเส้นใยสังเคราะห์ที่ทำจากพอลิโพรพิลีนในเมทริกซ์ที่มีต่อพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีต โดยมีตัวแปร ได้แก่ สัดส่วนการผสมเส้นใย กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ต่อพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเส้นใย และกำลังรับแรงดึงของเส้นใยที่ใช้ ด้วยการทดสอบการดัดคานที่มีรอยร้าวแบบสามจุดตามที่ระบุในมาตรฐาน EN 14651 [1] โดยใช้ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่มีกำลังอัดออกแบบ 28 และ 32 MPa ใช้เส้นใยที่มีกำลังดึงระบุ 520 และ 640 MPa ผสมในสัดส่วน 0, 2 และ 3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และคำนวณกำลังรับการดัดและแรงเฉือนของคอนกรีตเสริมเส้นใยตามวิธีการคำนวณที่ระบุในมาตรฐาน EN 14845 [2] Eurocode 2 [3] และ RILEM [4] เพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติที่ไม่ได้ผสมเส้นใย ในการศึกษาจะเลือกใช้เส้นใยพอลิโพรพิลีนที่มีความยาว 56-58 มิลลิเมตรเท่านั้น และเติมเส้นใยลงไปให้กระจายตัวแบบสุ่มในเนื้อคอนกรีตเท่านั้น โดยไม่ได้ควบคุมการเรียงตัวของเส้นใย (fiber orientation)

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 การแบ่งกลุ่มตัวอย่างทดสอบ

บทความนี้ทำการทดสอบคานที่มีรอยร้าวทั้งหมด 10 กลุ่มตัวอย่าง โดยมีตัวแปร ได้แก่ ปริมาณของเส้นใยสังเคราะห์ที่ผสม กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ และกำลังดึงของเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้ แต่ละกลุ่มตัวอย่างจะทดสอบคานที่มีรอยร้าว 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดถูกจัดเตรียมและขนส่งมาทดสอบที่หน่วยทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริมาณเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดสอบจะแตกต่างกันทั้งหมด 3 สัดส่วน คือ 0, 2 และ 3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยระหว่างการผลิตจะมีการควบคุมคุณภาพที่เหมาะสมและจำเป็น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการ

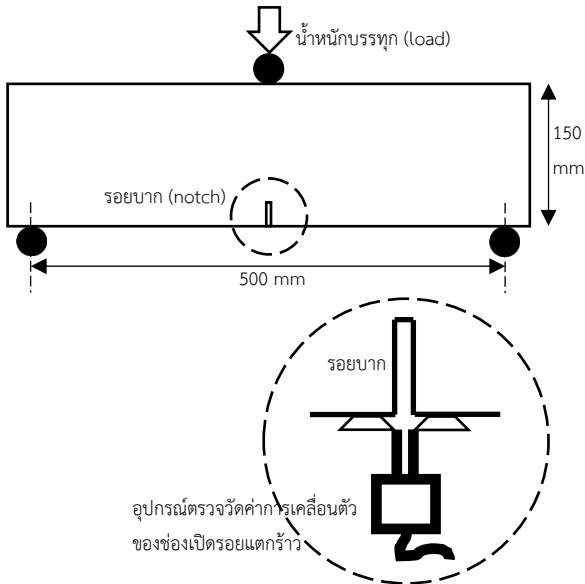
แยกตัวและเส้นใยเกาะตัวกันเป็นก้อน ส่วนคอนกรีตจะออกแบบให้มีกำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 28 และ 32 MPa โดยออกแบบสัดส่วนผสมให้สอดคล้องกับคอนกรีตที่ใช้ในงานพื้นโรงงานอุตสาหกรรมและพื้นถนน เส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้ศึกษาเป็นเส้นใยสั้น ผิวลายนูน มีความยาวเส้นใย 56-58 มิลลิเมตร โดยเลือกใช้เส้นใยที่มีกำลังดึง 520 และ 640 MPa ตามที่ระบุโดยผู้ผลิต กลุ่มตัวอย่างคานที่มีรอยร้าวที่ใช้ในการทดสอบจะมีรายละเอียดที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดของกลุ่มตัวอย่างทดสอบ

กลุ่มตัวอย่างทดสอบ	กำลังดึงระบุของเส้นใย (MPa)	กำลังอัดออกแบบของคอนกรีต (MPa)	ปริมาณเส้นใย (กก./ลบ.ม.)
280-NF	-	28	0
320-NF	-	32	0
280-F52-2	520	28	2
280-F52-3	520	28	3
280-F64-2	640	28	2
280-F64-3	640	28	3
320-F52-2	520	32	2
320-F52-3	520	32	3
320-F64-2	640	32	2
320-F64-3	640	32	3

3.2 การทดสอบการดัดคานตัวอย่าง

การทดสอบการดัดของคานที่มีรอยร้าวทั้งหมดอ้างอิงตามมาตรฐาน EN 14651 [1] โดยใช้คานทดสอบขนาดหน้าตัด 150 x 150 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ 500 มิลลิเมตร ทำการบากร่องที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวคานบริเวณท้องคาน โดยให้มีความกว้างรอยร้าวไม่เกิน 5 มิลลิเมตรและความลึกรอยร้าว 25 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำการทดสอบการดัดแบบสามจุด โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของคานไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวคานและอุปกรณ์ตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของช่องเปิดรอยร้าว (Crack Opening Displacement: COD) ไว้ที่ตำแหน่งบริเวณปากรอยร้าวใต้ท้องคานดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 เพื่อเก็บค่าการเคลื่อนตัวของช่องเปิดที่ปากรอยร้าว (Crack Mouth Opening Displacement: CMOD) ที่เกิดขึ้น โดยทำการบันทึกค่าหน้าหนักบรรทุกที่ให้และค่าการเคลื่อนตัวของช่องเปิดที่ปากรอยร้าวด้วยความถี่เท่ากับ 100 ค่า ต่อ 1 วินาที และทำการควบคุมอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกที่ให้แบบคงที่ตามการเพิ่มขึ้นของค่าการเคลื่อนตัวของช่องเปิดที่ปากรอยร้าว (CMOD control)



รูปที่ 1 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัด [1]



รูปที่ 2 การติดตั้งคานที่มีรอยบากสำหรับทดสอบ

3.3 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบ

นำค่าน้ำหนักบรรทุกที่ให้และค่าการเคลื่อนตัวของช่องเปิดที่ปากรอยแตกกว้าง (CMOD) ที่บันทึกค่าได้มาเขียนแผนภูมิความสัมพันธ์เพื่อใช้แสดงความแปรปรวนของผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเส้นใยและอิทธิพลของตัวแปรต่างๆต่อผลการทดสอบ โดยถึงแม้ว่าแต่ละกลุ่มตัวอย่างได้ทำการทดสอบคานที่มีรอยบากกลุ่มละ 3 ตัวอย่าง แต่ในการนำเสนอแผนภูมิความสัมพันธ์จะเลือกนำเสนอเฉพาะตัวอย่างทดสอบที่เป็นตัวแทนของแต่ละกลุ่มตัวอย่างตามตารางที่ 1 เท่านั้นเพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบและเหมาะสมกับความยาวของบทความนี้

3.4 การคำนวณกำลังรับการดัดและแรงเฉือน

ในการคำนวณค่ากำลังรับการดัดและแรงเฉือนโดยใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบเพื่อทำการเปรียบเทียบนั้น จะอ้างอิงสมการตามมาตรฐานต่างๆ [2-4] ซึ่งรวบรวมอยู่ใน Technical Report 34 [5] โดยจะแยกการคำนวณออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การคำนวณกำลังรับการดัดขององค์อาคารคอนกรีตล้วนที่ไม่เสริมแรง (plain concrete) กำลังรับการดัดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเส้นใย กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตล้วนที่ไม่เสริมแรง และกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตเสริมเส้นใย

กำลังรับการดัดขององค์อาคารคอนกรีตล้วนที่ไม่เสริมแรง สามารถแสดงในรูปของโมเมนต์ดัดสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของหน้าตัด (M_{un}) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$M_{un} = f_{ctd,fl}(h^2/6) \quad (1)$$

โดย $f_{ctd,fl}$ คือ กำลังดึงจากการดัดของคอนกรีต สามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (2), h คือ ค่าความลึกออกแบบของหน้าตัด

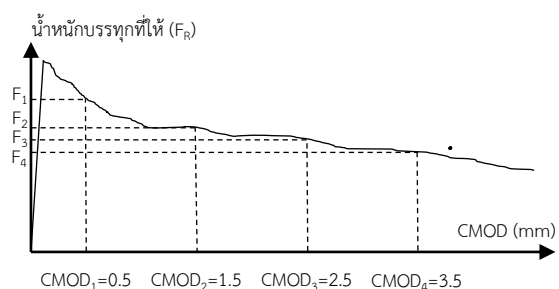
$$f_{ctd,fl} = f_{ctm}(1.6 - h/1000)/\gamma_m \quad (2)$$

โดย f_{ctm} คือ กำลังดึงตามแนวแกนเฉลี่ย เท่ากับ $0.3f_{ck}^{(0.67)}$, f_{ck} คือ กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก, γ_m เท่ากับ 1.5 สำหรับคอนกรีต

ในการคำนวณกำลังรับการดัดและแรงเฉือนของคอนกรีตเสริมเส้นใย จะต้องใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบ โดยใช้ค่าน้ำหนักบรรทุกที่ให้ระหว่างทดสอบที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบเกิดค่าการเคลื่อนตัวของช่องเปิดที่ปากรอยแตกกว้าง (CMOD) มีค่าเท่ากับ 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3 มาคำนวณค่ากำลังดึงจากการดัดคงค้าง (residual flexural tensile strength: f_R) ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$f_R = 3F_R l / (2bh_{sp}^2) \quad (3)$$

โดย F_R คือ น้ำหนักบรรทุกที่ให้, l คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (500 มิลลิเมตร), h_{sp} คือ ความลึกของหน้าตัดจนถึงปลายของรอยบาก (125 มิลลิเมตร), b คือ ความกว้างคานทดสอบ (150 มิลลิเมตร)



รูปที่ 3 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกที่ให้และค่าการเคลื่อนตัวของช่องเปิดที่ปากรอยแตกกว้าง (CMOD) [5]

ค่ากำลังดึงจากการตัดคงค้างที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (3) ทั้งหมดสี่ค่า ได้แก่ f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} และ f_{R4} ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับค่าการเคลื่อนตัวของช่องเปิดที่ปากรอยแตกร้าว (CMOD) มีค่าเท่ากับ 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะนำไปใช้ในการคำนวณกำลังรับการตัดและแรงเฉือนของคอนกรีตเสริมเส้นใยต่อไป

ในการคำนวณกำลังรับการตัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยจะต้องคำนวณค่ากำลังตามแนวแกนเฉลี่ย (mean axial tensile strength) สองค่า ได้แก่ σ_{r1} และ σ_{r4} ซึ่งสอดคล้องกับค่าการเคลื่อนตัวของช่องเปิดที่ปากรอยแตกร้าว (CMOD) มีค่าเท่ากับ 0.5 และ 3.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในสมการที่ (4) และ (5) [4]

$$\sigma_{r1} = 0.45f_{R1} \quad (4)$$

$$\sigma_{r4} = 0.37f_{R4} \quad (5)$$

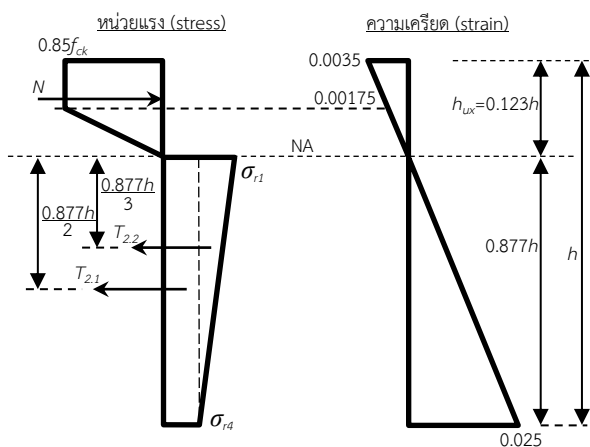
สำหรับวัสดุคอนกรีตเสริมเส้นใยที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกที่ให้และค่าการเคลื่อนตัวของช่องเปิดที่ปากรอยแตกร้าว (CMOD) แสดงพฤติกรรมการอ่อนตัวจากความเครียด (strain softening) สามารถประมาณค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของหน้าตัดด้วยวิธีการอย่างง่ายตามข้อสมมติต่างๆ [5] ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากการคิดโมเมนต์รอบเซนทรอยด์ของแรงอัด N ดังแสดงในรูปที่ 4 และสมการที่ (6) ถึง (8)

$$M_u = \left[T_{2.1} \left(\frac{0.877h}{2} + 0.075h \right) + T_{2.2} \left(\frac{0.877h}{3} + 0.075h \right) \right] / \gamma_m \quad (6)$$

$$T_{2.1} = 0.88h\sigma_{r4} \quad (7)$$

$$T_{2.2} = 0.44h(\sigma_{r1} - \sigma_{r4}) \quad (8)$$

โดย h คือ ค่าความลึกของหน้าตัด, γ_m เท่ากับ 1.5 สำหรับคอนกรีต



รูปที่ 4 การกระจายตัวของหน่วยแรงและความเครียดบนหน้าตัดที่รับโมเมนต์ดัดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเส้นใย [5]

การคำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตตามมาตรฐาน Eurocode 2 [3] จะต้องคำนวณหาลำดับรับแรงเฉือนของคอนกรีตล้วนที่ไม่เสริมแรงก่อน จากนั้นจึงค่อยรวมผลของเส้นใยเข้าไปเพื่อคำนวณเป็นกำลังรับแรงเฉือนรวมของคอนกรีตเสริมเส้นใย โดยกำลังรับแรงเฉือนต่ำสุดของคอนกรีตล้วนที่ไม่เสริมแรง ($V_{Rd,c,min}$) สามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (9) และ (10)

$$V_{Rd,c,min} = 0.035k_s^{1.5}f_{ck}^{0.5} \quad (9)$$

$$k_s = 1 + \left(\frac{200}{d} \right)^{0.5} \leq 2.0 \quad (10)$$

โดย d คือ ค่าความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด

Technical Report 34 [5] ได้แนะนำวิธีการคำนวณหาลำดับรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากผลของเส้นใย (v_f) โดยใช้ค่ากำลังดึงจากการตัดคงค้างที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (3) ทั้งหมดสี่ค่า ได้แก่ f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} และ f_{R4} มาคำนวณดังแสดงในสมการที่ (11)

$$v_f = 0.015(f_{R1} + f_{R2} + f_{R3} + f_{R4}) \quad (11)$$

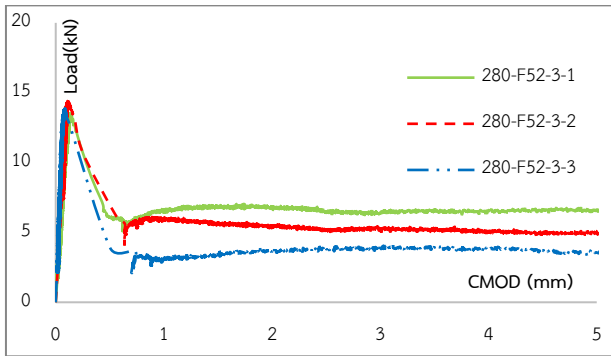
ดังนั้นกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตเสริมเส้นใย (V_{FRC}) สามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (12)

$$V_{FRC} = V_{Rd,c,min} + v_f \quad (12)$$

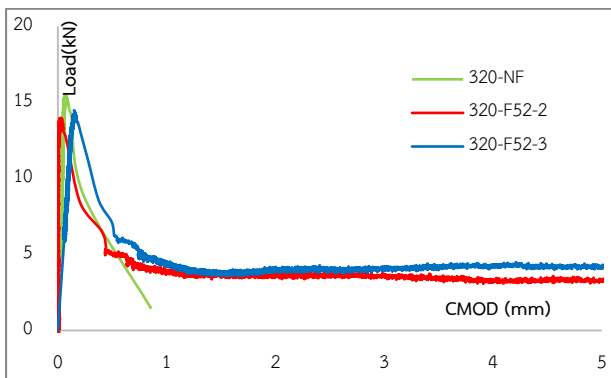
4. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

4.1 ผลการทดสอบการตัดของคานที่มีรอยบาก

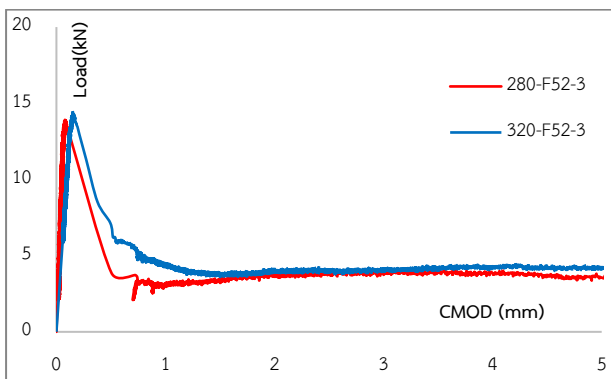
จากผลการทดสอบการตัดของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยที่มีรอยบากทุกตัวอย่างพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกที่ให้และค่าการเคลื่อนตัวของช่องเปิดที่ปากรอยแตกร้าว (CMOD) แสดงพฤติกรรมการอ่อนตัวจากการโก่งตัว (Deflection softening) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5 กล่าวคือ เกิดการอ่อนตัวจากความเครียดภายใต้การดัด โดยโมเมนต์ดัดมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากเกิดรอยแตกร้าวเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบตามมุมหมุนจากการดัดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลทดสอบที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้เส้นใยที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน [6] ที่ผลการทดสอบแสดงพฤติกรรมการอ่อนตัวจากความเครียด (strain softening) โดยวัสดุที่มีการอ่อนตัวจากการโก่งตัวนี้สามารถประยุกต์ใช้ในงานที่หลากหลาย ตั้งแต่การควบคุมการแตกร้าวจากการหดตัวพลาสติกของคอนกรีต ไปจนถึงการใช้ในผิวทางคอนกรีตและแผ่นพื้นวางบนดิน [7] นอกจากนี้จากรูปที่ 5 ยังพบว่าผลการทดสอบที่ได้มีความแปรปรวน โดยหลังจากค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ให้ ความสัมพันธ์จะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนแม้ว่าตัวอย่างทั้งสามจะผสมพร้อมกันและแยกเทจากเครื่องผสมด้วยวิธีเดียวกัน และเนื่องจากความแปรปรวนดังกล่าวมีผลโดยตรงกับค่าที่ใช้ในการออกแบบ จึงอาจมีความจำเป็นที่ต้องทดสอบด้วยจำนวนที่มากขึ้น [5] และเลือกค่าที่เหมาะสมในการใช้งาน



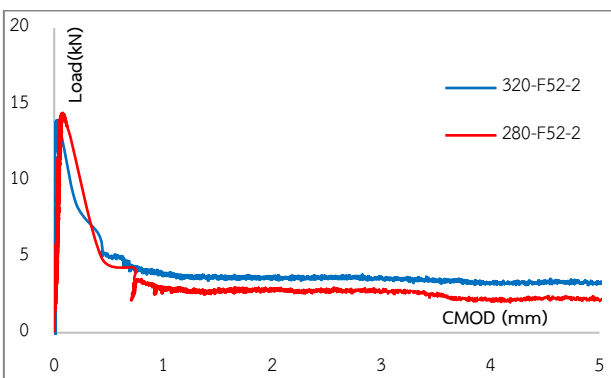
รูปที่ 5 ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่ให้และค่า CMOD ของกลุ่มตัวอย่าง 280-F52-3



รูปที่ 6 ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่ให้และค่า CMOD ของตัวอย่างที่เป็นตัวแทนกลุ่มตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน



รูปที่ 7 ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่ให้และค่า CMOD ของตัวอย่างที่เป็นตัวแทนกลุ่มตัวอย่างที่มีกำลังอัดของคอนกรีตแตกต่างกัน



รูปที่ 8 ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่ให้และค่า CMOD ของตัวอย่างที่เป็นตัวแทนกลุ่มตัวอย่างที่มีกำลังอัดของคอนกรีตแตกต่างกัน

4.2 อิทธิพลของปริมาณเส้นใย

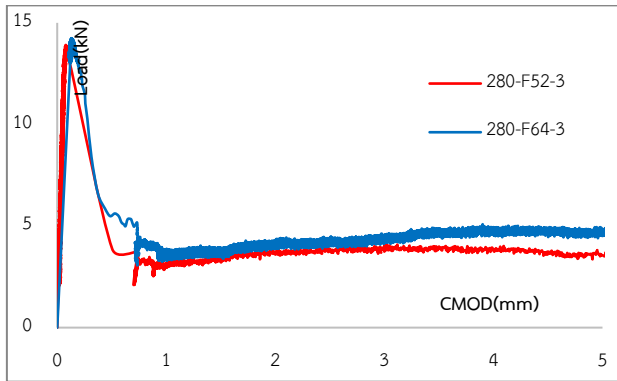
ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบคานตัวอย่างที่ใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดออกแบบเท่ากันและใช้เส้นใยที่มีกำลังดึงระบุเท่ากันดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 6 พบว่าเมื่อมีการผสมเส้นใยลงไปในสัดส่วนผสมด้วยปริมาณ 2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คอนกรีตจะสามารถต้านทานการดัดหลังจากค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่เกิดการแตกร้าวได้ โดยสามารถคำนวณค่ากำลังดึงจากการดัดคงค้าง (residual flexural tensile strength) ที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งแตกต่างจากคานคอนกรีตล้วนไม่ผสมเส้นใยที่ไม่สามารถต้านทานการดัดหลังการแตกร้าวได้เลย และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยจาก 2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเป็น 3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะทำให้ผลทดสอบมีค่าน้ำหนักบรรทุกคงค้างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 6 ซึ่งผลทดสอบที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้เส้นใยที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน [6] ที่ผลการทดสอบแสดงว่าการเพิ่มเส้นใยในปริมาณที่ไม่มากจนเกินไปจะทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกคงค้างเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อคำนึงถึงความแปรปรวนของผลทดสอบ จึงเป็นการยากที่จะสรุปความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยกับผลการทดสอบที่จะเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นในการหาค่าที่ใช้ในการออกแบบสำหรับคอนกรีตที่เสริมเส้นใยด้วยปริมาณที่ต้องการ จะต้องมีการทดสอบด้วยจำนวนตัวอย่างที่เพียงพอและเลือกค่าที่เหมาะสมในการใช้งาน

4.3 อิทธิพลของกำลังอัดของคอนกรีต

ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบคานตัวอย่างที่ใช้เส้นใยที่มีกำลังดึงระบุและปริมาณเท่ากันดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 7 และ 8 พบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่เกิดการแตกร้าว ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังดึงจากการดัดหรือค่ามอดูลัสการแตกร้าว (modulus of rupture) มีค่าแปรผันตรงกับกำลังอัดของคอนกรีตตามสมการที่ (2) ดังแสดงในรูปที่ 7 แต่สำหรับการเปรียบเทียบบางกลุ่มตัวอย่างพบว่าค่าดังกล่าวไม่ได้แปรผันตรงกับกำลังอัดของคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 8 โดยความแปรปรวนดังกล่าวอาจเกิดจากค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่พิจารณานั้นเป็นค่ากำลังอัดออกแบบ ดังนั้นควรมีการใช้กำลังอัดของคอนกรีตจริงจากการทดสอบในการเปรียบเทียบต่อไป

4.4 อิทธิพลของกำลังดึงของเส้นใย

ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบคานตัวอย่างที่ใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดออกแบบเท่ากันและใช้เส้นใยที่มีปริมาณเท่ากันดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 9 พบว่าค่ากำลังดึงระบุของเส้นใยที่แตกต่างกันสองค่าได้แก่ 520 และ 640 MPa นั้น ไม่มีอิทธิพลต่อผลทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการพังทลาย (failure mode) ของหน้าตัดตัวอย่างทดสอบที่พบแต่อย่างไรก็ตามเมื่อคำนึงถึงความแปรปรวนของผลทดสอบ การหาค่าที่ใช้ในการออกแบบสำหรับคอนกรีตที่เสริมเส้นใยซึ่งมีการระบุกำลังดึงจากผู้ผลิต จะต้องมีการทดสอบด้วยจำนวนตัวอย่างที่เพียงพอและเลือกค่าที่เหมาะสมในการใช้งาน



รูปที่ 9 ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่ให้และค่า CMOD ของตัวอย่างที่เป็นตัวแทนกลุ่มตัวอย่างที่มีกำลังดึงของเส้นใยแตกต่างกัน

ตารางที่ 2 ตัวอย่างการคำนวณของกลุ่มตัวอย่างทดสอบ 280-F52-2

$i =$	CMOD (mm)	F_{Ri} (N)	f_{Ri} (N/mm ²)	σ_{ri} (N/mm ²)
1	0.5	4800	1.536	0.691
2	1.5	2800	0.896	-
3	2.5	2800	0.896	-
4	3.5	2600	0.832	0.308
f_{cu} (N/mm ²)	f_{ck} (N/mm ²)	f_{ctm} (N/mm ²)	$f_{ctd,fl}$ (N/mm ²)	M_{un} (N*mm/mm)
28	22	2.41	2.33	8732
$T_{2,1}$ (N/mm)	$T_{2,2}$ (N/mm)	M_u (N*mm/mm)	$V_{rd,c,min}$ (N/mm ²)	V_f (N/mm ²)
40.6	25.3	3016	0.469	0.062

ตารางที่ 3 ค่ากำลังรับการดัดและแรงเฉือนของตัวแทนกลุ่มตัวอย่างทดสอบ

กลุ่มตัวอย่าง ทดสอบ	M_{un} (N*mm/mm)	M_u (N*mm/mm)	$V_{rd,c,min}$ (N/mm ²)	V_f (N/mm ²)
280-NF	8732	-	0.469	-
320-NF	9549	-	0.501	-
280-F52-2	8732	3016	0.469	0.062
280-F52-3	8732	3495	0.469	0.072
280-F64-2	8732	3422	0.469	0.072
280-F64-3	8732	4223	0.469	0.088
320-F52-2	9549	4679	0.501	0.094
320-F52-3	9549	4642	0.501	0.095
320-F64-2	9549	2735	0.501	0.055
320-F64-3	9549	2891	0.501	0.057

4.5 การคำนวณและเปรียบเทียบค่ากำลังรับการดัดและแรงเฉือน

ในการคำนวณค่ากำลังรับการดัดและแรงเฉือนของคอนกรีตเสริมเส้นใยจะใช้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่ให้และการเคลื่อนตัวของช่องเปิดที่ปากรอยแตกกว้าง (CMOD) จากการทดสอบคานที่มีรอย

บากมาคำนวณตามสมการที่ (1) ถึง (12) โดยตัวอย่างการคำนวณของกลุ่มตัวอย่างทดสอบ 280-F52-2 จะได้ค่าต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2 และค่ากำลังรับการดัดและแรงเฉือนของตัวแทนกลุ่มตัวอย่างทดสอบทุกกลุ่มจะแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งจะพบว่าเมื่อใส่เส้นใยพอลิโพรพิลีนในคอนกรีตด้วยรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1 จะทำให้ค่ากำลังรับการดัดที่แสดงในรูปของโมเมนต์ดัดสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของหน้าตัดซึ่งสมมติค่าความหนาขององค์อาคาร 150 มิลลิเมตร มีค่าเพิ่มขึ้นไม่ต่ำกว่าประมาณร้อยละ 30 และค่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นไม่ต่ำกว่าประมาณร้อยละ 10 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าดังกล่าวของคอนกรีตล้วนที่ไม่เสริมแรงด้วยเส้นใย

5. บทสรุป

แม้ว่าระหว่างการพัฒนาจะมีการควบคุมคุณภาพที่เหมาะสมและจำเป็นแต่ผลการทดสอบที่ได้มีความแปรปรวนซึ่งส่งผลโดยตรงกับค่าที่ใช้ในการคำนวณออกแบบ จึงอาจมีความจำเป็นที่ต้องทดสอบด้วยจำนวนตัวอย่างที่มากขึ้นและเลือกค่าที่เหมาะสมในการใช้งาน สำหรับค่ากำลังรับการดัดซึ่งสมมติค่าความหนาขององค์อาคาร 150 มิลลิเมตร จะมีค่าเพิ่มขึ้นไม่ต่ำกว่าประมาณร้อยละ 30 ส่วนค่ากำลังรับแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นไม่ต่ำกว่าประมาณร้อยละ 10 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าดังกล่าวของคอนกรีตล้วนที่ไม่เสริมแรงด้วยเส้นใย

เอกสารอ้างอิง

- [1] British Standards Institution, EN 14651 + A1: 2007 (2005). *Test method for metallic fibered concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)*. BSI, London.
- [2] British Standards Institution, EN 14845 (2006). *Test methods for fibres in concrete, Part 1: Reference concretes, Part 2: Effect on strength*. BSI, London.
- [3] British Standards Institution, EN 1992-1-1 + NA (2004). *Eurocode 2, Design of concrete structures, Part 1-1, General rules and rules for buildings*. BSI, London.
- [4] RILEM Final recommendations of TC 162-TDF (2002). Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: bending test. *Materials and structures*, 35, pp. 579–582.
- [5] The Concrete Society (2013). *Concrete Industrial Ground Floors, Technical Report 34*, The Concrete Society, Camberley.
- [6] จิตราภรณ์ จิตตานุกัษ์ (2559). *การพัฒนาวัสดุส่วนผสมคอนกรีตเสริมเส้นใยสมรรถนะสูงมาก*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [7] Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W. (2006). Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. *Materials and structures*, 39, pp. 547-555.