

## แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมรอยร้าว ของคอนกรีตเสริม เส้นใยเหล็กที่มีการเสริม เหล็กเส้นเพิ่มเติม

### Interaction diagram for crack control steel fiber reinforced concrete with additional reinforcing bars

คำรที อร่ามศรีประเสริฐ<sup>1</sup>, เกณฑกานต์ งามสอน<sup>1</sup> และ รักติพงษ์ สหมิตรมงคล<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

\*Corresponding author; E-mail address: raktipong.sah@mail.kmutt.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ความกว้างรอยร้าวเนื่องจากแรงดัดแบบทางเดียวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่มีการเสริมเหล็กเส้นและทำการ โดยใช้วิธีการคำนวณความกว้างรอยร้าวตามมาตรฐาน EUROCODE 2 ที่พัฒนาต่อโดย Löfgren เพื่อพัฒนาชุดคำสั่งสำหรับการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดที่กระทำร่วมกับแรงตามแนวแกน การวิเคราะห์ช่วยให้สามารถตรวจสอบอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเส้น ความหนาของหน้าตัดคอนกรีต และปริมาณเส้นใยเหล็กที่มีผลต่อความกว้างรอยร้าวที่จะเกิดขึ้นในหน้าตัดคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก โดยการใส่เหล็กเส้นเข้าไปในหน้าตัดคอนกรีตส่งผลให้ความกว้างรอยร้าวเนื่องจากแรงดัดลดลง ในขณะที่การเพิ่มความหนาของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กส่งผลให้หน้าตัดสามารถรับกำลังรับแรงดัดแตกกว้างได้สูงขึ้น งานวิจัยยังชี้ให้เห็นว่าหน้าตัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กที่เสริมเหล็กเส้นจะมีค่าแรงดัดที่ควรควบคุมอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงดัดสูงสุดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กที่เสริมเหล็กเส้นเพื่อให้ความกว้างรอยร้าวเป็นไปตามคำแนะนำของมาตรฐาน EUROCODE 2

คำสำคัญ: ความกว้างรอยร้าว, คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก, กำลังรับแรงดึงคงเหลือ, ตัวควบคุมความปลอดภัย, แผนภูมิปฏิสัมพันธ์

#### Abstract

This research was an analysis for crack width of steel-fiber-reinforced concrete (SFRC) with additional reinforcing steel bars under one-way flexure. The crack width was calculated according to the modified EUROCODE 2 standard proposed by Löfgren. An algorithm for analyzing flexural strength with axial force for safety envelope using crack width as a control parameter is developed. The analysis successfully evaluates the influences from the amount of reinforcing steel bars, the thickness of cross-section, and the amount of steel fibers on the width of cracks that will take place. When more reinforcing steel bars or when the

thickness of cross-section is increased, the crack width is reduced. The study also shows that the bending moment should be limited to 20-30 percent of the flexural strength of the cross-section of SFRC with reinforcing steel bar if the crack width is to be controlled according to recommendations in the EUROCODE 2 standard.

Keywords: Crack width, Residual Tensile Strength, Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC), Steel Reinforcing bar, Eurocode

#### 1. บทนำ

โดยทั่วไปของการออกแบบแผ่นพื้นโรงงานผู้ออกแบบจะต้องออกแบบให้แผ่นพื้นสามารถรับแรงได้มากกว่าปกติเนื่องจากแผ่นพื้นโรงงานจะต้องรับน้ำหนักบรรทุกจาก พาเลทสินค้า รถยกสินค้า หรือเครื่องจักร จากการใช้ งานที่หนักก็ทำให้ตัวแผ่นพื้นเกิดความเสียหายเป็นรอยแตกกว้าง ซึ่งรอยแตกกว้างพวคนี้นำผลกระทบต่อให้บางบริเวณไม่สามารถดำเนินการได้เป็นปกติ ทำให้จำเป็นต้องหยุดเครื่องจักรหรือส่งสินค้าเพื่อทำการซ่อมแซมพื้นส่วนที่แตกกว้างเกือบจะเป็นไปไม่ได้เลยที่จะป้องกันการแตกกว้างของคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามขนาดของรอยร้าวสามารถจำกัดและควบคุมได้ โดยปัจจุบันได้มีการนำเส้นใยเหล็ก (steel fiber) มาใช้ทำหน้าที่รับแรงดึงภายในคอนกรีต เช่นเดียวกับเหล็กเส้น จากพฤติกรรมการรับแรงดึงหลักการแตกกว้างของเส้นใยเหล็กในกรณีที่เสริมเส้นใยเหล็กเพียงพอจะทำให้คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กมีพฤติกรรมแบบการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (strain hardening) [7] ทำให้หลังคอนกรีตเกิดรอยแตกกว้างคอนกรีตสามารถรับแรงดัดหลังเกิดการแตกกว้างได้มากกว่ากำลังรับแรงดัดแตกกว้าง ซึ่งรอยแตกกว้างที่เกิดจะค่อยๆขยายความกว้างอย่างช้าๆ ซึ่งจะต่างจากพฤติกรรมหลังการแตกกว้างแบบอ่อนตัวเนื่องจากความเครียด (strain softening) เมื่อเวลาเกิดรอยแตกกว้างคอนกรีตสามารถรับแรงดัดหลังเกิดการแตกกว้างได้น้อยกว่ากำลังรับแรงดัดแตกกว้าง ซึ่งรอยแตกกว้างจะขยายกว้างด้วยอัตราที่มากกว่าพฤติกรรมแบบการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (strain hardening) จากปัญหาดังกล่าว ผู้ศึกษาจึงมีแนวคิดพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างพื้น ด้วยชุดคำสั่ง Visual Basic for Applications (VBA)

บน Microsoft Excel นำเข้าข้อมูล ในรูปแบบของตัวเลขคำนวณวิเคราะห์ หากำลังรับแรงดัดและแรงตามแนวแกนสูงสุดที่หน้าตัดสามารถรับได้ พร้อมคำนวณความกว้างรอยแตกกว้าง ตามมาตรฐาน EUROCODE 2 [3] แสดงผลในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนและแรงดัด

## 2. วิธีการคำนวณ

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีคำนวณความกว้างรอยร้าวตามมาตรฐานการออกแบบของ EUROCODE2 [3] ที่ถูกพัฒนาต่อโดย Lofgren [2] ในส่วนของการคำนวณแรงดัดและแรงตามแนวแกนคำนวณตามมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กทั่วไป [8]

### 2.1 วิธีคำนวณความกว้างรอยร้าว

ในการคำนวณความกว้างรอยร้าวของงานวิจัยนี้จะใช้มาตรฐานของการออกแบบ EUROCODE2 [3] ที่ถูกพัฒนาต่อโดย Lofgren [2] ภายใตยมาตรฐานมีการระบุวิธีการคำนวณระยะห่างระหว่างรอยร้าวที่ และ วิธีการคำนวณความกว้างรอยร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กดังสมการที่ (1) และ (4)

$$s_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 k_5 \frac{\phi}{\rho_{p,eff}} \quad (1)$$

โดย  $s_{r,max}$  คือระยะห่างสูงสุดระหว่างรอยร้าว,  $c$  คือระยะหุ้มเหล็ก ของเหล็กเสริมตามยาว,  $\phi$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ตามยาว,  $\rho_{p,eff}$  คืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม ตามแนวยาวกับพื้นที่หน้าตัดคอนกรีตบริเวณที่รับแรงดัด,  $k_1$  คือค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งคำนึงถึงความสามารถในการยึดเหนี่ยวของผิวเหล็กเสริม โดย  $k_1$  จะเท่ากับ 0.8 สำหรับเหล็กที่มีแรงยึดเหนี่ยวสูง และ  $k_1$  จะเท่ากับ 1.6 สำหรับเหล็กที่มีผิวแบบธรรมดาทั่วไป,  $k_2$  คือค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งคำนึงถึงการกระจายตัวของความเครียด โดย  $k_2$  จะเท่ากับ 0.5 สำหรับแรงดัด และ  $k_2$  จะเท่ากับ 1.0 สำหรับแรงดัดโดยตรง, ส่วน  $k_3$  และ  $k_4$  EUROCODE 2 แนะนำให้ใช้ค่าเท่ากับ 3.4 และ 0.425 ตามลำดับ ตัวแปร  $k_5$  เป็นตัวแปรที่คำนึงถึงผลของเส้นใยเหล็กที่ส่งผลต่อระยะห่างระหว่างรอยร้าวและความกว้างรอยร้าวที่เกิดขึ้น โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใยเหล็ก และรูปร่างของเส้นใยเหล็กโดยตัวแปร  $k_5$  สามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$k_5 = 1 - \frac{f_{ft,res}}{f_{ctm}} \quad (2)$$

โดย  $f_{ft,res}$  คือกำลังรับแรงดัดหลังการเกิดร้าวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$f_{ft,res} = 0.45 f_{Rm,1} \quad (3)$$

ค่า  $f_{Rm,1}$  คือค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงดัดคงเหลือของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ความกว้างรอยร้าวเท่ากับ 0.5 มม. (CMOD=0.5mm) ความกว้างรอยร้าวตามมาตรฐาน EUROCODE 2 สามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$w_k = s_{r,max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (4)$$

โดย  $w_k$  คือความกว้างรอยร้าว,  $\epsilon_{sm}$  คือค่าเฉลี่ยความเครียดของเหล็กเสริม  $\epsilon_{cm}$  คือค่าเฉลี่ยความเครียดของคอนกรีตระหว่างรอยร้าวซึ่ง  $(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$  สามารถหาได้จากสมการที่ (5)

$$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \quad (5)$$

โดย  $\sigma_s$  คือค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับเหล็กเสริมและคำนวณโดย พิจารณาว่าหน้าตัดมีการร้าว  $\alpha_e$  คืออัตราส่วนระหว่างโมดูลัส ยึดหยุ่นของเหล็กและคอนกรีต ( $E_s/E_c$ ),  $k_t$  คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการให้แรง โดย  $k_t$  จะเท่ากับ 0.6 สำหรับการให้แรงแบบระยะสั้น และ  $k_t$  จะเท่ากับ 1.0 สำหรับการให้แรงแบบระยะยาว โดยในมาตรฐานมีการระบุถึงความกว้างรอยร้าวสูงสุดที่ยอมให้ในกรณีที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กอย่างเดียว และกรณีที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กพร้อมกับเหล็กเส้นอยู่ที่ 0.3mm.

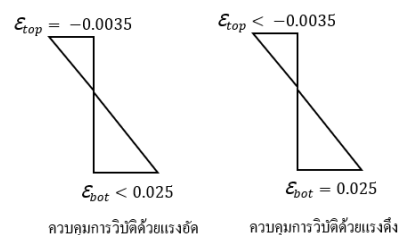
### 2.2 วิธีคำนวณแรงดัดสูงสุด

วิธีในคำนวณแรงดัดและแรงตามแนวแกนในการวิจัยนี้จะอ้างอิงมาจาก [5] โดยสมมุติฐานในการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัด ดังต่อไปนี้

- 1) ระยะเวลาของหน้าตัดยังคงเป็นระนาบทั้งก่อนและหลังการรับแรงดัด หมายถึง การกระจายของหน่วยยึดหดบนหน้าตัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะห่างจากแนวแกนสะเทิน
- 2) การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมไปเป็นอย่างสมบูรณ์ หมายถึง หน่วยการยึดหดตัวของเหล็กเสริมและคอนกรีตมีค่าเท่ากันที่ตำแหน่งเดียวกัน
- 3) หน่วยแรงของเส้นใยเหล็กสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์หน่วยแรงและหน่วยการยึดหด
- 4) หน่วยการยึดหดตัวสูงสุดของคอนกรีตเท่ากับ -0.0035 และน้อยสุดที่ -0.002 ในกรณีที่รับแรงอัดตามแนวแกนอย่างเดียว
- 5) สำหรับคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่เสริมเหล็กเส้นหน่วยการยึดหดสูงสุดเท่ากับ 0.025

เริ่มจาก เงื่อนไขการวิบัติแบบสมดุล(Balance failure condition) โดย จะทำการเปลี่ยนค่าหน่วยการยึดหดเพิ่มขึ้นและลดลงตามแต่ละกรณี การทำเช่นนี้จะสามารถหาค่าระยะแกนสะเทินในแต่ละกรณีได้ ซึ่งค่าระยะแกนสะเทินจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าแรงตามแนวแกนและแรงดัดได้ดังรูปที่ 1

รูปที่ 1 การกระจายตัวของหน่วยแรงยึดหดในแต่ละกรณี



ซึ่งหลักในการวิเคราะห์หากำลังต้านทานแรงดัดสูงสุดของคานจะใช้สมการที่(6)ในการวิเคราะห์ ซึ่งสมการนี้ได้มาจากความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของหน่วยแรงโดยใช้สมการสมดุลแรง

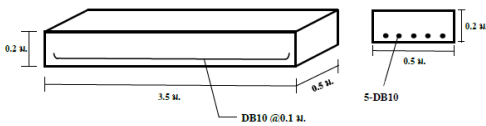
$$M_n = (A_s f_y) \left( d - \frac{x}{2} \right) + F_{fc,t} b (h - x) \left( \frac{h}{2} + \frac{x}{6} \right) \quad (6)$$

โดยที่  $A_s$  คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม,  $f_y$  คือค่าความเค้นของเหล็กเส้น,  $F_{fc,t}$  คือค่ากำลังรับแรงดึงของเหล็ก,  $d$  คือระยะจากขอบบนของคอนกรีตถึงจุดศูนย์กลางเหล็กเสริม,  $x$  คือระยะแนวแกนสะเทินและ  $b, h$  คือความกว้าง ความลึกของหน้าตัดตามลำดับ

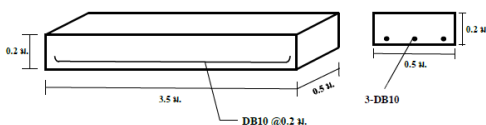
### 3. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

#### 3.1 ตัวอย่างทดสอบ

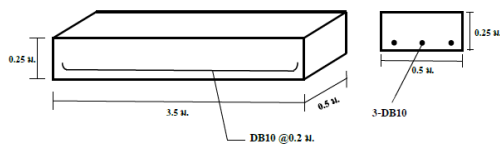
ตัวอย่างแผ่นพื้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่มีการเสริมเหล็กเส้น โดยตัวอย่างทดสอบมีด้วยกัน 2 ขนาด คือ  $0.2 \times 0.5 \times 3.5$  ลบ.ม. และ  $0.25 \times 0.5 \times 3.5$  ลบ.ม. เป็นขนาดของความลึก ความกว้าง และความยาวตามลำดับ



(ก) ตัวอย่างขนาด  $0.2 \times 0.5 \times 3.5$  ลบ.ม. และ เสริมเหล็ก DB10 @ 0.1 ม.



(ข) ตัวอย่างขนาด  $0.2 \times 0.5 \times 3.5$  ลบ.ม. และ เสริมเหล็ก DB10 @ 0.2 ม.



(ค) ตัวอย่างขนาด  $0.25 \times 0.5 \times 3.5$  ลบ.ม. และ เสริมเหล็ก DB10 @ 0.2 ม.

#### รูปที่ 2 รายละเอียดขนาดและการเสริมเหล็กเส้นของแผ่นพื้นตัวอย่าง

ซึ่ง ตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กเส้นมีระยะหุ้มเหล็ก 0.03 ม. และ ตัวอย่างทุกตัวมีปริมาณการใส่เส้นใยเหล็ก 40 กก./ลบ.ม. กำลังอัด 35 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน และทำการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 90 วัน โดย รายละเอียดตัวอย่างทดสอบทั้งหมด แสดงในรูปที่ 2 และตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบแผ่นพื้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก และแผ่นพื้นคอนกรีตที่ผสมทั้งเส้นใยเหล็กและเหล็กเส้น

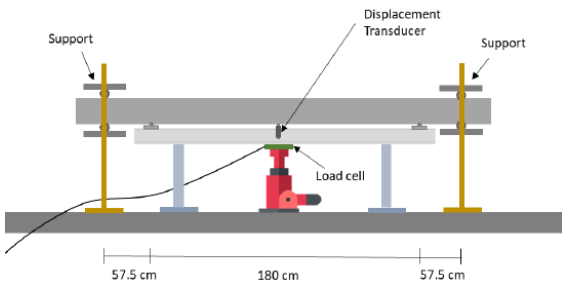
ตัวอย่าง	การเสริมกำลัง	ปริมาณเส้นใย (ร้อยละ โดยปริมาตรคอนกรีต)	กำลังรับแรงดึงของเส้นใยเหล็ก (เมกะปาสคาล)	ขนาดของตัวอย่างทดสอบ (ม.)
HE40	เส้นใยเหล็กแบบงอปลาย	1.67	1500	0.2x0.5x3.5
HE40@0.1	เส้นใยเหล็กแบบงอปลายและเหล็ก DB10@0.1 ม.	1.67	1500	0.2x0.5x3.5
HE40@0.2	เส้นใยเหล็กแบบงอปลายและเหล็ก DB10@0.2ม.	1.67	1500	0.2x0.5x3.5
DHE40	เส้นใยเหล็กแบบงอปลายสองหยัก	1.67	2000	0.2x0.5x3.5
DHE40@0.1	เส้นใยเหล็กแบบงอปลายสองหยักและเหล็ก DB10@0.1 ม.	1.67	2000	0.2x0.5x3.5
DHE40@0.2	เส้นใยเหล็กแบบงอปลายสองหยักและเหล็ก DB10@0.2ม.	1.67	2000	0.2x0.5x3.5
HE40T25	เส้นใยเหล็กแบบงอปลาย	1.67	1500	0.25x0.5x3.5
HE40T25@0.2	เส้นใยเหล็กแบบงอปลาย	1.67	1500	0.25x0.5x3.5

#### 3.2 การทดสอบ

การทดสอบเป็นการทดสอบหาความกว้างรอยร้าวระยะห่างระหว่างรอยร้าวของแผ่นพื้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กภายใต้แรงดัดแบบทางเดียว โดยใช้วิธีการทดสอบแบบดัดสี่จุด (Four Point Bending Test) และให้แรงที่ตำแหน่ง 0.575 ม. วัดเข้ามาจากฐานรองรับทั้งสองข้าง ให้แรงโดยใช้แม่แรงไฮดรอลิก และ เก็บข้อมูลความกว้างรอยร้าวโดยใช้ แถบวัดเทียบขนาดรอยร้าว (Crack Scale) และกล้องไมโครสโคป (Microscope) แสดงในรูปที่ 1 จากการทดสอบจะได้อัตราสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการแอ่นตัวที่บริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ (Load & Deflection) จากนั้นจะนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก โดยทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงดัดของแผ่น

พื้นตัวอย่างทดสอบกับค่าแรงดัดที่ได้จากการคำนวณจากชุดค่าสั่งในกรณีต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่ใช้เส้นใยเหล็กที่มีปริมาณต่างกัน กรณีที่มี

ร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดัดแบบทางเดียวของแต่ละตัวอย่างทดสอบกับค่าความกว้างรอยร้าวที่ได้จากการคำนวณจากชุดค่าสั่งเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความกว้างรอยร้าวที่ทำให้เกิดความกว้างรอยร้าวที่แตกต่างกันออกไป

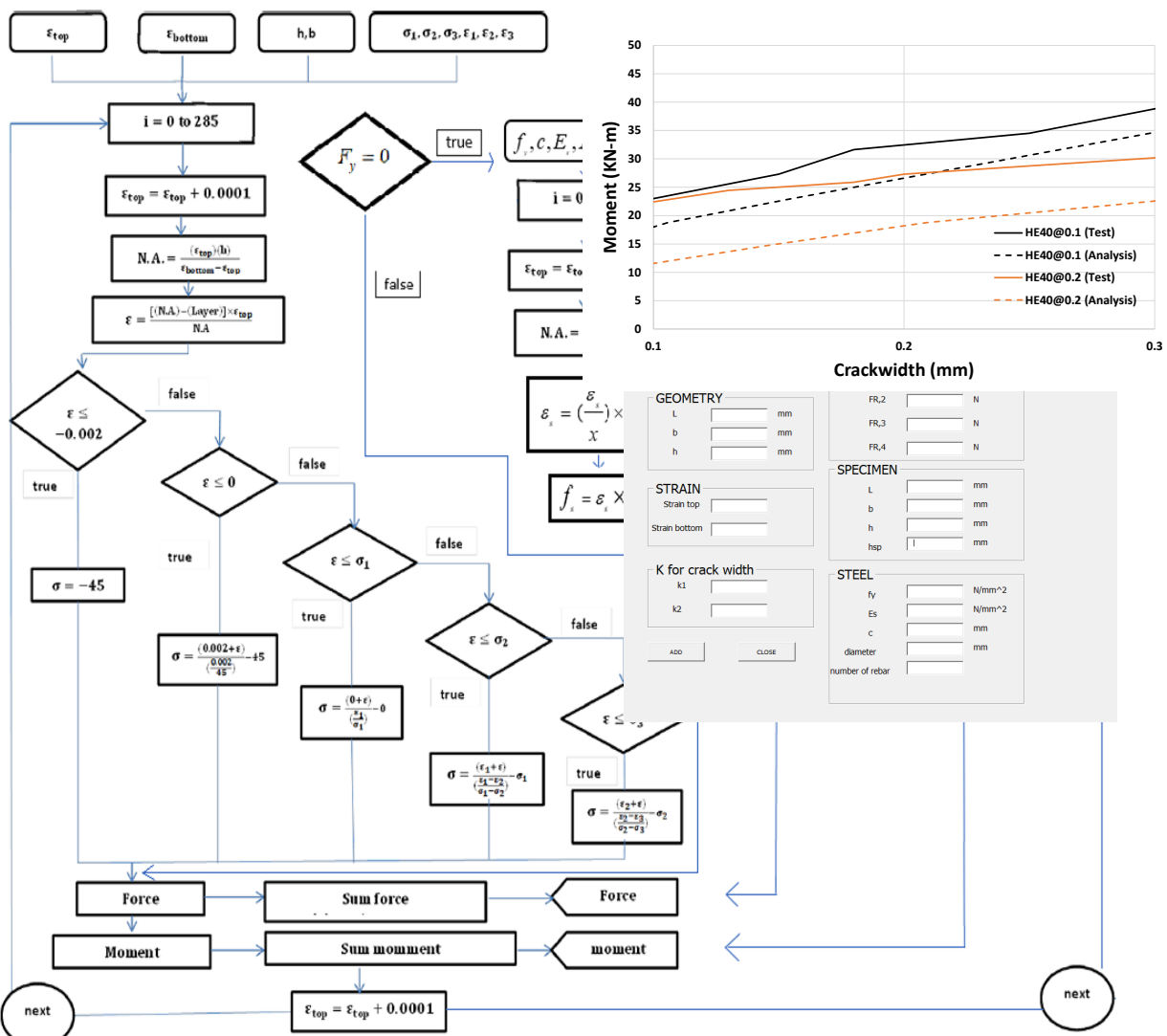


รูปที่ 3 การทดสอบแผ่นพื้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

ความหนาไม่เท่ากัน และ กรณีที่ตัวอย่างทดสอบมีปริมาณเหล็กเส้นไม่เท่ากัน เป็นต้น นอกจากนี้การทดสอบข้างต้นจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความกว้างรอยร้าวที่เกิดขึ้นที่แรงกระทำต่าง ๆ อีกด้วย ในการวิเคราะห์จะทำการเปลี่ยนแรงที่กระทำให้อยู่ในรูปของโมเมนต์ดัด และใช้ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความกว้างรอยร้าวที่เกิดขึ้นที่โมเมนต์

#### 4. การพัฒนาชุดค่าสั่ง

ในขั้นตอนการพัฒนาชุดค่าสั่งนั้นผู้ศึกษาเลือกที่จะพัฒนาชุดค่าสั่ง Visual Basic for Applications (VBA) บน Microsoft excel (ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในวงการวิศวกรรม) ให้มีคุณลักษณะที่ใช้งานได้ง่ายและคุ้นเคยเหมือนขั้นตอนการวิเคราะห์ โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบในรูปแบบป้อนตัวเลขเพื่อใช้วิเคราะห์คำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงสุดของโครงสร้างพื้น พร้อมทั้งคำนวณหาความกว้างรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด เมื่อได้ผลของค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงสุดของโครงสร้างพื้นและความกว้างรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด ก็จะนำมาแสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ โดยมี ขั้นตอนดังนี้ 1. การวิเคราะห์ (Analysis) เป็นขั้นตอนที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากก่อนที่จะพัฒนาชุดค่าสั่งได้ก็จะต้องวิเคราะห์รายละเอียดในรายการคำนวณ เพื่อนำมาเป็นรายละเอียดในการ



รูปที่ 4 ขั้นตอนการคำนวณหาค่ากำลังรับแรงดัดและแรงตามแนวแกนของคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมเส้นใยเหล็ก (row chart) ทำให้เห็น

ภาพรวมของการคำนวณวิเคราะห์ 2. การพัฒนา (Development) คือ ขั้นตอนการเขียนชุดคำสั่งด้วยภาษาคอมพิวเตอร์โดยเลือกใช้ภาษาและข้อมูลที่มีความเหมาะสมและงานต่อการปรับปรุงแก้ไขภายหลัง 3. การตรวจสอบ (Testing) เมื่อทำการพัฒนาชุดคำสั่งสำเร็จเรียบร้อยแล้วจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องพร้อมทั้งแก้ไขส่วนที่มีปัญหา ซึ่งหลังจากการตรวจสอบและแก้ไขชุดคำสั่งจนแล้วเสร็จทำให้เขียนชุดคำสั่งเป็นขั้นตอนได้ดังรูปที่ 4

รูปที่ 5 ตัวอย่างหน้ากรอกข้อมูลเพื่อคำนวณกำลังรับแรงดัดและแรงตามแนวแกน

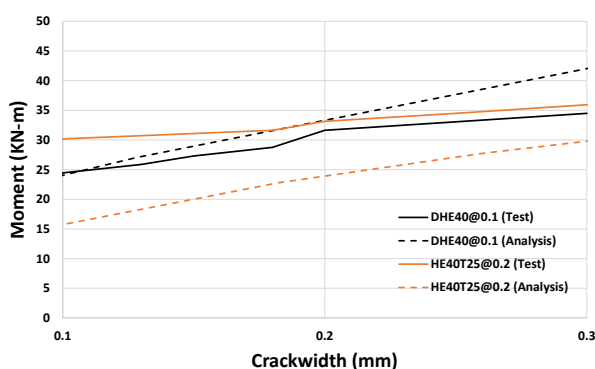
## 5. ผลการทดลอง

### 5.1 ผลการตรวจสอบชุดคำสั่ง

ในการตรวจสอบชุดคำสั่งทางผู้วิจัยได้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับความกว้างรอยร้าวของการทดสอบตัวอย่างข้างต้นเปรียบเทียบกับค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับความกว้างรอยร้าวที่ได้จากการคำนวณของชุดคำสั่งซึ่งได้จากผลการตรวจสอบของตัวอย่างทดสอบ HE40@0.1ม.พบว่า มีค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม. เป็น 38.81 กิโลนิวตัน-เมตร จากการคำนวณค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม.ของ HE40@0.1ม. เป็น 35.70 กิโลนิวตัน-เมตร ในส่วนของตัวอย่างทดสอบ HE40@0.2ม.พบว่า มีค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม. เป็น 30.19 กิโลนิวตัน-เมตร จากการคำนวณค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม.ของ HE40@0.2ม. เป็น 35.70 กิโลนิวตัน-เมตร 22.84 กิโลนิวตัน-เมตร ดังแสดงในรูปที่ 6

ผลการตรวจสอบของตัวอย่างทดสอบ DHE40@0.1ม.พบว่า มีค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม. เป็น 34.5 กิโลนิวตัน-เมตร จากการคำนวณค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม.ของ DHE40@0.1ม. เป็น 42.43 กิโลนิวตัน-เมตร ในส่วนของตัวอย่างทดสอบ HE40T25@0.2ม.พบว่า มีค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม. เป็น 35.94 กิโลนิวตัน-เมตร จากการคำนวณค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม.ของ HE40T25@0.2ม. เป็น 35.70 กิโลนิวตัน-เมตร 30.12 กิโลนิวตัน-เมตร ดังแสดงในรูปที่ 7

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความกว้างรอยร้าวที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน



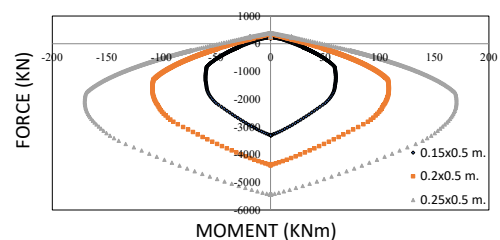
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความกว้างรอยร้าวที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน

จากการตรวจสอบชุดคำสั่งพบว่าค่าความกว้างรอยร้าวที่ได้จากการคำนวณด้วยชุดคำสั่งและค่าความกว้างรอยร้าวที่ได้จากผลการทดสอบมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือเมื่อความกว้างรอยร้าวมากขึ้นค่ากำลังรับแรงดัดก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามซึ่งค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม.ของการทดสอบและค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม.จากการคำนวณมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน

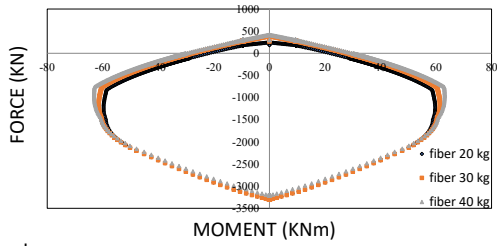
### 5.2 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสูงสุด

ผู้วิจัยได้นำชุดคำสั่งมาใช้วิเคราะห์กำลังรับแรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมความกว้างรอยร้าว โดยได้ทำการจำลองตัวอย่างไว้หลายกรณี โดยจะแบ่งเป็นความต่างของปริมาณเส้นใยเหล็ก, ความต่างของปริมาณเหล็กเสริม และความต่างของหน้าตัด การวิเคราะห์ช่วยให้สามารถตรวจสอบอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเส้น ความหนาของหน้าตัดคอนกรีต และปริมาณเส้นใยเหล็กซึ่งล้วนมีผลต่อความกว้างรอยร้าวที่จะเกิดขึ้นในหน้าตัดคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

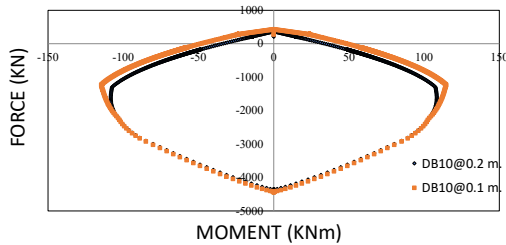
ในการวิเคราะห์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสูงสุดผู้วิจัยได้ทำการกำหนดกลุ่มตัวอย่างจำลองเป็นกลุ่มหลายกรณีได้แก่ กรณีของปริมาณเส้นใยเหล็ก 20, 30 และ 40 กก./ลบ.ม. โดยคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 0.83, 1.25 และ 1.67 โดยปริมาตรของคอนกรีตตามลำดับ กรณีปริมาณเหล็กเส้น 10DB@0.1ม. และ 10DB@0.2ม. สูดท้ายกรณีที่ขนาดหน้าตัด 0.15x0.5, 0.2x0.5 และ 0.25x0.5 ตร.ม. พบว่ากรณีของตัวอย่างจำลองที่มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 20 กก./ลบ.ม.หรือร้อยละ 0.83 โดยปริมาตรของคอนกรีต ที่หน้าตัดความลึก 0.15, 0.2 และ 0.25 ม. สามารถรับแรงดัดสูงสุดได้ 59.71, 108.35 และ 170.29 กิโลนิวตัน-เมตร ตามลำดับดังแสดงรูปที่ 8 ในกรณีที่มีการเปลี่ยนเส้นใยเหล็ก 20, 30 และ 40 กก./ลบ.ม.ขนาดหน้าตัดและมีการเสริมเส้นใยเหล็กคงที่เป็น 0.15x0.5 ตร.ม. DB10@0.2ม.พบว่าความสามารถในการรับแรงดัดสูงสุด 59.71, 61.45 และ 63.11 กิโลนิวตัน-เมตรดังแสดงรูปที่ 9 และในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเสริมขนาดหน้าตัดและปริมาณเส้นใยเหล็กคงที่โดยจำลองปริมาณเส้นใยเหล็กอยู่ที่ 30 กก./ลบ.ม.ขนาดหน้าตัดอยู่ที่ 0.2x0.5 ตร.ม.และจำลองปริมาณเหล็กเสริม 2แบบคือ DB10@0.1ม. และ DB10@0.2ม. พบว่าความสามารถในการรับแรงดัดสูงสุด 114.06 และ 123.38 กิโลนิวตัน-เมตรดังแสดงรูปที่ 10



รูปที่ 8 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสูงสุดกรณีที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กและปริมาณเหล็กเสริมคงที่



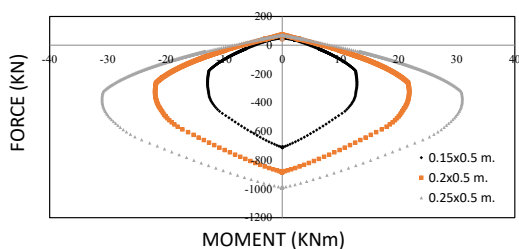
รูปที่ 9 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสูงสุดกรณีที่มีปริมาณเหล็กเสริมและหน้าตัดคงที่



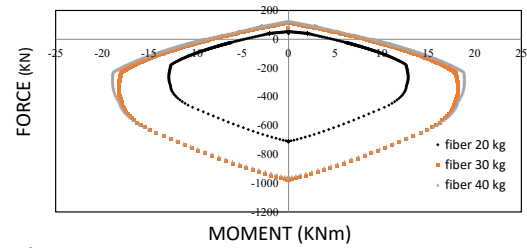
รูปที่ 10 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสูงสุดกรณีที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กและหน้าตัดคงที่

### 5.3 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมรอยร้าว

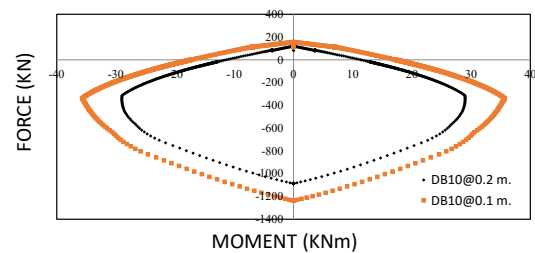
ในการวิเคราะห์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมรอยร้าว ผู้วิจัยใช้กลุ่มตัวอย่างจำลองเดียวกับหัวข้อ 5.2 จากการวิเคราะห์ผลกำลังรับแรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมความกว้างรอยร้าวของกรณีตัวอย่างจำลองปริมาณเส้นใยเหล็ก 20 กก./ลบ.ม. ของหน้าตัดที่มีความลึกต่างกันคือ 0.15, 0.2 และ 0.25 ม. มีความสามารถในการรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม. เป็น 12.85, 21.85 และ 30.98 กิโลนิวตัน-เมตร ตามลำดับดังแสดงรูปที่ 11 ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยเหล็กเป็น 20, 30 และ 40 กก./ลบ.ม. หรือร้อยละ 0.83, 1.25 และ 1.67 มีขนาดหน้าตัดและมีการเสริมเส้นใยเหล็กคงที่เป็น 0.15x0.5 ตร.ม. DB10@0.2m. พบว่าความสามารถในการรับแรงดัดสูงสุดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม. เป็น 12.85, 18.23 และ 18.89 กิโลนิวตัน-เมตรตามลำดับดังแสดงรูปที่ 12 และในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเสริมในขณะที่ขนาดหน้าตัดและปริมาณเส้นใยเหล็กคงที่โดยจำลองปริมาณเส้นใยเหล็กอยู่ที่ 30 กก./ลบ.ม. ขนาดหน้าตัดอยู่ที่ 0.2x0.5 ตร.ม. และจำลองปริมาณเหล็กเสริม 2 แบบคือ DB10@0.1m. และ DB10@0.2m. พบว่าความสามารถในการรับแรงดัดสูงสุดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม. เป็น 28.99 และ 35.7 กิโลนิวตัน-เมตรตามลำดับ ดังแสดงรูปที่ 13



รูปที่ 11 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมรอยร้าวกรณีที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กและปริมาณเหล็กเสริมคงที่



รูปที่ 12 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมรอยร้าวกรณีที่มีปริมาณเหล็กเสริมและหน้าตัดคงที่

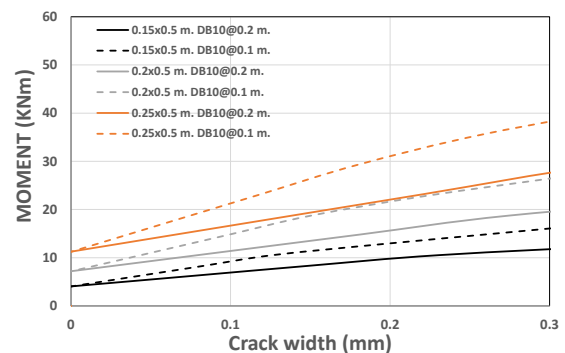
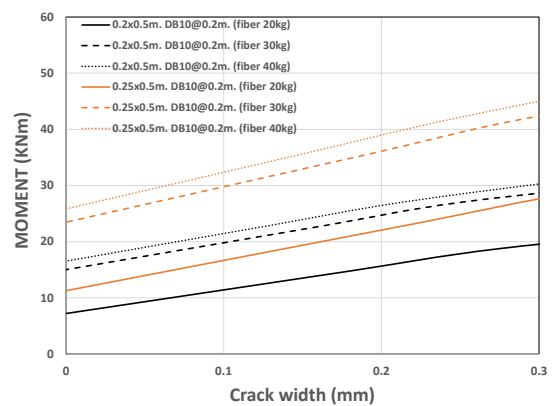


รูปที่ 13 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมรอยร้าวกรณีที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กและหน้าตัดคงที่

### 5.4 ความกว้างรอยร้าว

#### 5.4.1 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเส้นต่อความกว้างรอยร้าว

จากผลการวิเคราะห์แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมความกว้างรอยร้าวของตัวอย่างจำลองที่มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 20 กก./ลบ.ม. หรือร้อยละ 0.83 พบว่าตัวอย่างจำลองขนาดหน้า



ตัด 0.15x0.5 ตร.ม. กำลังอัด 45 เมกะปาสกาลมีค่าแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าวเท่ากับ 0.3 มม. เป็น 12.85 และ 17.63 กิโลนิวตัน-เมตร ในขณะที่ตัวอย่างจำลองขนาดหน้าตัด 0.2x0.5 และ 0.25x0.5 ตร.ม.มีค่าแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าวเท่ากับ 0.3 มม. เป็น 21.85, 30.01, 30.98 และ 43.28 กิโลนิวตัน-เมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 14 จะสังเกตเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณเหล็กเส้นมีแนวโน้มทำให้ความสามารถในการรับแรงดัดเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้ความกว้างรอยร้าวที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับ ณ ขณะที่แรงดัดเท่ากัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากที่ปริมาณเหล็กเส้นที่เพิ่มขึ้นมาสามารถช่วยรับแรงดัดได้ ทำให้ความกว้างรอยร้าวมีขนาดเล็กลง

**รูปที่ 14** ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความกว้างรอยร้าวของกรณี

ตัวอย่างจำลองที่มีปริมาณเหล็กเส้นไม่เท่ากัน

โดยหากเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดที่ 20 กิโลนิวตัน-เมตร ของกรณีตัวอย่าง 0.2x0.5ม. DB10@0.2ม. กับ 0.2x0.5ม. DB10@0.1ม. จะเห็นได้ว่าของตัวอย่างแรกที่โมเมนต์ดัด 20 กิโลนิวตัน-เมตรมีความกว้างรอยร้าวอยู่ที่ 0.29 มม. ในกรณีตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กเส้นมากกว่ามีความกว้างรอยร้าว อยู่ที่ 0.18 มม. โดยความกว้างรอยร้าวลดลงไป 0.11 มม.

#### 5.4.2 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยเหล็กต่อความกว้างรอยร้าว

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างจำลองที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กต่างกัน 3 ขนาดคือ 20,30 และ40 กก./ลบ.ม.หรือหรือร้อยละ 0.83, 1.25 และ 1.67 จากรูปที่ 15 จะเห็นได้ว่าผลของการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กนั้นสามารถช่วยลดความกว้างรอยร้าวได้ ณ ที่แรงดัดเท่ากัน ในการเปรียบเทียบที่แรงดัดของกรณีตัวอย่างหน้าตัดลึก 200 มม. กำลังอัด 45 เมกะปาสกาลพบว่าที่แรงดัด 20 กิโลนิวตัน-เมตร ตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 20 กก./ลบ.ม. มีขนาดความกว้างรอยร้าว 0.29 มม. ในขณะที่ ตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 30 และ 40 กก./ลบ.ม. มีขนาดความกว้างรอยร้าวอยู่ที่ 0.1 และ 0.08 มม. โดยความกว้างรอยร้าวลดลงไปถึง 0.19 และ 0.21 ตามลำดับในตัวอย่างที่ขนาดความลึก 250 มม.พบว่าที่แรงดัด 30 กิโลนิวตัน-เมตร ตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 20 กก./ลบ.ม.มีขนาดความกว้างรอยร้าวที่ 0.33 มม.แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กไปที่ 30 และ 40 กก./ลบ.ม. พบว่าขนาดความกว้างรอยร้าวลดลงเหลือ 0.1 และ0.07 มม. ลดไปถึง 0.23 และ 0.26 มม. ตามลำดับ

**รูปที่ 15** ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความกว้างรอยร้าวของกรณี

ตัวอย่างจำลองที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กไม่เท่ากัน

#### 5.4.3 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกของหน้าตัดต่อความกว้างรอยร้าว

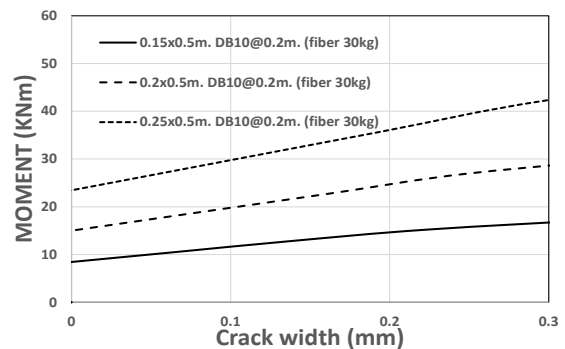
จากผลการวิเคราะห์แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมความกว้างรอยร้าวของตัวอย่างจำลองที่มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 30 กก./ลบ.ม.หรือร้อยละ 1.25 กำลังอัด 45 เมกะปาสกาลมีขนาดความลึก 150 200 และ 250 มม. ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและความกว้างรอยจากรูปที่ 16 จะสังเกตเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดความ

ลึกของหน้าตัดนั้นช่วยให้ตัวโครงสร้างสามารถรับแรงดัดได้มากขึ้นซึ่งหมายความว่า การเพิ่มขนาดหน้าตัดของคอนกรีตยังสามารถช่วยลดขนาดความกว้างรอยร้าวได้ จากการเปรียบเทียบของหน้าตัดความลึกที่ 200 มม. กับ 250 มม. ที่แรงดัด 30 กิโลนิวตัน-เมตร พบว่าที่หน้าตัดความลึก 200 มม. มีความกว้างรอยร้าว 0.32 มม. แต่ของหน้าตัดความลึก 250 มม. มีความกว้างรอยร้าว 0.1 มม. การเพิ่มขนาดความลึกของหน้าตัด 50 มม. ช่วยลดความกว้างรอยร้าวถึง 0.22 มม.

## 6. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบหาความกว้างรอยร้าวระยะห่างระหว่างรอยร้าวของแผ่นพื้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กภายใต้แรงดัดแบบทางเดียว โดยใช้วิธีการทดสอบแบบดัดสี่จุด เพื่อเปรียบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของตัวชุดค่าสั่งที่พัฒนาขึ้น พบว่าชุดค่าสั่งมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 14.9 เปอร์เซ็นต์

ในการวิเคราะห์แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับ **รูปที่ 16** ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความกว้างรอยร้าวของกรณีตัวอย่างจำลองที่มีขนาดความลึกไม่เท่ากัน



แนวแกนได้ 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงดัดและแรงตามแนวแกนสูงสุด

การเพิ่มขนาดความลึกของหน้าตัด ปริมาณเส้นใยเหล็ก และปริมาณเหล็กเสริมคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการผสมเส้นใยเหล็กมีผลช่วยให้ขนาดความกว้างรอยร้าวมีขนาดเล็กลง โดยผลของการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กมีผลช่วยให้ขนาดความกว้างของรอยร้าวมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับที่แรงดัดเท่ากัน แต่ในการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กยังมีข้อควรระวัง เนื่องจากปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ความกว้างรอยร้าวมีขนาดเล็กลงจริงแต่ปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้นจะเข้าไปแทนที่เนื้อคอนกรีตทำให้ปริมาณเนื้อคอนกรีตมีน้อยลงซึ่งจะส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลงเพราะปริมาณเนื้อคอนกรีตที่ลดลงส่งผลโดยตรงต่อกำลังรับแรงอัด การเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเส้นส่งผลต่อขนาดความกว้างรอยร่วมน้อยที่สุด ทั้งนี้เป็นเพราะพฤติกรรมหลังการเกิดแตกร้าวของเหล็กเสริมนั้นแตกต่างกับเส้นใยเหล็กเมื่อเกิดการแตกร้าวเส้นใยเหล็กที่กระจายตัวอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีตสามารถช่วยรับแรงดัดต่อได้และช่วยยึดรั้งให้รอยแตกร้าวขยายตัวช้าลงแม้ว่าจะมีเส้นใยเหล็กบางเส้นรับแรงดัดจนขาดแต่ในกรณีของเหล็กเส้นนั้นเมื่อเหล็กเส้นรับแรงดัดจนเหล็กเส้นขาดออกจากกันแล้วทำให้

ความสามารถในการยึดรั้งรอยร้าวลดลงส่งผลให้ความกว้างรอยร้าวขยายตัวมากกว่าของกรณีเส้นใยเหล็ก

### กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.รักติพงษ์ สหมิตรมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำในการดำเนินการพัฒนาโปรแกรม และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการทดสอบ

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Kelpša, Š., Augonis, M., Daukšys, M. and Augonis, A., 2014, “Analysis of Crack Width Calculation of Steel Fibre and Ordinary Reinforced Concrete Flexural Members.”, *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering.*, Vol. 16, pp. 50–57.
- [2] Löfgren I., 2007, “Calculation of crack width and crack spacing.”, *Presented at Nordic Mini-Seminar: Fibre reinforced concrete*, November 15, Trondheim, Norway, 12 pp.
- [3] BS EN 1992-1-1, 2004, *Eurocode 2 Design of concrete structures - Part 1-1 General rules and rules for buildings*, British Standards Institution, London, pp. 118-126.
- [4] The Concrete Society, 2007, *Guidance for the Design of Steel Fiber Reinforced Concrete*, Technical Report 63, A cement and concrete industry publication, Camberley, pp. 20-44.
- [5] RILEM TC 162-TDF, 2003, “Test and design methods for steel fibre reinforced concrete.”, *Materials and Structure*, Vol. 36, pp. 560–567.
- [6] Löfgren, I., 2005, *Fiber-Reinforced Concrete for Industrial Construction-A Fracture Mechanics Approach to Material Testing and Structural Analysis.*, Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, pp. 87-96.
- [7] เกษมท กานต์งามสอน, ปิยธิดา โปธิเกษม, กิตติศักดิ์ สีลาอัมพรสิน, บวรทัต รัตนจีน และ รักติพงษ์ สหมิตรมงคล (2564). พฤติกรรมและความกว้างรอยร้าวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กภายใต้แรงดัดแบบทางเดียว. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26*, การประชุมรูปแบบออนไลน์, วันที่ 23-25 มิถุนายน 2564, หน้า BTL-02.
- [8] ผศ.ดร.ทวีชัย สำราญวานิช (2559). กำลังและความคงทนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กภายใต้การทำลายของเกลือคลอไรด์, หน้า 3-24.