

การวิเคราะห์คานคองกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคองกรีตเสริมเส้นใย  
ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2560  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

THE FINITE ELEMENT ANALYSIS OF SHEAR-STRENGTHENED REINFORCED  
CONCRETE BEAMS BY FRC PANELS

Mr. Theethawachr Koyekaewphring



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์               | การวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรง<br>เฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ |
| โดย                             | นายธีร์รัช โภยแก้วพริ้ง  |
| สาขาวิชา                        | วิศวกรรมโยธา   |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล   |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จรูญ รุ่งอมรรัตน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สายันต์ ศิริมนตรี)

ธีรวัช โภยแก้วพริ้ง : การวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (THE FINITE ELEMENT ANALYSIS OF SHEAR-STRENGTHENED REINFORCED CONCRETE BEAMS BY FRC PANELS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.พิชชา จงวิวัฒน์สกุล, หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กโดยการวิเคราะห์ตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนโดยใช้อิพอกซีและสลักเกลียวเพื่อยึดแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กด้านข้างคานทั้งสองด้าน จากนั้นวิเคราะห์ตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และเปรียบเทียบการวิเคราะห์กับผลการทดลองจากงานวิจัยในอดีต จากผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองสามารถให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของคานได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด 6% เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองแล้วจึงทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ได้แก่ ความหนาของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก กำลังรับแรงอัดของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ค่าพลังงานการแตกหัก ( $G_f$ ) ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก จำนวนสลักเกลียว และการจัดเรียงตัวของสลักเกลียว แล้วเปรียบเทียบผลกับคานคอนกรีตที่ไม่ได้เสริมกำลัง จากการวิเคราะห์พบว่า การเสริมกำลังด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กที่มีความหนา 10 15 และ 20 มิลลิเมตร ทำให้คานสามารถรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น 101% 106% และ 110% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก พบว่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น 87% 101% และ 104% เมื่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 50 70 และ 90 MPa ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่าเมื่อแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยมีค่า  $G_f$  เท่ากับ 4.04 8.82 และ 9.66 N/mm สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน 100% 101% และ 106% เมื่อเทียบกับคานคอนกรีตที่ไม่ได้เสริมกำลัง ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบจำนวนสลักเกลียว พบว่าการใช้สลักเกลียวจำนวน 4 6 8 และ 10 สลักเกลียว ทำให้กำลังรับแรงเฉือนมีค่าสูงขึ้น 71% 88% 101% และ 92% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการจัดเรียงตัวของสลักเกลียว พบว่าการจัดเรียงตัวสลักเกลียวแบบสมมาตรทำให้คานรับแรงเฉือนได้น้อยกว่าการจัดเรียงตัวของสลักเกลียวแบบทแยง

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2560

# # 5770552621 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: FIBER REINFORCED CONCRETE / STRENGTHENING / FINITE ELEMENT ANALYSIS / RC BEAM

THEETHAWACHR KOYEKAEWPHRING: THE FINITE ELEMENT ANALYSIS OF SHEAR-STRENGTHENED REINFORCED CONCRETE BEAMS BY FRC PANELS. ADVISOR: ASST. PROF. PITCHA JONGVIVATSAKUL, Ph.D., pp.

This study aims to investigate the shear behavior of reinforced concrete beams strengthened by precast steel fiber reinforced concrete (FRC) panels using finite element analysis. RC beams strengthened by FRC panels at both side of the beams were modeled. The connections between RC beam and FRC panels are epoxy and bolts with epoxy. The results of existing experimental work were used to validate the model. The results showed that the analytical shear capacity of nine RC beams corresponded with the experimental results. Maximum variation between analytical results and experimental results of strengthened RC beam was 6%. After that, the parametric study was conducted. The effects of various parameters which are thickness of panels, compressive strength of FRC panels, fracture energy ( $G_f$ ) of FRC panels, number of bolts per panels, bolt pattern on shear capacity were studied. The shear capacity of strengthened RC beams was compared with non-strengthened RC beam. The results showed that the shear capacity of RC beams increased 101%, 106% and 110% when RC beams were strengthened by 10-mm, 15-mm and 20-mm thick FRC panels, respectively. The shear capacity of RC beams increased 87%, 101% and 104% when the compressive strength become 50, 70 and 90 MPa. When the values of fracture energy were 4.04, 8.82 and 9.66 N/mm, shear capacity of RC beams enhanced 100%, 101% and 106%, respectively. The increase of number of bolts to 4, 6, 8 and 10 bolts produced 71%, 88%, 101% and 92% higher shear capacity than that of non-strengthened RC beam. The diagonal bolt configuration provided higher shear capacity than symmetry bolt configuration.

Department: Civil Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2017

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชชา จองวิวัฒน์สกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาให้ความรู้ คำปรึกษา และคำแนะนำต่างๆในการทำวิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.จรรุญ รุ่งอมรรัตน์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข รองศาสตราจารย์ ดร. สายันต์ ศิริมนตรี ที่ให้ความรู้ให้ข้อเสนอแนะ และคำแนะนำต่างๆ เพื่อใช้ในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่น้องและผองเพื่อนทุกคน ได้แก่ ชนะชัย ทองโฉม ทศพล ประเสริฐศรี วีระยา ปัญญาสรเสริญ ณัฐดนัย อมรปฏิเวธ และคนอื่นๆ ที่ให้ข้อคิดและคำแนะนำต่างๆในระหว่างระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ นาย กิตติพจน์ โกยแก้วพริ้ง นาง เหมยญู โกยแก้วพริ้ง ที่ให้ความอุปการะ และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าเสมอมา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                     | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ฉ    |
| สารบัญ.....   | ช    |
| สารบัญตาราง.....  | ก    |
| สารบัญรูป.....  | ข    |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....                  | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....                            | 2    |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....                                     | 2    |
| 1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....                              | 2    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง.....            | 3    |
| 2.1 คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก.....                            | 3    |
| 2.1.1 คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก.....              | 3    |
| 2.1.1.1 แบบจำลองพฤติกรรมรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย..... | 3    |
| 2.1.1.2 แบบจำลองพฤติกรรมรับแรงดึงของคอนกรีตเสริมเส้นใย..... | 7    |
| 2.1.1.3 โมดูลัสความยืดหยุ่น.....                            | 11   |
| 2.1.1.4 อัตราส่วนปัวซอง.....                                | 11   |
| 2.2 การวิเคราะห์ตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....          | 11   |
| 2.2.1 ขนาดเอลิเมนต์.....                                    | 11   |
| 2.2.2 แบบจำลองความเสียหายของคอนกรีต.....                    | 12   |
| 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                              | 13   |

|  |    |
|--|----|
| 2.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก [20] และ [21] ..... | 13 |
| 2.3.2 การวิเคราะห์และทำนายกำลังคานคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก .....  | 17 |
| 2.3.2.1 Özcan et al [17].....  | 17 |
| 2.3.2.2 Padmarajaiah and Ramaswamy [18].....   | 19 |
| 2.3.2.3 Hu et al. [27] .....   | 22 |
| บทที่ 3 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก .....  | 23 |
| 3.1 ขนาดของแบบจำลอง.....   | 23 |
| 3.1.1 ขนาดคานของงานวิจัยในอดีต [20] และ [21] .....   | 23 |
| 3.1.2 ขนาดแบบจำลอง.....  | 27 |
| 3.2 แบบจำลองวัสดุ.....   | 31 |
| 3.2.1 แบบจำลองชิ้นส่วนคอนกรีต.....   | 31 |
| 3.2.2 แบบจำลองชิ้นส่วนเหล็ก .....  | 33 |
| 3.2.3 แบบจำลองชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก .....  | 34 |
| 3.2.4 แบบจำลองของรอยต่อ.....   | 35 |
| 3.2.5 แบบจำลองสลักเกลียว .....   | 36 |
| 3.3 ขนาดของเอลิเมนต์ .....   | 37 |
| 3.4 เงื่อนไขขอบเขต.....  | 38 |
| 3.5 คุณสมบัติของวัสดุ.....   | 38 |
| 3.5.1 คุณสมบัติของคอนกรีต.....   | 38 |
| 3.5.1.1 คุณสมบัติการรับแรงอัดของคอนกรีต .....  | 39 |
| 3.5.1.2 คุณสมบัติการรับแรงดึงของคอนกรีต.....   | 40 |
| 3.5.2 คุณสมบัติของเหล็ก .....  | 41 |

|  |    |
|--|----|
| 3.5.3 คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก .....                                  | 41 |
| 3.5.3.1 คุณสมบัติการรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก .....                    | 42 |
| 3.5.3.2 คุณสมบัติการรับแรงดึงของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก .....                    | 44 |
| 3.5.4 คุณสมบัติของสลักเกลียว.....  | 46 |
| 3.5.5 คุณสมบัติของรอยต่อ.....  | 46 |
| บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของคานตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....          | 48 |
| 4.1 การเปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวของคาน .....                          | 48 |
| 4.2 การเปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึง DB25 .....     | 52 |
| 4.3 การเปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน RB6 .....    | 55 |
| 4.4 การเปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกของคานตัวอย่างในอดีตและคานจำลอง .....              | 58 |
| 4.5 ความแม่นยำของแบบจำลอง .....  | 59 |
| บทที่ 5 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรออกแบบ.....                                      | 61 |
| 5.1 ตัวแปรที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักกระทำของคาน.....                              | 61 |
| 5.2 อิทธิพลของความหนาของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก .....                        | 62 |
| 5.3 อิทธิพลของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก .....                     | 65 |
| 5.4 อิทธิพลของค่า Fracture Energy ( $G_f$ ) ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ..... | 68 |
| 5.5 อิทธิพลของจำนวนสลักเกลียว .....  | 70 |
| 5.6 อิทธิพลของการจัดเรียงสลักเกลียว .....  | 75 |
| บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....   | 79 |
| 6.1 สรุปผลการวิจัย .....   | 79 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ .....   | 80 |
| รายการอ้างอิง.....   | 81 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....   | 85 |

## สารบัญตาราง

|  |    |
|--|----|
| ตาราง 2.1 สมการและตัวแปรของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก .....                             | 5  |
| ตาราง 2.2 สมการและตัวแปรในการคำนวณกำลังของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก.....               | 8  |
| ตาราง 2.3 คานคอนกรีตที่ทดสอบ [20] และ [21] .....                                     | 13 |
| ตาราง 2.4 ผลการทดลอง [20] และ [21].....  | 16 |
| ตาราง 2.5 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองของ Fully prestressed [18].....          | 20 |
| ตาราง 2.6 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองของ Partially prestressed [18] .....     | 21 |
| ตาราง 3.1 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คาน B1 ที่ขนาดเอลิเมนต์ต่าง ๆ.....                | 37 |
| ตาราง 3.2 ตารางคุณสมบัติของคอนกรีต.....  | 39 |
| ตาราง 3.3 ตารางคุณสมบัติของเหล็ก .....   | 41 |
| ตาราง 3.4 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก .....  | 44 |
| ตาราง 3.5 คุณสมบัติการรับแรงดึงของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กในการจำลอง .....            | 45 |
| ตาราง 3.6 คุณสมบัติสลักเกลียวที่ใช้ในการจำลอง .....                                  | 46 |
| ตาราง 3.7 คุณสมบัติแรงยึดเหนี่ยวของฮิลทิจี (Hilti).....                              | 47 |
| ตาราง 4.1 ตารางเปรียบเทียบผลการทดลอง [20] และ [21] กับผลการวิเคราะห์.....            | 49 |
| ตาราง 4.2 เปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกของคานตัวอย่างในอดีต [20] และ [21] และคานจำลอง...60 | 60 |
| ตาราง 5.1 รายละเอียดคานที่วิเคราะห์.....   | 61 |
| ตาราง 5.2 ผลการวิเคราะห์ของการศึกษาเชิงตัวแปร (Parametric study) .....               | 62 |
| ตาราง 5.3 เปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกตามความหนาของแผ่น SFRC.....                         | 65 |
| ตาราง 5.4 เปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกของคานจำลองตามกำลังรับแรงอัดแผ่น SFRC .....         | 67 |
| ตาราง 5.5 เปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกของคานตามค่า $G_f$ .....                            | 70 |
| ตาราง 5.6 เปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกของคานจำลอง .....                                   | 74 |
| ตาราง 5.7 เปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกของคานจำลอง .....                                   | 78 |

## สารบัญรูป

|   |    |
|---|----|
| รูป 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นของคอนกรีตเสริมเส้นใยตามประเภทของเส้นใย [2] .....       | 3  |
| รูป 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียด ( $\times 10^{-6}$ ) [3].....                       | 4  |
| รูป 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้น [7] .....  | 5  |
| รูป 2.4 เปรียบเทียบอัตราการเสริมเส้นใยเหล็กและกำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้น [3].....                          | 7  |
| รูป 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก [8].....                     | 7  |
| รูป 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก [9].....                     | 8  |
| รูป 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กของ fib. Model Code [10]..... | 8  |
| รูป 2.8 ผลการทดลองในอดีต [11] .....   | 10 |
| รูป 2.9 ผลการทดลองในอดีต [11] .....   | 10 |
| รูป 2.10 หน้าตัดคานคอนกรีตในการทดลอง [20].....  | 14 |
| รูป 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัว [20] และ [21] .....  | 15 |
| รูป 2.12 การรับแรงและจุดรองรับของคานเสริมเหล็กเสริมเส้นใยเหล็ก [17].....                                | 17 |
| รูป 2.13 ลักษณะคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมเส้นใยเหล็กในการทดลอง [17] .....                                | 17 |
| รูป 2.14 ขนาดคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมเส้นใยเหล็กในการจำลอง [17].....                                   | 18 |
| รูป 2.15 การวิบัติของคอนกรีตเมื่อรับแรงสามแกน [17].....   | 18 |
| รูป 2.16 เปรียบเทียบแรงและการแอ่นตัวจากการทดลองและผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS [17] .....             | 18 |
| รูป 2.17 การเปรียบเทียบรอยแตกระหว่างคานตัวอย่างทดสอบและคานจำลองในโปรแกรม [17]...                        | 19 |
| รูป 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างคอนกรีตและเส้นใย [18] .....   | 20 |
| รูป 2.19 ลักษณะการจำลองสลักเกรียวและการแบ่ง Mesh [27].....  | 22 |
| รูป 3.1 ขนาดคานที่ทดสอบ [20] .....  | 23 |
| รูป 3.2 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 1 [20].....  | 24 |
| รูป 3.3 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 2 [20].....  | 24 |
| รูป 3.4 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 3 [20].....  | 24 |
| รูป 3.5 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 4 [20].....  | 25 |
| รูป 3.6 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 5 [21].....  | 25 |
| รูป 3.7 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 6 [21].....  | 25 |

|   |    |
|---|----|
| รูป 3.8 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 7 [21].....  | 26 |
| รูป 3.9 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 8 [21].....  | 26 |
| รูป 3.10 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 9 [21].....   | 26 |
| รูป 3.11 ลักษณะคาน B1 ในการจำลอง.....   | 27 |
| รูป 3.12 ลักษณะคาน B2 ในการจำลอง.....   | 27 |
| รูป 3.13 ลักษณะคาน B3 ในการจำลอง.....   | 28 |
| รูป 3.14 ลักษณะคาน B4 ในการจำลอง.....   | 28 |
| รูป 3.15 ลักษณะคาน B5 ในการจำลอง.....   | 29 |
| รูป 3.16 ลักษณะคาน B6 ในการจำลอง.....   | 29 |
| รูป 3.17 ลักษณะคาน B7 ในการจำลอง.....   | 30 |
| รูป 3.18 ลักษณะคาน B8 ในการจำลอง.....   | 30 |
| รูป 3.19 ลักษณะคาน B9 ในการจำลอง.....   | 31 |
| รูป 3.20 Hexahedra Elements (C3D8R).....  | 31 |
| รูป 3.21 ลักษณะคานคอนกรีตในการจำลอง.....  | 32 |
| รูป 3.22 ลักษณะคานคอนกรีตในการจำลองเมื่อยึดติดแบบมีสลักเกลียว.....  | 32 |
| รูป 3.23 การเสียรูปของคอนกรีตในระนาบของความเครียด Mohr-Coulomb.....                                       | 33 |
| รูป 3.24 2 Node linear truss elements (T3D2).....   | 33 |
| รูป 3.25 เหล็กเสริมในแบบจำลอง.....  | 34 |
| รูป 3.26 ลักษณะการเคลื่อนตัวของ geometric tolerance.....  | 34 |
| รูป 3.27 ลักษณะแบบจำลองชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก.....   | 35 |
| รูป 3.28 ลักษณะแบบจำลองชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กเมื่อยึดติดแบบมีสลักเกลียว.....                     | 35 |
| รูป 3.29 ชนิดรอยต่อในการจำลอง.....  | 36 |
| รูป 3.30 ลักษณะรอยต่อในการจำลอง.....  | 36 |
| รูป 3.31 ลักษณะสลักเกลียวในการจำลอง.....  | 36 |
| รูป 3.32 อิทธิพลของขนาดเอลิเมนต์ต่อผลการวิเคราะห์กำลังของคาน B1.....                                      | 37 |
| รูป 3.33 เงื่อนไขขอบเขตในการจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใย..... | 38 |
| รูป 3.34 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของหน่วยแรงอัดในแบบจำลอง [28].....                           | 39 |
| รูป 3.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตในการวิเคราะห์.....                            | 40 |
| รูป 3.36 คุณสมบัติในการรับแรงดึงของคอนกรีต [29].....  | 40 |
| รูป 3.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในแรงอัดและแรงดึง.....                                   | 41 |

|  |    |
|--|----|
| รูป 3.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้น [7].....   | 42 |
| รูป 3.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กในการ<br>วิเคราะห์..... | 43 |
| รูป 3.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้น .....  | 44 |
| รูป 3.41 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการแตกหักและระยะรอยแตก .....                                    | 44 |
| รูป 4.1 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและค่าโก่งตัวของคาน B1 ถึง B9 .....                                 | 52 |
| รูป 4.2 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก DB25 ของคาน B1 ถึง B9 .....                   | 55 |
| รูป 4.3 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก RB6 ของคาน B1 ถึง B9 .....                    | 58 |
| รูป 5.1 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและค่าโก่งตัวตามความหนาของแผ่น SFRC.....                            | 63 |
| รูป 5.2 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก DB25 ตามความหนาของแผ่น SFRC<br>.....          | 64 |
| รูป 5.3 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก RB6 ตามความหนาของแผ่น SFRC.                   | 64 |
| รูป 5.4 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและค่าโก่งตัวของคานตามกำลังรับแรงอัดแผ่น SFRC.....                  | 66 |
| รูป 5.5 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดเหล็ก DB25 ตามกำลังรับแรงอัดแผ่น SFRC ...              | 66 |
| รูป 5.6 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดเหล็ก RB6 ตามกำลังรับแรงอัดแผ่น SFRC.....              | 67 |
| รูป 5.7 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและค่าโก่งตัวของคานตามค่า $G_f$ .....                               | 68 |
| รูป 5.8 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก DB25 ของคานคานตามค่า $G_f$ .....              | 69 |
| รูป 5.9 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก RB6 คานตามค่า $G_f$ .....                     | 69 |
| รูป 5.10 คานจำลองสลักเกลียวจำนวน 4 สลักเกลียว (BP7).....   | 71 |
| รูป 5.11 คานจำลองสลักเกลียวจำนวน 10 สลักเกลียว (BP8) .....   | 71 |
| รูป 5.12 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและค่าโก่งตัวของคาน .....  | 72 |
| รูป 5.13 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก DB25 ของคาน .....                            | 73 |
| รูป 5.14 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก RB6.....                                     | 73 |
| รูป 5.15 ความเครียดในสลักเกลียวคาน.....  | 74 |
| รูป 5.16 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 8 [20].....  | 75 |
| รูป 5.17 คานจำลองรูปแบบสลักเกลียว 4 สลักเกลียว (BP7).....  | 76 |
| รูป 5.18 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและค่าโก่งตัวของคาน .....  | 76 |
| รูป 5.19 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก DB25 ของคาน .....                            | 77 |
| รูป 5.20 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก RB6.....                                     | 77 |
| รูป 5.21 ความเครียดในสลักเกลียวของคาน BP7 และคาน B8.....   | 78 |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในอดีตที่ผ่านมามีการใช้คอนกรีตในการก่อสร้างกันอย่างแพร่หลายแต่ด้วยธรรมชาติของคอนกรีตมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเปราะที่รับกำลังดึงได้น้อยทำให้โครงสร้างหรือชิ้นส่วนของโครงสร้างที่สร้างมาจากคอนกรีตมีปัญหาเมื่อชิ้นส่วนของโครงสร้างนั้นรับแรงดึง ดังนั้นการเสริมเส้นใยจึงเป็นการช่วยแก้ปัญหาในการรับกำลังดึงของคอนกรีต การเสริมเส้นใยในคอนกรีตไม่ได้เพิ่มกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเท่านั้นแต่ยังเป็นการควบคุมรอยแตกของคอนกรีตด้วย โดยเส้นใยจะเป็นตัวเหนี่ยวรั้งรอยแตกทำให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนที่ผิวหน้าของรอยแตกมีค่าสูงขึ้นและเพิ่มความเหนียวของวัสดุและช่วยในเรื่องพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีต เส้นใยที่ใช้เสริมในคอนกรีตมีหลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น เส้นใยหิน เส้นใยแก้ว เส้นใยเซรามิก เส้นใยเหล็ก เส้นใยสังเคราะห์ และเส้นใยธรรมชาติ โดยการเสริมเส้นใยเหล็กในคอนกรีตนั้นเริ่มมาตั้งแต่ปี 1960 ในอดีตที่ผ่านมามีผลการทดลองและงานวิจัยทางทฤษฎีมากมายเกี่ยวกับความสามารถในการรับแรงเฉือนของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กที่สามารถยืนยันได้ว่าการเสริมเส้นใยเหล็กในคอนกรีตสามารถเพิ่มกำลังในการรับแรงดึงของคอนกรีตทั้งก่อนและหลังการเกิดรอยแตก

คอนกรีตเสริมเส้นใยมีความหลากหลายในการใช้งานไม่ว่าจะเป็นการซ่อมแซมหรือการเสริมกำลังให้กับชิ้นส่วนของโครงสร้าง เช่น พื้น คาน และ กำแพง ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการเสริมกำลังของคานโดยใช้แผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กหล่อสำเร็จเป็นตัวเพิ่มกำลัง การเสริมกำลังด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กนั้นทำได้หลายวิธี เช่น การทาปูนกาวเพื่อเชื่อมระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กและแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก เป็นต้น ในอดีตที่ผ่านมามีการใช้งานแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยหลายวิธีดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่งานวิจัยยังมีอยู่อย่างจำกัด จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตพบว่าการคาดการณ์กำลังของชิ้นส่วนโครงสร้างหลังการเสริมกำลังสามารถทำได้หลายวิธี อาทิ การคาดการณ์ด้วยตัวเลข หรือการใช้โปรแกรมจำลองชิ้นส่วนของโครงสร้างที่ถูกเสริมกำลังเพื่อทำนายกำลังของชิ้นส่วนโครงสร้าง แต่ความถูกต้องของการคาดการณ์นั้นยังไม่สูงมากนักเพราะเป็นการยากที่จะคาดการณ์พฤติกรรมการถ่ายแรงที่พื้นผิวของรอยแตกและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับคอนกรีตโดยรอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (ABAQUS) ช่วยในการจำลองชิ้นส่วนของคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กเพื่อวิเคราะห์กำลังของคานคอนกรีตหลังจากการเสริมกำลัง โดยได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดลองจากงานวิจัยในอดีต เพื่อตรวจสอบความ



ถูกต้องของการวิเคราะห์ จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์กำลังรับแรงของคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กเพิ่มเติมเพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรออกแบบอื่นๆ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. วิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. ศึกษาผลกระทบของตัวแปรออกแบบที่มีผลต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตการวิจัยมีดังนี้

1. งานวิจัยนี้ไม่คำนวณถึงผลจากการแตกคอนกรีตซึ่งอาจมีผลต่อการจัดเรียงตัวของเส้นใย
2. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเฉพาะอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d) เท่ากับ 2.8
3. พิจารณาพฤติกรรมโครงสร้างภายใต้แรงกระทำสถิตย์ (Static load)

## 1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในอดีตที่เกี่ยวกับคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ตลอดจนสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก
2. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อสร้างแบบจำลองการประมาณค่าหน่วยแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
3. สร้างแบบจำลองเพื่อประมาณค่าความสามารถการรับแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
4. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบผลการทดสอบในอดีต
5. ทำการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของคาน
6. วิเคราะห์ผลการศึกษา
7. สรุปผลงานวิจัย

## บทที่ 2

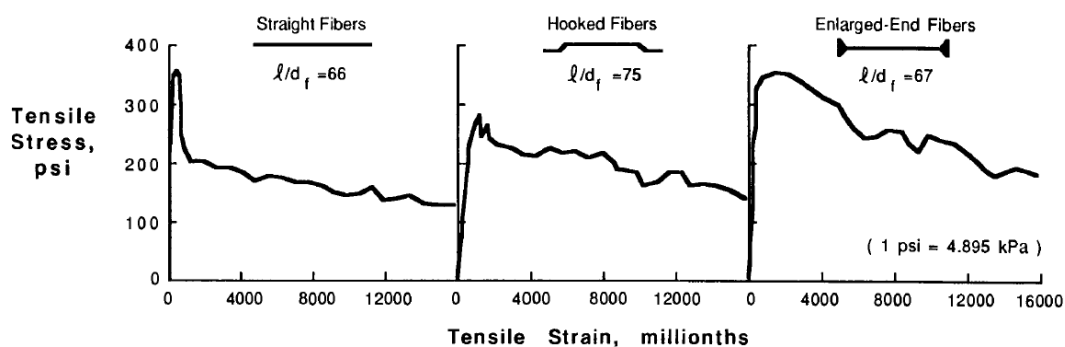
### ทฤษฎีและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

##### 2.1.1 คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

Chanh [1] ได้อธิบายเกี่ยวกับคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กว่าเป็นวัสดุผสมเส้นใยเหล็กกับคอนกรีตเพื่อเพิ่มกำลังในการรับแรงดึงก่อนและหลังการเกิดรอยแตกรวมไปถึงความเหนียวของชิ้นส่วนและช่วยในเรื่องพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตโดยเส้นใยเหล็กทำหน้าที่ยึดรั้งความกว้างของรอยแตก ทำให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนที่ผิวหน้าของรอยแตกมีค่าสูงขึ้น โดยชนิดของเส้นใยเหล็กจะเป็นปัจจัยที่ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเส้นใยมีค่าสูงขึ้น แต่ในการทดลองในอดีตได้พบว่าการเพิ่มปริมาณของเส้นใยหรือการเปลี่ยนประเภทของเส้นใยไม่ใช่เหตุผลเดียวในการเพิ่มกำลังในการยึดเหนี่ยวเพราะหากมีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของคอนกรีตอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้คอนกรีตและเส้นใย รวมถึงการจัดเรียงของเส้นใย

ผลการทดลองในอดีต [2] ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กสามแบบได้แก่ ปลายตรง ปลายตะขอ และปลายขนาดใหญ่ ดังรูป 2.1 จากผลการทดลองทำให้เห็นได้ว่าหลังเสริมเส้นใยเหล็กแล้วทำให้ชิ้นส่วนของโครงสร้างสามารถรับกำลังได้เพิ่มขึ้น

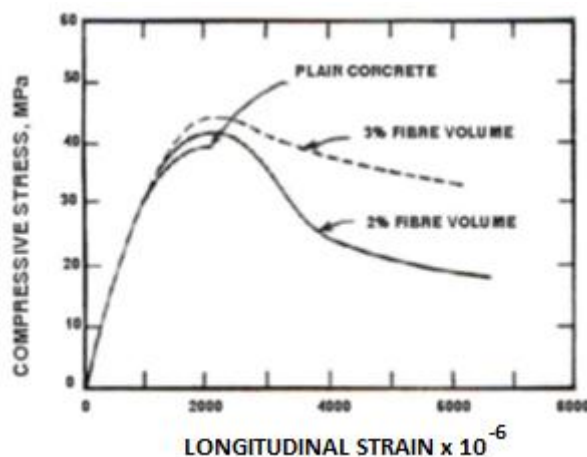


รูป 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นของคอนกรีตเสริมเส้นใยตามประเภทของเส้นใย [2]

##### 2.1.1.1 แบบจำลองพฤติกรรมรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย

Chanh [1] ได้อธิบายเกี่ยวกับการเสริมเส้นใย ว่ามีผลน้อยมากในการเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัด โดยเส้นใยจะช่วยในเรื่องความเหนียวในส่วนของพฤติกรรมหลังการแตก และการดูดซับ

พลังงานของวัสดุดังรูป 2.2 ที่แสดงให้เห็นในเรื่องความแตกต่างของความสามารถในการรับแรงระหว่างแต่ละอัตราส่วนของปริมาณเส้นใยต่อปริมาตร



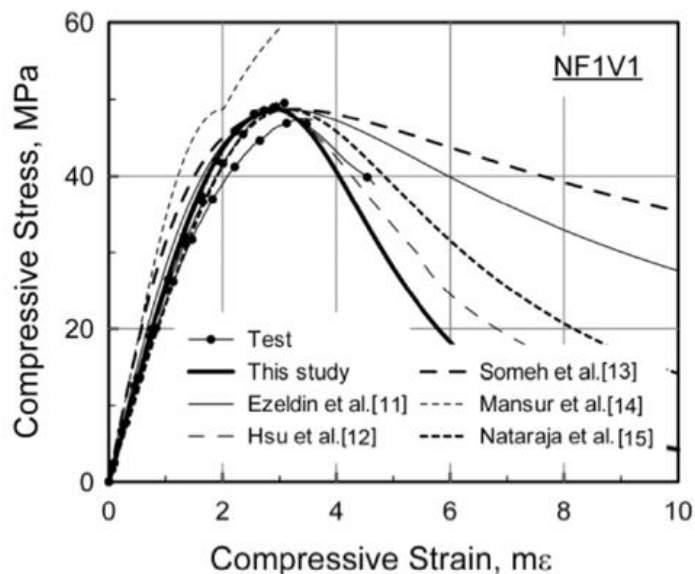
รูป 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียด ( $\times 10^{-6}$ ) [3]

Hsu and Hsu [4] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก โดยคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดมากกว่า 70 MPa ทำการสร้างสมการระหว่างความเค้นและความเครียด เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง พบว่าสมการสามารถใช้ได้หลากหลายทั้งคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก และคอนกรีตกำลังสูงไม่เสริมเส้นใยเหล็กดังตาราง 2.1

Barros and Figueiras [5] ศึกษาพฤติกรรมรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ทำการสร้างสมการด้วยวิธีสมการถดถอย (Least square method) เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยมีตัวแปรคือประเภทและปริมาณเส้นใยเหล็ก ได้สมการดังตาราง 2.1

Nataraja et al. [6] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก โดยคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดตั้งแต่ 30 ถึง 50 MPa ใช้เส้นใยแบบ Round crimped fiber ปริมาณ 0.5% 0.75% และ 1% ทำการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังตาราง 2.1

Lee et al. [7] ได้ทำการทดสอบเพื่อหาพฤติกรรมในการรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก มีตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือ ความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีต ( $f_c'$ ) สองค่าคือ 50 และ 80 MPa ปริมาตรของเส้นใย ( $V_f$ ) และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ( $l_f/d_f$ ) โดยสนใจอัตราส่วนปริมาตรเส้นใยที่ศึกษาตั้งแต่ 0.5% ถึง 2.0% โดยเส้นใยมีลักษณะเป็นแบบปลายตะขอ สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นได้ดังตาราง 2.1 เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นจากสมการข้างต้นกับผลการทดลองรูป 2.3 พบว่าสมการที่นำเสนอโดย Lee et al. [7] มีผลการคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองน้อยที่สุด



รูป 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้น [7]

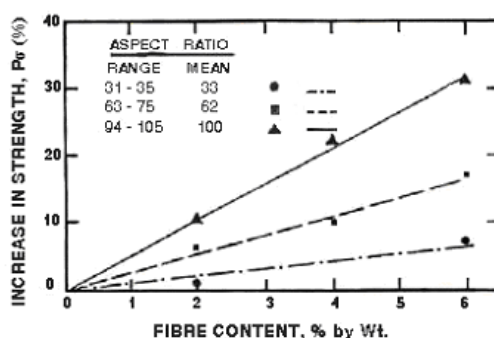
ตาราง 2.1 สมการและตัวแปรของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

| ผู้ค้นคว้า      | สมการ   | ตัวแปร  |
|-----------------|---|---|
| Hsu and Hsu [4] | $f_c = f'_c \left[ \frac{n\beta \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)}{n\beta - 1 + \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^{n\beta}} \right] \text{ สำหรับ } 0 \leq \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \leq x_d$ $f_c = f'_c \left[ \eta_d e^{-k_d \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - x_d \right)^a} \right] \text{ สำหรับ } x_d \leq \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ $\beta = \frac{1}{1 - \frac{f'_c}{\epsilon_0 E_{it}}} \text{ เมื่อ } \beta \geq 1.0$ | <p><math>n</math> เป็นผลเนื่องจากการกำลังของคอนกรีตในคอนกรีตเสริมเส้นใยกำลังสูงนั้น</p> <p><math>\eta_d = 0.6</math>, <math>k_d = 0.7</math> และ <math>a = 0.8</math></p> <p><math>x_d</math> เป็นความเครียดที่เกิดที่ <math>0.6f'_c</math></p> <p><math>\epsilon_0</math> คือ ความเครียดที่ความเค้นสูงสุด</p> <p><math>f'_c</math> คือ หน่วยแรงอัดสูงสุด</p> |
| Barros and      | $\sigma_c = f'_c \left[ \frac{n}{(1-p-q) + q\eta + p\eta^p} \right]^{(1-q)}$  | <p><math>P</math> คือค่าที่สามารถคำนวณได้จากผลการทดลองโดยวิธีการคำนวณแบบ least</p>  |

| ผู้ค้นคว้า             | สมการ   | ตัวแปร   |
|------------------------|---|--|
| Figueiras<br>[5]       | $q = 1 - p \frac{E_c}{E_{cp}}, p + q \in ]0, 1[, \frac{1-q}{p} > 0$   | squares โดยขึ้นอยู่กับ<br>ชนิดของเส้นใยและ<br>ปริมาณเส้นใย   |
| Nataraja<br>et al. [6] | $\sigma_c = f'_c \frac{\beta \eta}{\beta - 1 + \eta^\beta}$ $f'_c = f'_{cp} + 6.9133RI$ $\beta = 0.581 + 0.8155RI^{(-0.7406)}$ $\varepsilon_0 = \varepsilon_{0p} + 0.00192RI$   | $f'_c$ คือกำลังในการรับ<br>แรงอัดของคอนกรีต<br>$f'_{cp}, \varepsilon_{op}$ คือกำลังในการ<br>รับแรงอัด และ<br>ความเครียดที่สอดคล้อง<br>ของคอนกรีต |
| Lee et al.<br>[7]      | $\varepsilon_0 = \left( 0.0003V_f \frac{l_f}{d_f} + 0.0018 \right) f_c'^{0.12}$ $= (0.0003RI + 0.0018) f_c'^{0.12}$ $A = B = \frac{1}{1 - \left( \frac{f'_c}{\varepsilon_0 E_c} \right)}$ <p style="text-align: center;">สำหรับ <math>\varepsilon_c / \varepsilon_0 \leq 1.0</math></p> $A = 1 + 0.723 \left( V_f \frac{l_f}{d_f} \right)^{-0.957}$ <p style="text-align: center;">สำหรับ <math>\varepsilon_c / \varepsilon_0 &gt; 1.0</math></p> $B = \left( \frac{f'_c}{50} \right)^{0.064} \left[ 1 + 0.882 \left( V_f \frac{l_f}{d_f} \right)^{-0.882} \right] \geq A$ <p style="text-align: center;">สำหรับ <math>\varepsilon_c / \varepsilon_0 &gt; 1.0</math></p> $f_c = f'_c \left[ \frac{A(\varepsilon_c / \varepsilon_0)}{A - 1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_0)^B} \right]$ | $f'_c$ คือกำลังในการรับ<br>แรงอัดของคอนกรีต<br>A และ B คือตัวแปรคูณ<br>ปรับแก้ค่า $f'_c$   |
| ค่า                    | $RI = \frac{V_f l_f}{d_f}$ โดยที่ $V_f$ คือปริมาณเส้นใย $\frac{l_f}{d_f}$ คืออัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของ<br>เส้นใย  |  |

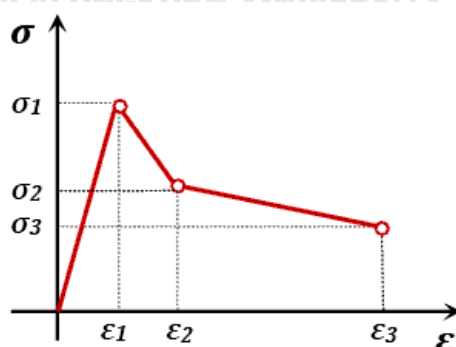
### 2.1.1.2 แบบจำลองพฤติกรรมรับแรงดึงของคอนกรีตเสริมเส้นใย

Chanh [1] ได้กล่าวไว้ว่าเส้นใยจะเพิ่มกำลังได้ดีในการรับแรงดึงถ้าหากอยู่ในแนวราบ โดยหากเส้นใยเหล็กรับแรงดึงโดยตรงสามารถรับแรงดึงได้เพิ่มขึ้นมาก แต่โดยปกติแล้วเส้นใยเหล็กจะเรียงตัวแบบสุ่มทำให้สามารถรับแรงดึงเพิ่มได้เพียง 60% โดยประมาณจากผลการทดลองในอดีต [3] ดังรูป 2.4



รูป 2.4 เปรียบเทียบอัตราการเสริมเส้นใยเหล็กและกำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้น [3]

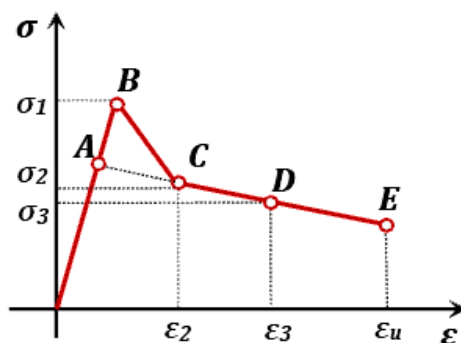
เพื่อที่จะสามารถคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กได้นั้น Rilem [8] ได้แนะนำให้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสำหรับคอนกรีตเสริมเส้นใยที่รับแรงในแนวแกนเดียว โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ได้แก่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปจากผลการทดสอบคาน โดยใช้พื้นฐานการคาดการณ์รับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและหลักเกณฑ์การดูัดรับแรงหลังจากการแตกร้าว กราฟความสัมพันธ์ของ Rilem [8] มีลักษณะดังรูป 2.5



รูป 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก [8]

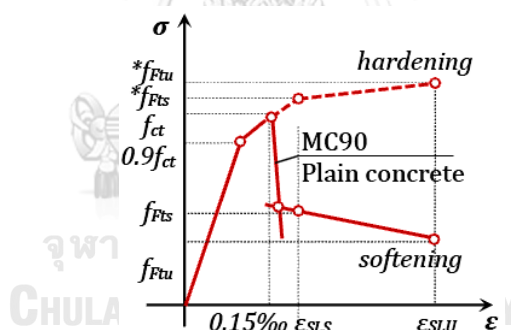
INSTRUCCIÓN [9] ได้เสนอกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีลักษณะดังรูป 2.6 โดยแบ่งเส้นความสัมพันธ์ด้วยลักษณะความเครียดที่แตกต่างกันดังแสดงในตาราง 2.2 โดย

ความเครียดแรกจะมีผลของโมดูลัสของคอนกรีต ในขณะที่ความเครียดต่อมามีผลของคุณสมบัติเส้นใยเข้ามาเกี่ยวข้อง และความเครียดสุดท้ายคือลักษณะในการรับแรงของเส้นใย



รูป 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก [9]

ตามมาตรฐานการออกแบบ fib. Model Code [10] ได้เสนอกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กโดยแบ่งความเครียดเป็น 2 ลักษณะตามคุณสมบัติของเส้นใยมีลักษณะดังรูป 2.9 โดยสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นสามารถหาได้ดังแสดงในตาราง 2.2



รูป 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กของ fib. Model Code [10]

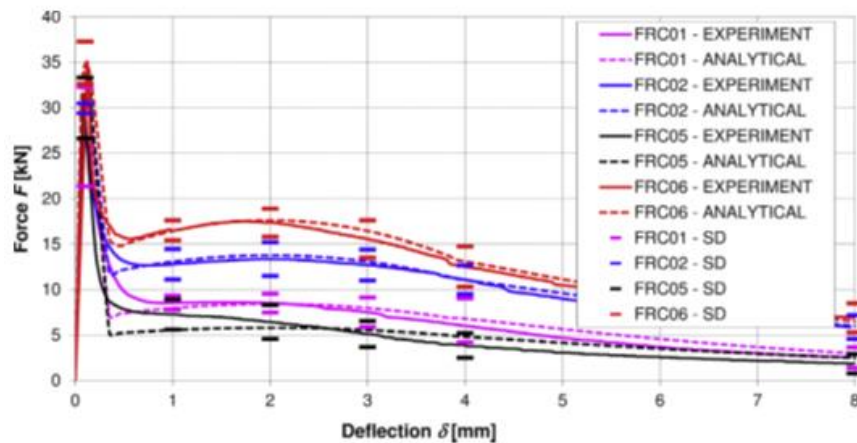
ตาราง 2.2 สมการและตัวแปรในการคำนวณกำลังของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

| ผู้ค้นคว้า | สมการ  | ตัวแปร |
|------------|--|--------|
| Rilem [8]  | $\sigma_1 = 0.7 f_{cm,fl} (1.6 - d)$ $\sigma_2 = 0.45 K_h f_{R,1}$ $\sigma_3 = 0.37 K_h f_{R,4}$ $\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{HRF}}; \varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 0.1\%; \varepsilon_3 = \varepsilon_u = 25\%$ |        |

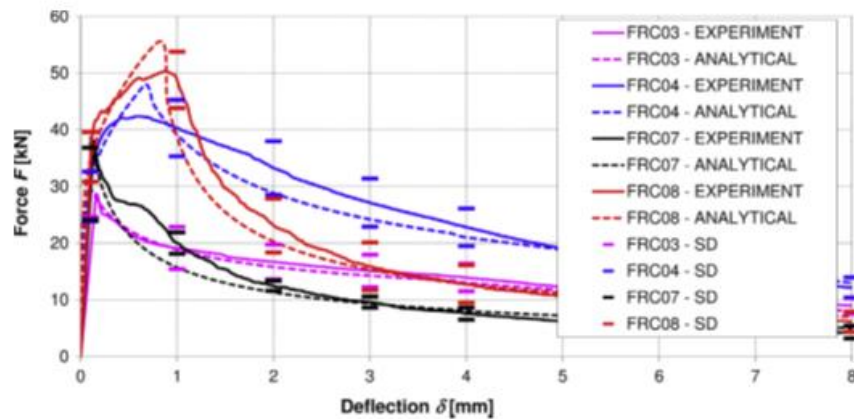
| ผู้ค้นคว้า              | สมการ  | ตัวแปร   |
|-------------------------|--|--|
| INSTRUCCIÓ<br>N [9]     | $\sigma_1 = f_{ct,d} = 0.6 f_{ct,fl,d}$ $\sigma_2 = f_{ctR1,d} = 0.45 f_{R1,d}$ $\sigma_3 = f_{ctR3,d} = k_1 (0.5 f_{R3,d} - 0.2 f_{R1,d})$  | $\varepsilon_2 = 0.1 + 1000 \frac{f_{ct,d}}{E_{c,0}}$ $\varepsilon_3 = \frac{2.5}{l_{cs}}$ <p>(<math>l_{cs}</math>: characteristic length)</p> $\varepsilon_u = [20\% \text{ bending}; 10\% \text{ pure tension}]$ |
| fib. Model<br>Code [10] | $f_{ctm} = f_{ctk0,m} \left( \frac{f_{ck}}{f_{ck0}} \right)^{2/3}$ $f_{Fts} = 0.45 f_{R1}$ $f_{Fu} = k \left[ f_{Fts} - \left( \frac{W_u}{CMOD_3} \right) (f_{Fts} - 0.5 f_{R3} + 0.2 f_{R1}) \right]$ $\varepsilon_{SLS} = \frac{CMOD_1}{l_{cs}}$ $\varepsilon_{SLU} = \frac{W_u}{l_{cs}} = \min \left( \varepsilon_{Fu}, 2.5 / l_{cs} = 2.5 / y \right)$ $\varepsilon_{Fu} = [20\% \text{ softening}; 10\% \text{ hardening}]$ | $l_{cs} = \min(s_m, y)$  |

Kovar [11] ได้ทำการทดลองคานคอนกรีตเสริมเส้นใยเพื่อหาค่า Fracture Energy ( $G_f$ ) ด้วยวิธีแรงกระทำ 4 จุด (Four point bending test) โดยใช้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต 80 MPa ทำการเสริมเส้นใย 2 ชนิด ได้แก่ เส้นใยเหล็กและเส้นใย Polypropylene มีคุณสมบัติเส้นใยเหล็กคือค่าโมดูลัสเท่ากับ 210 GPa รับแรงดึงได้ 1050 MPa มีความยาวเท่ากับ 30, 32 และ 50 มม. โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณเส้นใยตั้งแต่ 0 ถึง 1.5% และนำเสนอการคิดค่าในการทำการจำลองพฤติกรรมรับแรงดึงของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กดังรูป 2.8 และมีพฤติกรรมรับแรงดึงของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและเส้นใย Polypropylene ดังรูป 2.9 โดยการหาค่า  $G_f$  สามารถหาได้จากสมการ (2.1)





รูป 2.8 ผลการทดลองในอดีต [11]



รูป 2.9 ผลการทดลองในอดีต [11]

$$G_f = \frac{\int_0^{25} F(\delta) d\delta}{B \cdot H} \quad (2.1)$$

$$F(\delta) = C_1 \delta^{C_2} e^{-C_3 \delta^{C_4}} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$G_f$  คือ Fracture energy (N/mm)

$C_1$  คือตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีต โดย  $C_1 = 2F_{cr}$  ( $F_{cr}$  คือแรงที่ทำให้เกิด Macro-crack)

$C_2$ ,  $C_3$  และ  $C_4$  คือตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเส้นใยและปริมาณเส้นใย

$C_2$  เท่ากับ 0.1-0.5 ตามกำลังของเส้นใย

$C_3 = f_{fm}/1000$  ( $f_{fm}$  คือกำลังของเส้นใย)

$C_4 = 0.4027V^{0.292}$  ( $V$  คือปริมาณร้อยละเส้นใย)

### 2.1.1.3 โมดูลัสความยืดหยุ่น

Lee et al. [7] เสนอสมการการหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กดังสมการ (2.1) โดยสามารถคำนวณหาโมดูลัสยืดหยุ่นในช่วงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยระหว่าง 55 MPa ถึง 80 MPa ในขณะที่ ACI 363 [12] ได้เสนอสมการการหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นดังสมการ (2.2) โดยสามารถใช้ได้ในช่วงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยระหว่าง 55 MPa ถึง 125 MPa ในขณะที่ Iravani [13] ได้เสนอสมการที่ (2.3) และค่ากำลังในการรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยอยู่ในช่วง 30 MPa ถึง 75 MPa

$$E_c = \left( -367V_f \frac{l_f}{d_f} + 5520 \right) f_c^{0.41} \quad (2.1)$$

$$E = 3.8\sqrt{f_c'} \text{ (GPa)} \quad (2.2)$$

$$E = 4.2\sqrt{\frac{f_c'}{10}} \text{ (GPa)} \quad (2.3)$$

### 2.1.1.4 อัตราส่วนปัวซอง

Bangash [14] และ Hemmaty [15] ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก พบว่าอัตราส่วนปัวซองนั้นมีค่าประมาณ 0.05 ถึง 0.25 โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 65 MPa ต่อมา Padmarajaiah [16] ได้เสนอค่า อัตราส่วนปัวซองสำหรับคอนกรีตกำลังสูง โดยค่าอัตราส่วนปัวซองมีค่าเท่ากับ 0.31

## 2.2 การวิเคราะห์ตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### 2.2.1 ขนาดเอลิเมนต์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS ในการจำลองชิ้นส่วนของโครงสร้าง โดยการจำลองคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดนั้นจะมีความแตกต่างกันดังที่ได้กล่าวต่อไป การจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะต้องมีขนาดของเอลิเมนต์มาเกี่ยวข้อง เพื่อให้ค่าผลลัพธ์นั้นเข้าใกล้ความเป็นจริงมากขึ้น ซึ่งขนาดของเอลิเมนต์จะต้องมีความเหมาะสม เพราะหากมีขนาดที่เล็กเกินไป ค่าผลลัพธ์ที่ได้จะไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และถ้าขนาดเอลิเมนต์ใหญ่เกินไปค่าผลลัพธ์ที่ได้ก็จะมี ความคลาดเคลื่อนมากเกินไป ในอดีต Özcan [17] มีการศึกษาขนาดเอลิเมนต์ โดยใช้เอลิเมนต์ขนาด 25 มม. Padmarajaiah [18] ใช้เอลิเมนต์ขนาด 50 มม. ในขณะที่ Genikomsou [19] ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์ขนาดเอลิเมนต์ 15 มม. 20 มม. และ 25 มม. พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองแล้วขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม คือ 20 มม. เพราะให้ผลลัพธ์

การเปรียบเทียบ Load-deflection response และรูปแบบรอยแตก (crack pattern) ระหว่างผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงที่สุด

### 2.2.2 แบบจำลองความเสียหายของคอนกรีต

แบบจำลองความเสียหายของคอนกรีตในโปรแกรม ABAQUS มีดังนี้

#### (1) Smearred cracking concrete models

โดยปกติแล้ว Smearred cracking concrete models สามารถคาดการณ์พฤติกรรมของคอนกรีตในการรับแรงคงที่ โดยการจำลองนี้สามารถใช้ได้กับทุกโครงสร้างคอนกรีต ข้อมูลที่ต้องการในการใช้ในการวิเคราะห์คือข้อมูลความสัมพันธ์ของความเครียดและความค้ำ พฤติกรรมในการรับแรงอัดเป็นการจำลองในช่วงสภาพความยืดหยุ่นแบบพลาสติก โดยมีผลของเส้นใยเหล็กในการรับแรงดึงและมีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรับแรงอัดและแรงดึงเป็นตัวควบคุมการเสีรูปร่าง ทำให้โปรแกรม ABAQUS สามารถคำนวณการเสีรูปร่างของพื้นผิวได้ รวมไปถึง Shear retention factor เพื่อลดความแข็งในการรับแรงเฉือนของคอนกรีตที่รอยแตก โดยค่า Shear retention factor นั้นเป็นค่าที่ถูกสมมติขึ้นมาจากโปรแกรม

#### (2) Brittle cracking concrete models

การจำลองพฤติกรรมของคอนกรีตโดยวิธีนี้จะทำการคาดการณ์พฤติกรรมแรงดึงรอยแตกซึ่งมักจะเกิดขึ้นในทุกชั้นส่วนของโครงสร้างคอนกรีต โดยพฤติกรรมในการรับแรงอัดของวิธีการจำลองนี้ได้ทำการจำลองแบบเส้นตรงเท่านั้น ส่วนพฤติกรรมของเส้นใยจะถูกกำหนดโดยการใส่ค่าความสัมพันธ์ในพฤติกรรมหลังการเกิดรอยแตกเพื่อแสดงถึงช่วงในการรับแรงดึง

#### (3) Concrete damage plasticity model

การจำลองพฤติกรรมนี้สามารถจำลองพฤติกรรม inelastic ของคอนกรีตโดยการจำลองนี้ใช้ Plasticity เป็นพื้นฐาน Concrete damage plasticity model ทำการสมมติการพังแบบกลไกได้สองแบบคือการเกิดรอยแตกในการรับแรงดึง และการแตกในการรับแรงอัดของวัสดุคอนกรีตโดยการเสีรูปร่างของพื้นผิวถูกควบคุมโดยสองตัวแปรในการเชื่อมโยงในการพังของกลไกภายใต้แรงอัดและแรงดึง

ใน Concrete damage plasticity model มีตัวแปรหลายตัวแปร ดังนี้

$\mu$  ตัวแปรขยายมุม คือการเสีรูปร่างในแนวเอียงของพื้นผิว โดยอธิบายจากมุมแรงเสียดทานภายในของคอนกรีต โดยค่าที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย คือ 38 องศา

$\varepsilon$  ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการไหล ใช้เพื่อเป็นตัวกำหนดรูปร่างและความต้านทานของพื้นผิว โดยหากหาค่าไม่ได้ ให้ประมาณเท่ากับ 0.1

อัตราส่วนของความเค้น  $\sigma_{bo} / \sigma_{co}$  คืออัตราส่วนความแข็งแรงของการรับแรงในแนวแกนโดยค่ามาตรฐานมีค่าเท่ากับ 1.16

$K_c$  คืออัตราส่วนระหว่างระยะห่างของแกนกับแรงกดและแรงดึง โดยปกติแล้วค่า  $K_c$  จะมีค่าประมาณ 0.5 ถึง 1 โดยค่าที่แนะนำคือ 0.667

$\mu$  คือตัวแปรความเหนียวมีค่าเท่ากับ 0.001

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่น

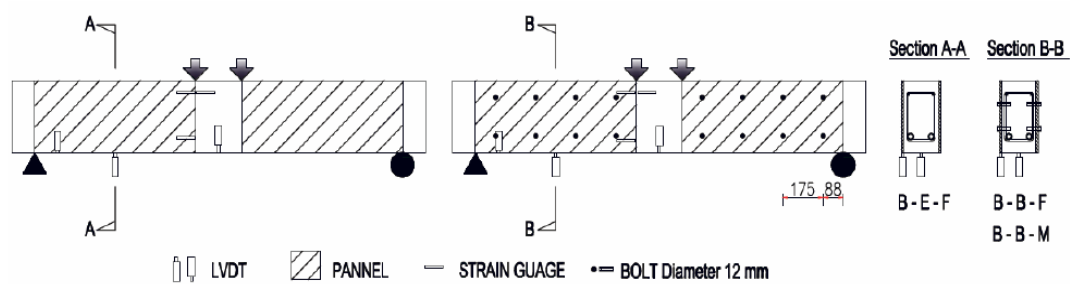
#### คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก [20] และ [21]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองในอดีต โดยในการทดลองได้ใช้คานคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดขนาด 150x300 มม. มีความยาวเท่ากับ 1800 มม. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 30 MPa เสริมเหล็กรับแรงดึงคือ DB25 เหล็กเสริมในรับแรงอัดคือ RB6 และเหล็กปลอกใช้ RB6 ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก 350 มม. โดยทำการทดลองคานจำนวน 9 คาน (คาน B1-B4 [20] และ B5-B9 [21]) ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตาราง 2.3 หน้าตัดของคานคอนกรีตในการทดลองแสดงในรูป 2.10 โดยเสริมกำลังด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก (Steel fiber reinforced concrete, SFRC) แบบปลายตะขอ (Hook) ความยาวขนาด 35 มม. กำลังในการรับแรงดึงเท่ากับ 1050 MPa บริเวณรอยต่อใช้อีพอกซี (Sikadur30) และสลักเกลียวแบบเคมี (Hilti)

ตาราง 2.3 คานคอนกรีตที่ทดสอบ [20] และ [21]

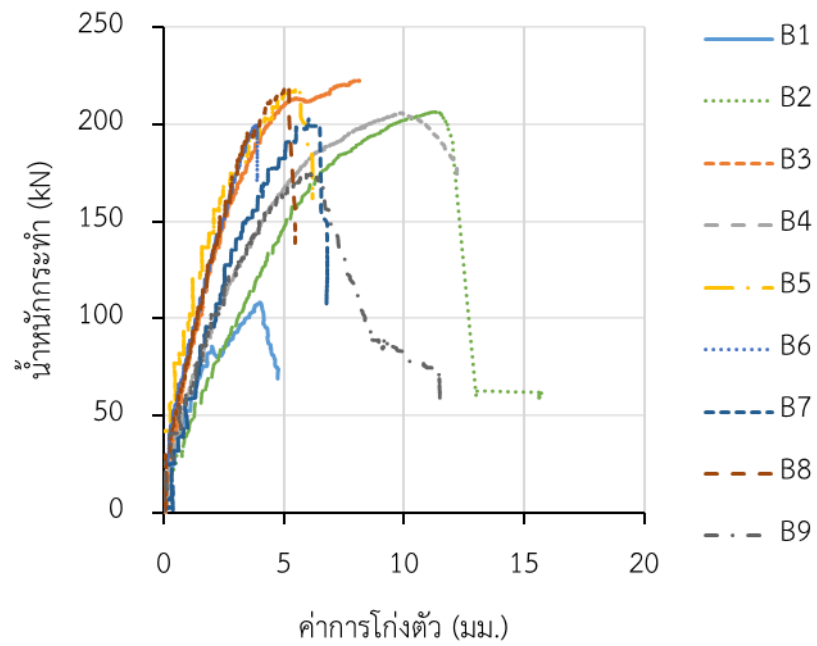
| คาน | รอยต่อ       | วัสดุ | คุณสมบัติคอนกรีต |             | คุณสมบัติของแผ่นคอนกรีต |                  |              |             |              | จำนวนสลักเกลียว | ขนาดสลักเกลียว (มม.) |
|-----|--------------|-------|------------------|-------------|-------------------------|------------------|--------------|-------------|--------------|-----------------|----------------------|
|     |              |       | $f'_c$ (MPa)     | $f_t$ (MPa) | ความหนา (มม.)           | ปริมาณเส้นใย (%) | $f'_c$ (MPa) | $f_t$ (MPa) | $G_f$ (N/mm) |                 |                      |
| B1  | -            | -     | 32.4             | 3.26        | -                       | -                | -            | -           | -            | -               | -                    |
| B2  | Epoxy        | FRC   | 32.4             | 3.26        | 10                      | 1.5              | 61.8         | 6.28        | 8.82         | -               | -                    |
| B3  | Epoxy + Bolt | FRC   | 32.4             | 3.26        | 10                      | 1.5              | 60.8         | 5.24        | 8.82         | 8               | 12                   |

| คาน | รอยต่อ       | วัสดุ  | คุณสมบัติคอนกรีต |             | คุณสมบัติของแผ่นคอนกรีต |                  |              |             |              | จำนวนสลักเกลียว | ขนาดสลักเกลียว (มม.) |
|-----|--------------|--------|------------------|-------------|-------------------------|------------------|--------------|-------------|--------------|-----------------|----------------------|
|     |              |        | $f'_c$ (MPa)     | $f_t$ (MPa) | ความหนา (มม.)           | ปริมาณเส้นใย (%) | $f'_c$ (MPa) | $f_t$ (MPa) | $G_f$ (N/mm) |                 |                      |
| B4  | Epoxy + Bolt | Mortar | 32.4             | 3.26        | 10                      | -                | 56.8         | 4.33        | 4.05         | 8               | 12                   |
| B5  | Epoxy + Bolt | FRC    | 36.7             | 3.26        | 10                      | 1.5              | 60.8         | 5.24        | 8.82         | 8               | 10                   |
| B6  | Epoxy + Bolt | FRC    | 36.7             | 3.26        | 10                      | 1.0              | 69.7         | 4.978       | 7.30         | 8               | 12                   |
| B7  | Epoxy + Bolt | FRC    | 36.7             | 3.26        | 10                      | 1.5              | 60.8         | 5.24        | 8.82         | 6               | 12                   |
| B8  | Epoxy + Bolt | FRC    | 36.7             | 3.26        | 10                      | 1.5              | 60.8         | 5.24        | 8.82         | 4               | 12                   |
| B9  | Epoxy + Bolt | FRC    | 36.7             | 3.26        | 10                      | 1.5              | 60.8         | 5.24        | 8.82         | 6               | 10                   |



รูป 2.10 หน้าตัดคานคอนกรีตในการทดลอง [20]

ผลการทดสอบการเสริมกำลังด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับแรงที่เพิ่มขึ้นหลังเสริมกำลังดังรูป 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าการโก่งตัวของคานทั้ง 9 คาน โดยผลการทดลองตามตาราง 2.4 แสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังโดยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล่านั้นทำให้ความสามารถในการรับแรงของคานมีค่าสูงขึ้น



รูป 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัว [20] และ [21]



ตาราง 2.4 ผลการทดลอง [20] และ [21]

| คาน | คุณสมบัติของคอนกรีต |              | ผลการทดลอง     |                |            |            |            |
|-----|---------------------|--------------|----------------|----------------|------------|------------|------------|
|     | $f'_c$ (MPa)        | $f'_t$ (MPa) | $P_{max}$ (kN) | $V_{max}$ (kN) | $V_c$ (kN) | $V_s$ (kN) | $V_p$ (kN) |
| B1  | 32.4                | 3.26         | 108.39         | 54.19          | 46.35      | 7.87       | 0.00       |
| B2  | 32.4                | 3.26         | 206.58         | 103.29         | 46.35      | 7.84       | 49.10      |
| B3  | 32.4                | 3.26         | 222.75         | 111.38         | 46.35      | 7.84       | 57.18      |
| B4  | 32.4                | 3.26         | 206.00         | 103.00         | 46.35      | 7.84       | 48.80      |
| B5  | 36.7                | 3.26         | 217.76         | 108.88         | 48.59      | 7.58       | 52.71      |
| B6  | 36.7                | 3.26         | 200.18         | 100.09         | 48.59      | 7.58       | 43.92      |
| B7  | 36.7                | 3.26         | 202.78         | 101.39         | 48.59      | 7.58       | 45.22      |
| B8  | 36.7                | 3.26         | 218.98         | 109.49         | 48.59      | 7.58       | 53.32      |
| B9  | 36.7                | 3.26         | 217.76         | 108.88         | 48.59      | 7.58       | 43.92      |

สมการการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กดังสมการ (2.11) ประกอบด้วย กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ( $V_c$ ) ดังสมการ (2.12) กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ( $V_s$ ) ดังสมการ (2.13) และกำลังรับแรงเฉือนของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ( $V_p$ ) โดยผลการทดลองทำให้สามารถหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กตามสมการ (2.7) โดยกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตจากผลการทดลอง คือ  $V_{exp}$

$$V = V_c + V_s + V_p \quad (2.4)$$

$$V_c = 0.17\sqrt{f'_c}bd \quad (2.5)$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (2.6)$$

$$V_p = V_{exp} - V_c - V_s \quad (2.7)$$

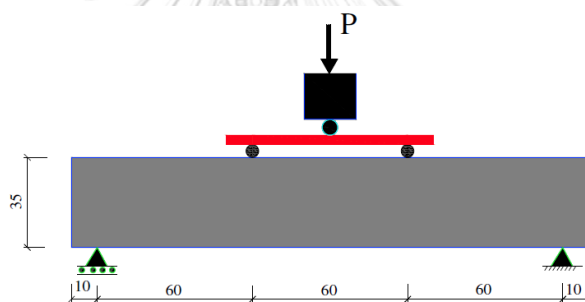
เมื่อ  $V_c$  คือกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (kN)

$V_s$  คือกำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (kN)

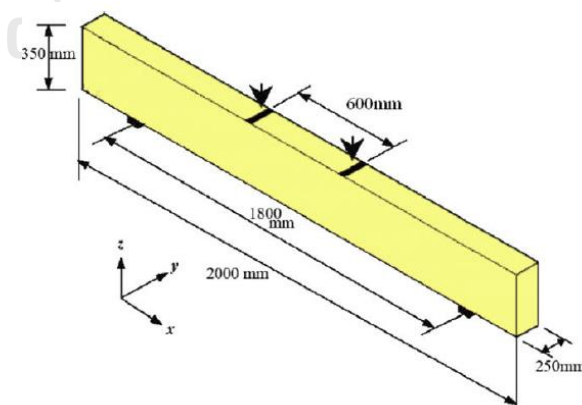
### 2.3.2 การวิเคราะห์และทำนายกำลังคานคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

#### 2.3.2.1 Özcan et al [17]

Özcan et al [17] ได้ทำการทดลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมเส้นใยเหล็กและเปรียบเทียบผลการทดลองกับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เส้นใยที่ใช้เป็นเส้นใยเหล็กแบบปลายตะขอ แต่คานตัวอย่างจะแตกต่างกันตามปริมาณในการเสริมเส้นใย โดยคานตัวอย่างมีแรงกระทำตามรูป 2.12 หลังจากนั้นได้ทำการจำลองโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS ตามรูป 2.13 เพื่อให้ง่ายต่อการจำลองในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองคานแค่ 1/4 ของขนาดคานจริงตามรูป 2.14 โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดขนาด Mesh อยู่ที่ 25 มม. x 25 มม. x 25 มม. และกำหนดให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตเป็นแบบ Perfect bond โดยการวิบัติของคอนกรีตถูกกำหนดโดย Willam [22] ดังรูป 2.15 และได้ทำการเปรียบเทียบค่าผลการทดลองและผลการจำลองจากโปรแกรม ANSYS ตามรูป 2.16 และได้ทำการเปรียบเทียบรอยแตกระหว่างคานตัวอย่างทดสอบและคานจำลองตามรูป 2.17

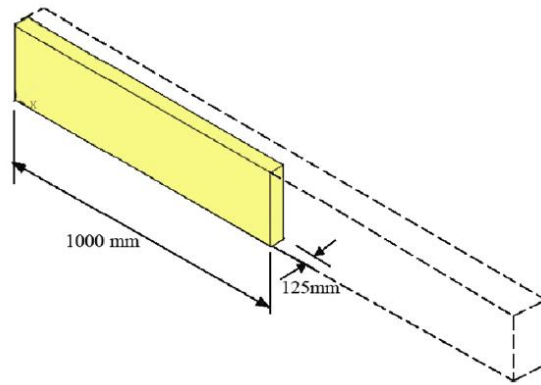


รูป 2.12 การรับแรงและจุดรองรับของคานเสริมเหล็กเสริมเส้นใยเหล็ก [17]

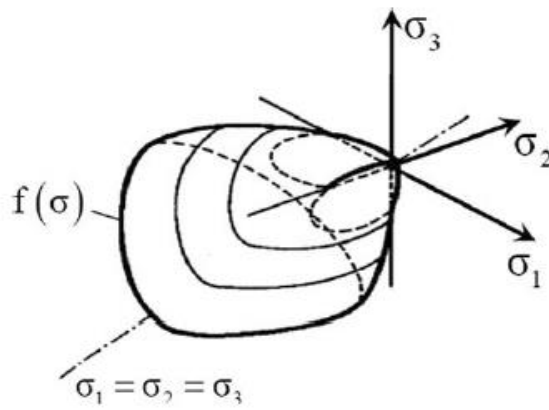


รูป 2.13 ลักษณะคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมเส้นใยเหล็กในการทดลอง [17]

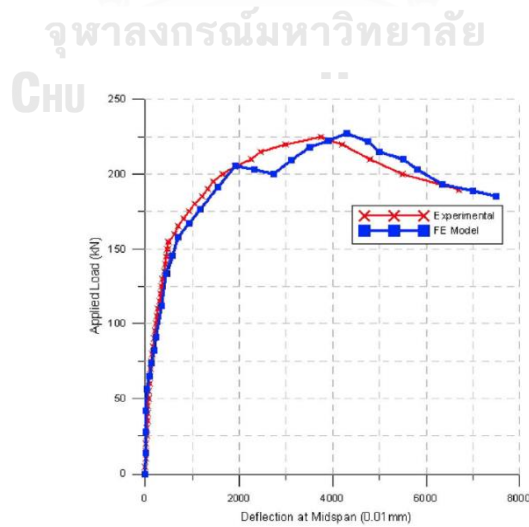




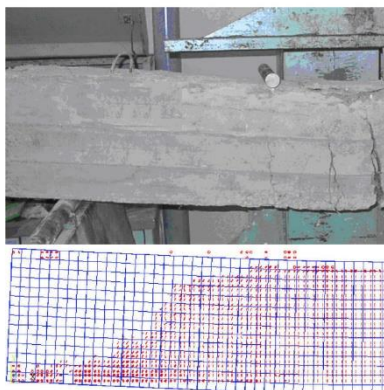
รูป 2.14 ขนาดคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมเส้นใยเหล็กในการจำลอง [17]



รูป 2.15 การวิบัติของคอนกรีตเมื่อรับแรงสามแกน [17]



รูป 2.16 เปรียบเทียบแรงและการอ่อนตัวจากการทดลองและผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS [17]



รูป 2.17 การเปรียบเทียบรอยแตกระหว่างคานตัวอย่างทดสอบและคานจำลองในโปรแกรม [17]

### 2.3.2.2 Padmarajaiah and Ramaswamy [18]

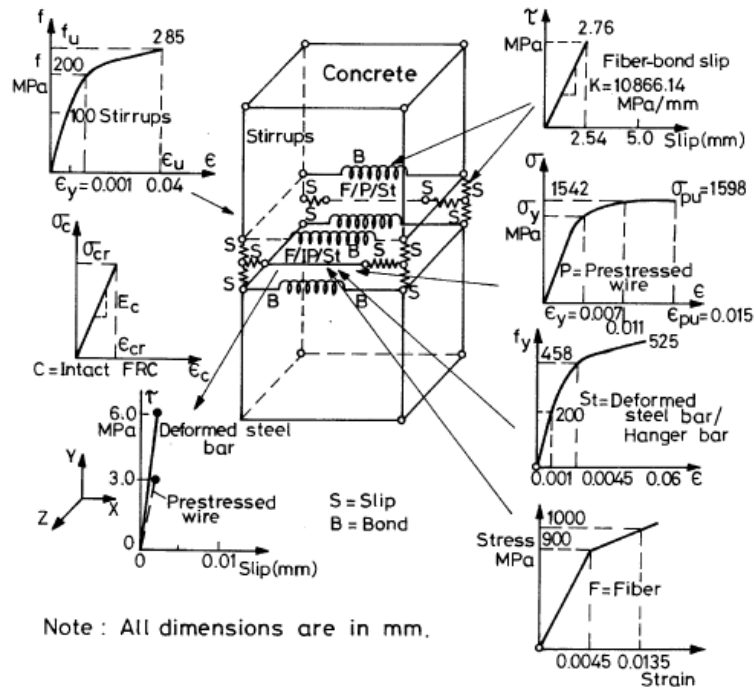
Padmarajaiah and Ramaswamy [18] ได้ทำการทดลองกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมเส้นใยเหล็กและเปรียบเทียบผลการทดลองของคานเสริมเหล็กเสริมเส้นใยด้วยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS โดยในการทดลองได้ทำการใส่เส้นใยเหล็กเข้าไปในคานหลักเพื่อเสริมกำลังในการรับน้ำหนักกระทำ โดยในการจำลองในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาระยะของ Mesh ไว้สองขนาด คือ 75 มม. สำหรับช่วงการรับแรงเฉือนและ 50 มม. ในช่วงการรับแรงดัด โดยพฤติกรรมของเส้นใยแสดงตามรูป 2.18 พฤติกรรมของการรับแรงนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยแต่ละชนิดสำหรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กเสริมและคอนกรีตและเหล็กเสริมกับคอนกรีตได้

สำหรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กเสริมกับคอนกรีต COMBIN14 (spring) เพื่อให้พฤติกรรมของการจำลองเหมือนจริงมากขึ้น แต่เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์ Padmarajaiah and Ramaswamy [18] ได้สมมุติให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นแบบ Perfect bond ส่วนแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กและคอนกรีตนั้นได้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับการเสียรูปตามผลการทดลองของ Nammur [23] และ Edwards [24] ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของแรงยึดเหนี่ยวและการเสียรูปของเหล็กข้ออ้อยและคอนกรีตรวมไปถึงเหล็กเส้นที่ทำการรับแรงก่อน (Prestressing wire) ตามผลการทดลองของ Spencer [25] ตามรูป 2.18 และ Soroushian [26] ได้เสนอสมการการคำนวณจำนวนเส้นใยต่อหนึ่งหน้าตัดตามสมการ (2.8) และจำนวนเส้นใยต่อหนึ่งหน่วยของชิ้นส่วนไฟไนต์เอลิเมนต์ตามสมการ (2.9)

$$N_f = \alpha^1 \frac{v_f}{A_f} \quad (2.8)$$

$$A_f = \alpha^1 v_f A_e \quad (2.9)$$

โดย  $N_f$  คือจำนวนเส้นใยต่อหนึ่งหน่วยของชิ้นส่วนไฟไนต์เอลิเมนต์  $v_f$  คือร้อยละปริมาณเส้นใย  $\alpha^1$  คือค่าตัวแปรที่มีค่าระหว่าง 0.41 ถึง 0.82  $A_f$  คือพื้นที่ชิ้นส่วนไฟไนต์เอลิเมนต์ และ  $A_e$  คือพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต



รูป 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างคอนกรีตและเส้นใย [18]

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและผลของการจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS ได้ค่าเปรียบเทียบผลการทดลองตาม

ตาราง 2.5 และตาราง 2.6 โดยคานแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ Fully and Partially prestressed แต่ละชนิดจะแตกต่างกันตามจำนวนของเส้นใย ชนิดของเส้นใย โดยแบ่งค่าเปรียบเทียบจำนวน 4 ระยะคือ ก่อนการเกิดรอยแตก (20% ของกำลังสูงสุด) เกิดรอยแตกสำหรับการตัด กำลังใช้งาน (กำลังสูงสุด/1.5) และกำลังสูงสุด ตามลำดับ

ตาราง 2.5 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองของ Fully prestressed [18]

| จำนวน | ระยะ | ไฟไนต์เอลิเมนต์ |        | ผลการทดลอง |        |
|-------|------|-----------------|--------|------------|--------|
|       |      | W (kN)          | δ (มม) | W (kN)     | δ (มม) |
| 1     | 1    | 18.10           | 0.49   | 19.40      | 0.59   |
|       | 2    | 53.13           | 1.70   | 55.43      | 2.68   |
|       | 3    | 60.33           | 2.98   | 64.66      | 4.47   |

| จำนวน | ระยะ | ไฟไนต์เอลิเมนต์ |               | ผลการทดลอง |               |
|-------|------|-----------------|---------------|------------|---------------|
|       |      | W (kN)          | $\delta$ (มม) | W (kN)     | $\delta$ (มม) |
|       | 4    | 90.49           | 8.20          | 96.99      | 13.50         |
| 2     | 1    | 22.10           | 0.51          | 23.46      | 0.62          |
|       | 2    | 60.30           | 1.90          | 64.46      | 2.63          |
|       | 3    | 73.70           | 3.33          | 78.21      | 5.26          |
|       | 4    | 110.50          | 11.32         | 117.31     | 20.55         |
| 3     | 1    | 21.30           | 0.56          | 22.11      | 0.59          |
|       | 2    | 60.53           | 2.38          | 64.46      | 2.11          |
|       | 3    | 71.00           | 2.90          | 73.69      | 3.71          |
|       | 4    | 106.50          | 10.50         | 110.54     | 17.50         |
| 4     | 1    | 19.50           | 0.51          | 20.29      | 0.62          |
|       | 2    | 54.90           | 1.84          | 57.95      | 2.58          |
|       | 3    | 65.00           | 3.15          | 67.65      | 4.01          |
|       | 4    | 97.51           | 9.75          | 101.47     | 16.10         |

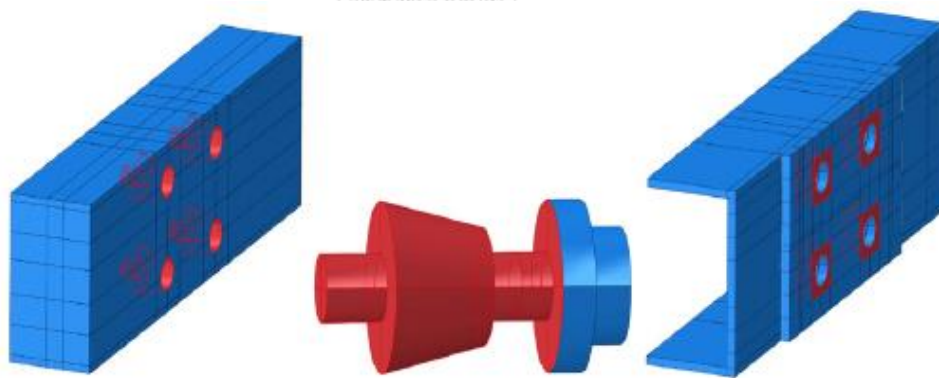
ตาราง 2.6 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองของ Partially prestressed [18]

| จำนวน | ระยะ | ไฟไนต์เอลิเมนต์ |               | ผลการทดลอง |               |
|-------|------|-----------------|---------------|------------|---------------|
|       |      | W (kN)          | $\delta$ (มม) | W (kN)     | $\delta$ (มม) |
| 1     | 1    | 17.44           | 0.61          | 18.33      | 0.54          |
|       | 2    | 42.51           | 2.10          | 42.78      | 2.33          |
|       | 3    | 58.13           | 2.90          | 61.10      | 4.10          |
|       | 4    | 87.20           | 8.90          | 91.65      | 14.30         |
| 2     | 1    | 21.08           | 0.6           | 21.93      | 0.65          |
|       | 2    | 49.21           | 2.21          | 55.43      | 2.4           |
|       | 3    | 70.36           | 3.5           | 73.09      | 4.85          |
|       | 4    | 105.54          | 9.23          | 109.63     | 17.98         |
| 3     | 1    | 20.45           | 0.58          | 21.02      | 0.63          |
|       | 2    | 48.77           | 2.10          | 55.43      | 2.13          |
|       | 3    | 68.15           | 3.50          | 70.08      | 4.70          |

| จำนวน | ระยะ | ไฟไนต์เอลิเมนต์ |               | ผลการทดลอง |               |
|-------|------|-----------------|---------------|------------|---------------|
|       |      | W (kN)          | $\delta$ (มม) | W (kN)     | $\delta$ (มม) |
|       | 4    | 102.23          | 9.35          | 105.12     | 16.00         |
| 4     | 1    | 18.86           | 0.64          | 19.85      | 0.85          |
|       | 2    | 44.05           | 1.81          | 46.39      | 1.90          |
|       | 3    | 62.87           | 3.00          | 66.16      | 4.83          |
|       | 4    | 94.30           | 9.43          | 99.24      | 20.89         |

### 2.3.2.3 Hu et al. [27]

Hu et al [27] ได้ทำการวิจัยพฤติกรรมของรอยต่อสลักเกลียว ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม ABAQUS ในการจำลองคุณสมบัติของวัสดุ โดยการจำลองของวัสดุสำหรับสลักเกลียว พื้นคอนกรีต แผ่นเหล็ก ใช้ C3D8R เหล็กเสริมใช้ T3D2 และคานเหล็กใช้ S4R ตามรูป 2.19 สำหรับระยะ Mesh นั้นได้ใช้ค่าน้อยสุดและมากที่สุดคือ 2.5 มม. และ 101.6 มม. ตามลำดับ หลังจากได้ผลการทดลองได้นำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบและผลการจำลองเพื่อศึกษาตัวแปรเพิ่มเติมที่มีผลต่อการรับแรงของรอยต่อ เช่น การเปลี่ยนแปลงประเภทของสลักเกลียว ขนาดของสลักเกลียว เป็นต้น



รูป 2.19 ลักษณะการจำลองสลักเกลียวและการแบ่ง Mesh [27]

### บทที่ 3

#### แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

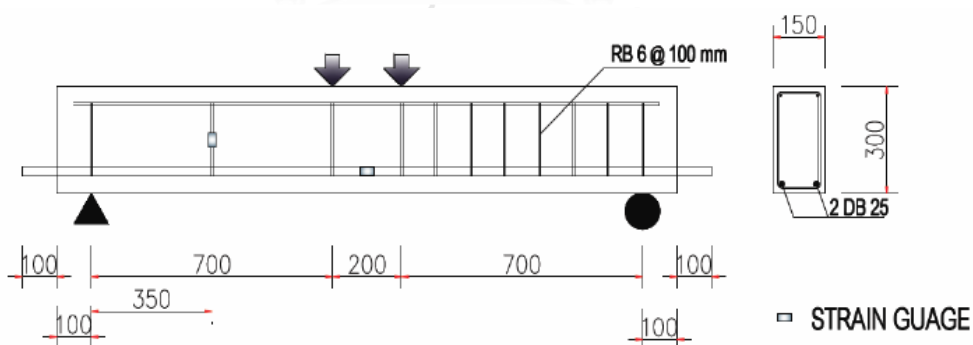
งานวิจัยนี้ทำการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ABAQUS เปรียบเทียบกับการทดลองในอดีต [20] และ [21] เพื่อศึกษาผลการเสริมกำลังด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเสริมกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

#### 3.1 ขนาดของแบบจำลอง

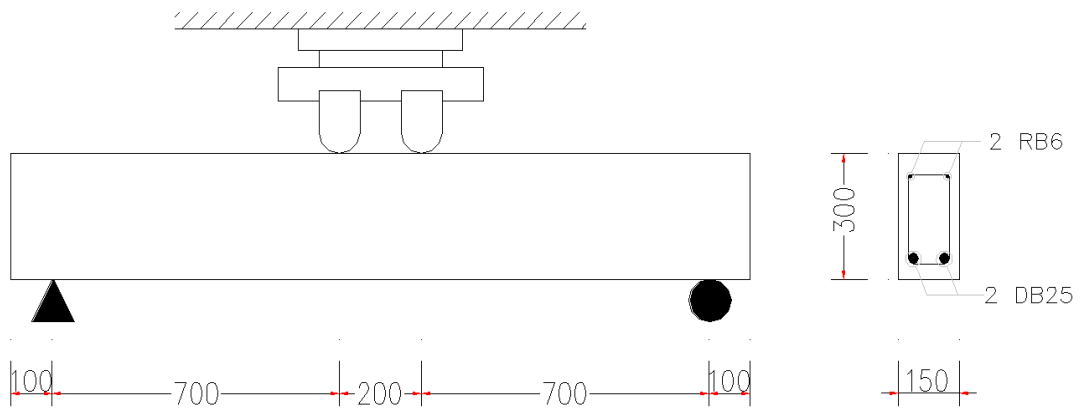
##### 3.1.1 ขนาดคานของงานวิจัยในอดีต [20] และ [21]

แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำลองตามการทดลองในอดีต [20] และ [21] ซึ่งมีขนาด 150x300 มม. และความยาว 1,800 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยกำลังของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 30 MPa เสริมเหล็กรับแรงดึงขนาด DB25 เหล็กเสริมรับแรงอัดขนาด RB6 และเหล็กปลอกขนาด RB6 มีระยะห่าง 350 มม. โดยทำการวิเคราะห์คานจำนวน 9 คานซึ่งมีรายละเอียดการเสริมกำลังที่แตกต่างกันดังแสดงใน รูป 3.2 ถึงรูป 3.10

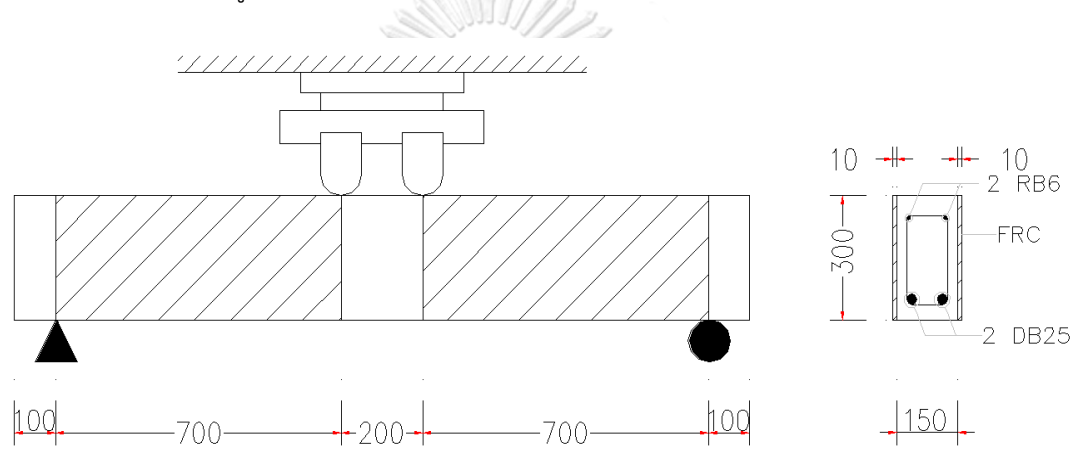
แผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กที่ใช้เสริมกำลังมีกำลังรับแรงอัด 70 MPa เส้นใยที่ใช้เป็นเส้นใยเหล็กแบบปลายตะขอ (Hooked fiber) ความยาวขนาด 35 มม. และมีกำลังในการรับแรงดึง 1,050 MPa การยึดติดคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กใช้กาวอีพอกซี Sikadur30 สลักเกลียวและกาวยึดเหนี่ยวสลักเกลียวของ Hilti



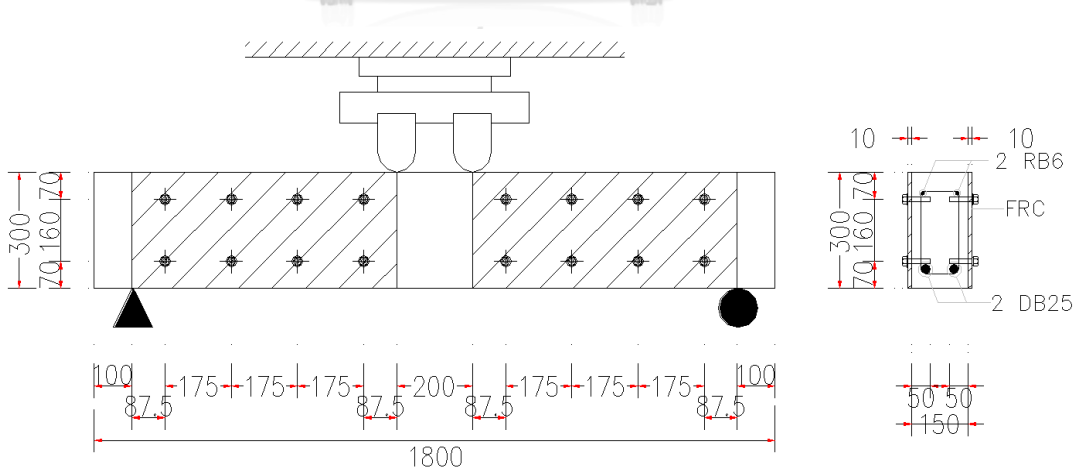
รูป 3.1 ขนาดคานที่ทดสอบ [20]



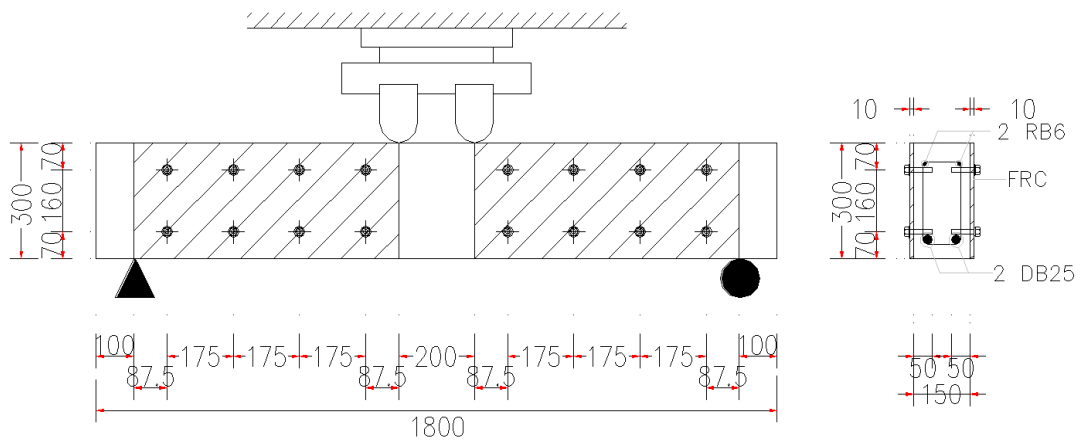
รูป 3.2 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 1 [20]



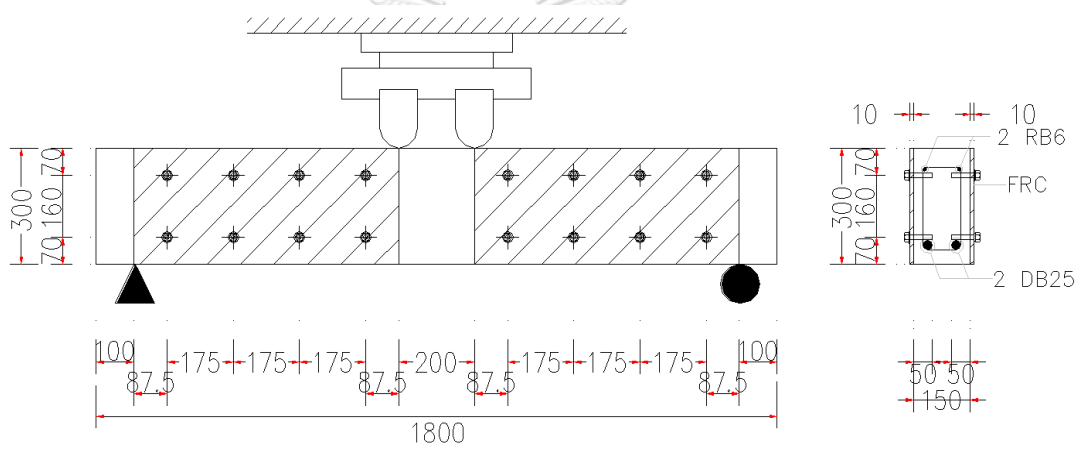
รูป 3.3 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 2 [20]



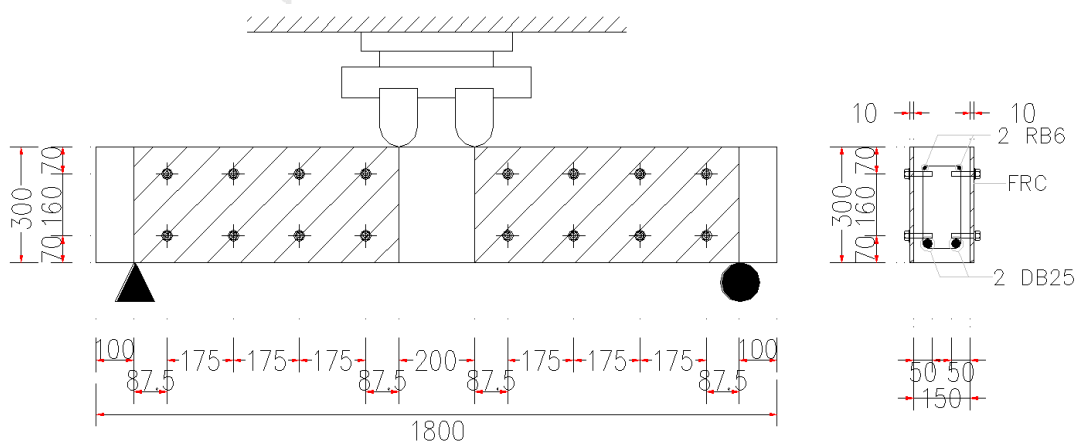
รูป 3.4 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 3 [20]



รูป 3.5 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 4 [20]

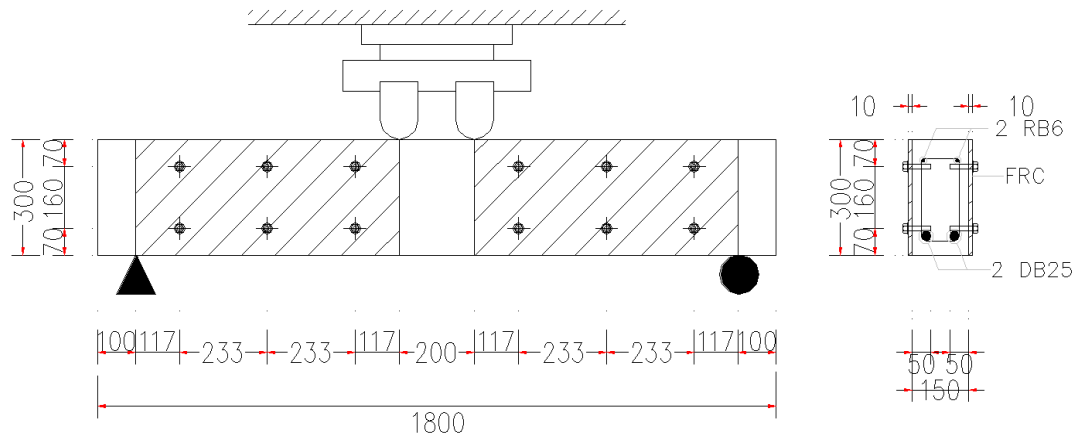


รูป 3.6 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 5 [21]

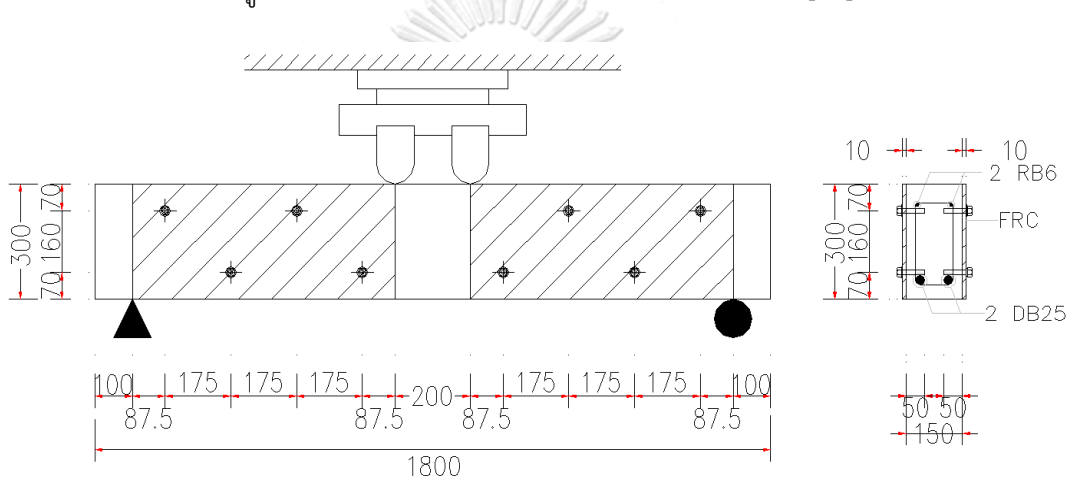


รูป 3.7 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 6 [21]

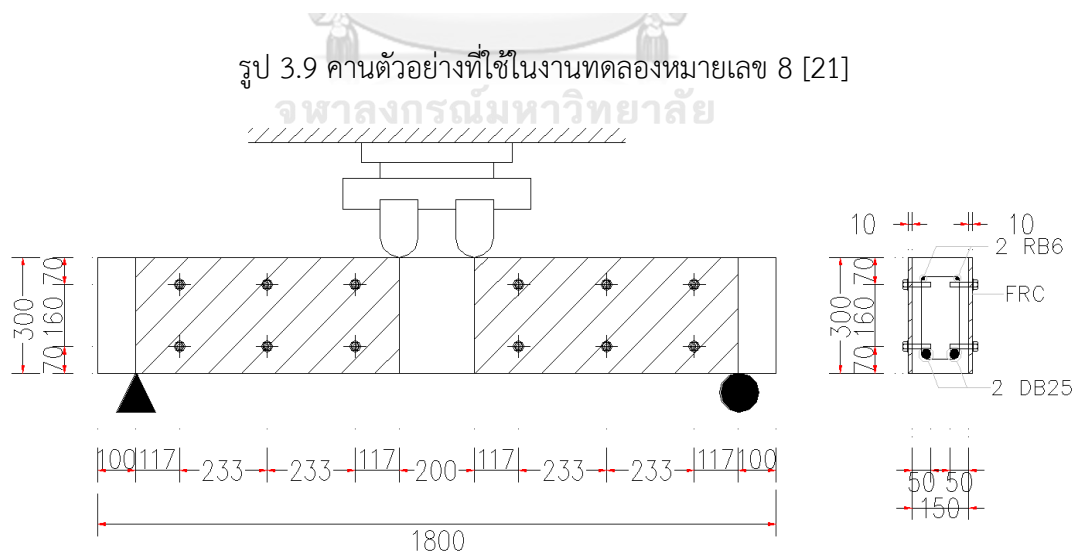




รูป 3.8 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 7 [21]



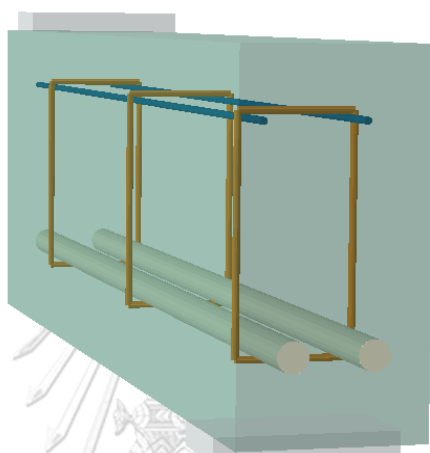
รูป 3.9 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 8 [21]



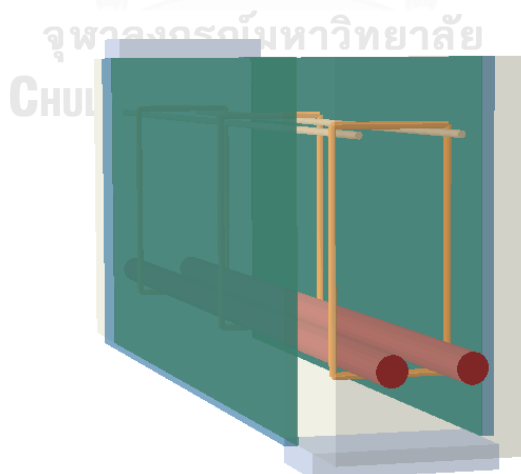
รูป 3.10 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 9 [21]

### 3.1.2 ขนาดแบบจำลอง

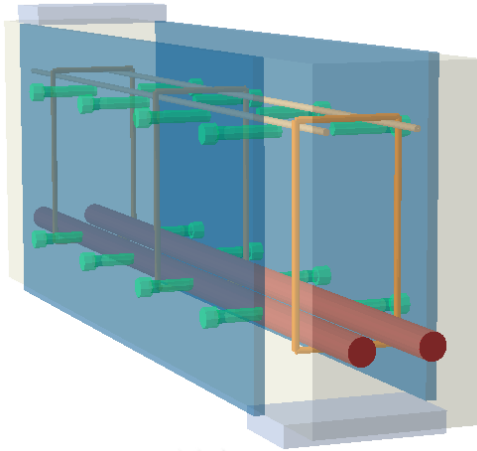
การสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ทำการจำลองขนาดหน้าตัดคานคงเดิมแต่จำลองความยาวคาน 1/2 เท่าของคานตัวอย่างในการทดลองในอดีต [20] และ [21] โดยมีขนาดหน้าตัดคาน กว้าง 150 มม. สูง 300 มม. ยาว 900 มม. เพื่อลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS โดยมีลักษณะคานในการจำลองดังรูป 3.11 ถึง รูป 3.19



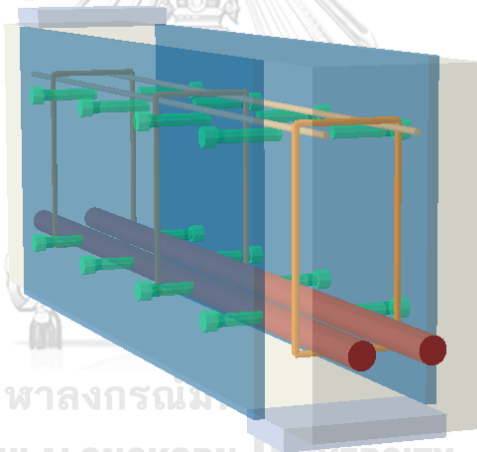
รูป 3.11 ลักษณะคาน B1 ในการจำลอง



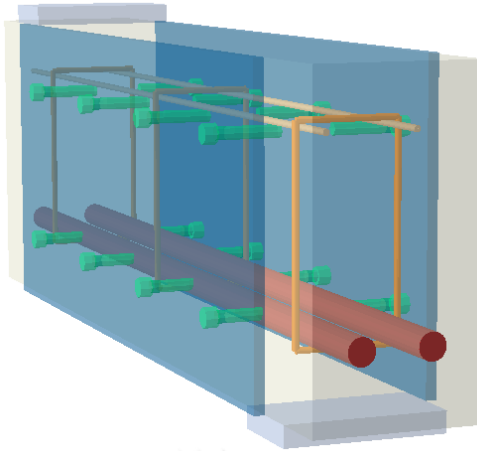
รูป 3.12 ลักษณะคาน B2 ในการจำลอง



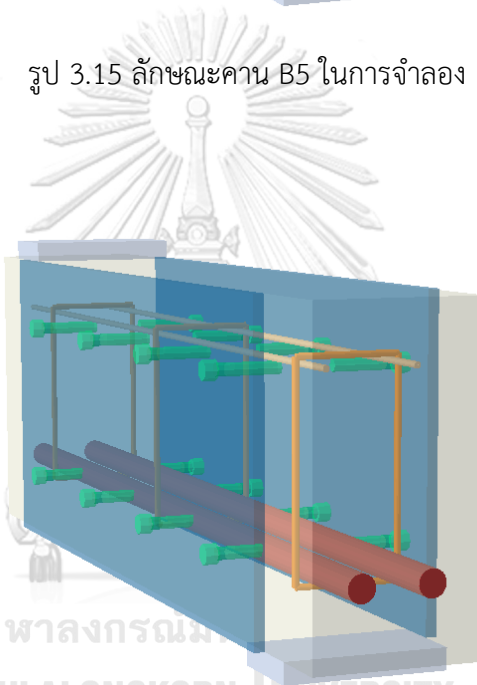
รูป 3.13 ลักษณะคาน B3 ในการจำลอง



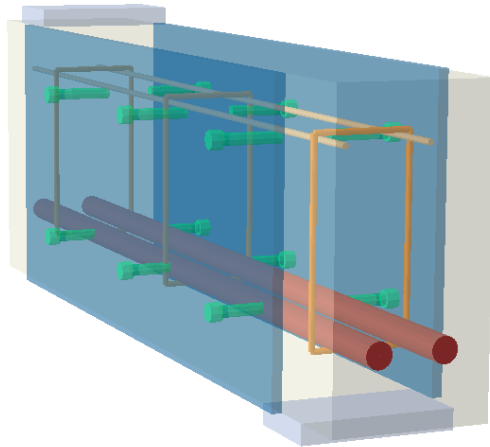
รูป 3.14 ลักษณะคาน B4 ในการจำลอง



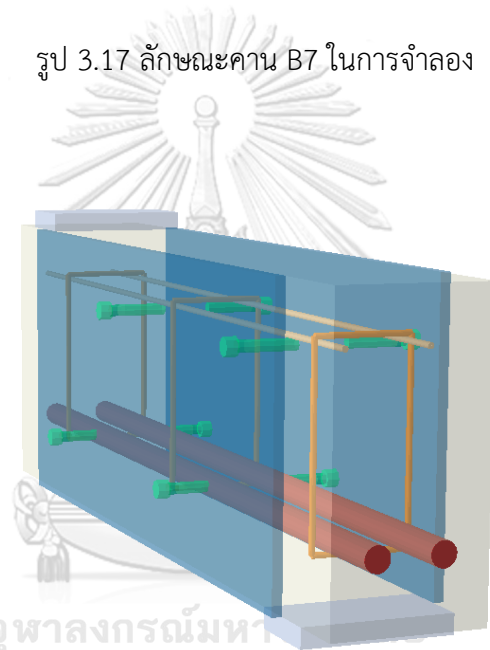
รูป 3.15 ลักษณะคาน B5 ในการจำลอง



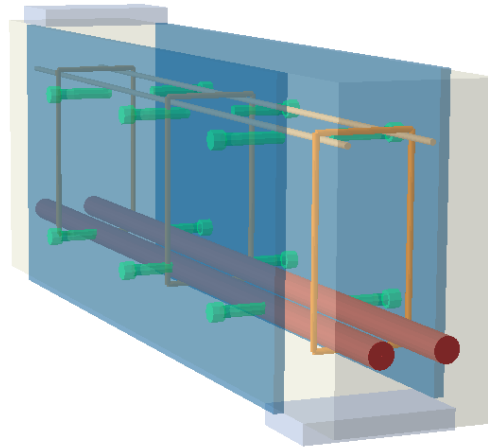
รูป 3.16 ลักษณะคาน B6 ในการจำลอง



รูป 3.17 ลักษณะคาน B7 ในการจำลอง



รูป 3.18 ลักษณะคาน B8 ในการจำลอง

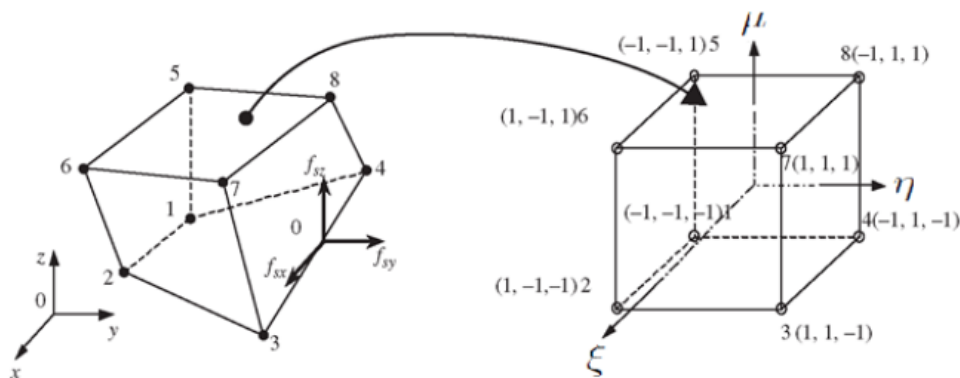


รูป 3.19 ลักษณะคาน B9 ในการจำลอง

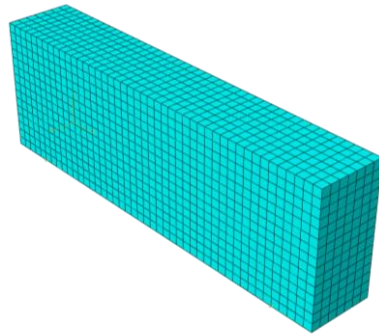
## 3.2 แบบจำลองวัสดุ

### 3.2.1 แบบจำลองชิ้นส่วนคอนกรีต

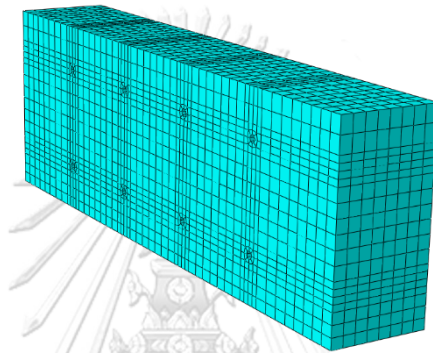
เนื่องจากคอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้ Solid Elements โดย Solid Elements นั้นสามารถทำการจำลองได้ทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ Hexahedra Elements (C3D8R) เป็นทรงลูกบาศก์ที่ประกอบด้วยจุด 8 จุดและมีพื้นที่ผิว 6 ด้านโดยที่จุดแต่ละจุดมี 3 DOFs ซึ่งหมายความว่าหนึ่งลูกบาศก์จะมี 24 DOFs มีขนาดเอลิเมนต์ 20 มม. มีลักษณะในการจำลองดังรูป 3.21 และรูป 3.22 โดยแบบจำลองชิ้นส่วนคอนกรีตเมื่อยึดติดแบบมีสลักเกลียวในบริเวณสลักเกลียวทำการแบ่งขนาดเอลิเมนต์ให้มีค่าใกล้เคียงกับขนาดเอลิเมนต์ของสลักเกลียวโดยประมาณ 5 มม.



รูป 3.20 Hexahedra Elements (C3D8R)

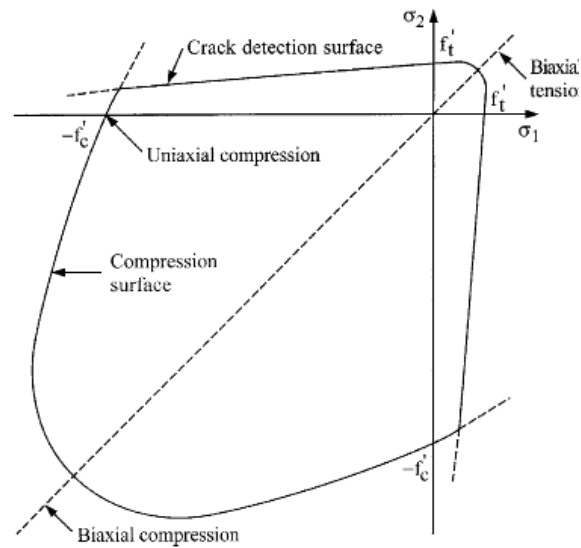


รูป 3.21 ลักษณะคานคอนกรีตในการจำลอง



รูป 3.22 ลักษณะคานคอนกรีตในการจำลองเมื่อยึดติดแบบมีสลักเกลียว

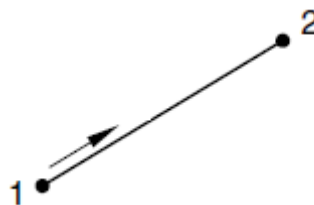
ในโปรแกรม ABAQUS ได้ใช้ Mohr-Coulomb เป็นตัวควบคุมแรงและรอยแตกของพื้นผิวคอนกรีตโดยการจำลองการเสียรูปที่พื้นผิวของคอนกรีต ในส่วนของการตอบสนองของคอนกรีตได้ถูกจำลองโดยทฤษฎี Elastic-plastic ในการรับแรงดึงเมื่อเกิดรอยแตกจะทำการจัดเก็บรอยแตกไว้โดยการจำลองแบบ Damage elasticity เพื่อจำลองรอยแตกดังรูป 3.23



รูป 3.23 การเสียรูปของคอนกรีตในระนาบของความเครียด Mohr-Coulomb

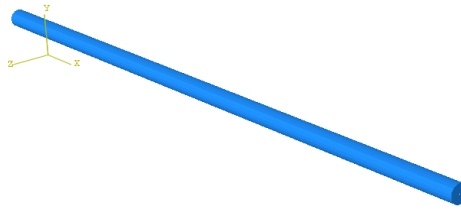
### 3.2.2 แบบจำลองชิ้นส่วนเหล็ก

การจำลองเหล็กเสริมในโปรแกรม ABAQUS นั้นทำได้โดยการใช้คุณสมบัติของ Three dimensional 2 Node linear truss elements (T3D2) โดยในจุดแต่ละด้านของชิ้นส่วนมี 3 DOFs ดังรูป 3.24 โดยมีลักษณะการจำลองดังรูป 3.25 ทำการยึดติดกับคานคอนกรีตด้วย Constraint ด้วย Embedded region มี geometric tolerance อยู่ที่ 0.07 ในโปรแกรม ABAQUS ค่า geometric tolerance คือการระบุระยะการเคลื่อนที่ของจุดแบบจำลองชิ้นส่วนเหล็กดังรูป 3.26 โดยระยะการเคลื่อนที่ตัวของจุดในแบบจำลองชิ้นส่วนสามารถคำนวณได้จากการนำค่า geometric tolerance คูณกับขนาดของแบบจำลองชิ้นส่วนเหล็ก

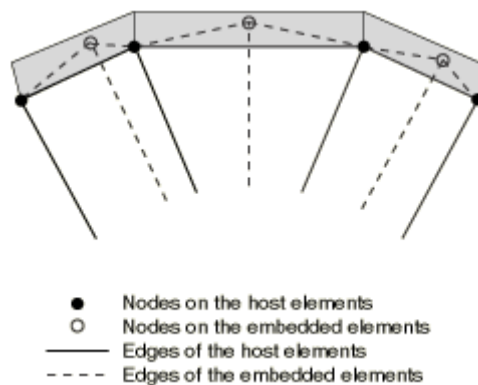


รูป 3.24 2 Node linear truss elements (T3D2)





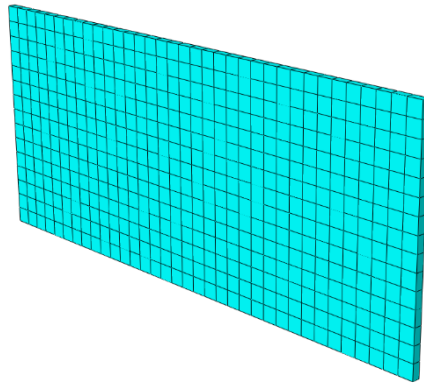
รูป 3.25 เหล็กเสริมในแบบจำลอง



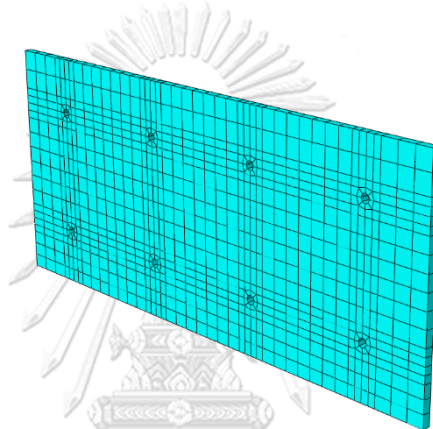
รูป 3.26 ลักษณะการเคลื่อนตัวของ geometric tolerance

### 3.2.3 แบบจำลองชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

การจำลองแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กนั้นใช้ Solid Elements เช่นเดียวกับคอนกรีต แต่ค่าความสัมพันธ์ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กกับคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นแตกต่างกันตามได้กล่าวมาข้างต้นในหัวข้อคุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก โดยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กนั้นได้ใช้ Solid Elements โดย Hexahedra Elements (C3D8R) เป็นทรงลูกบาศก์ที่ประกอบด้วยจุด 8 จุดและมีพื้นที่ผิว 6 ด้านโดยที่จุดแต่ละมี 3 DOFs ซึ่งหมายความว่าหนึ่งลูกบาศก์จะมี 24 DOFs มีลักษณะการจำลองดังรูป 3.27 และรูป 3.28 โดยแบบจำลองชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กเมื่อยึดติดแบบมีสลักเกลียวในบริเวณสลักเกลียวทำการแบ่งขนาดเอลิเมนต์ให้มีค่าใกล้เคียงกับขนาดเอลิเมนต์ของสลักเกลียว โดยประมาณ 5 มม.



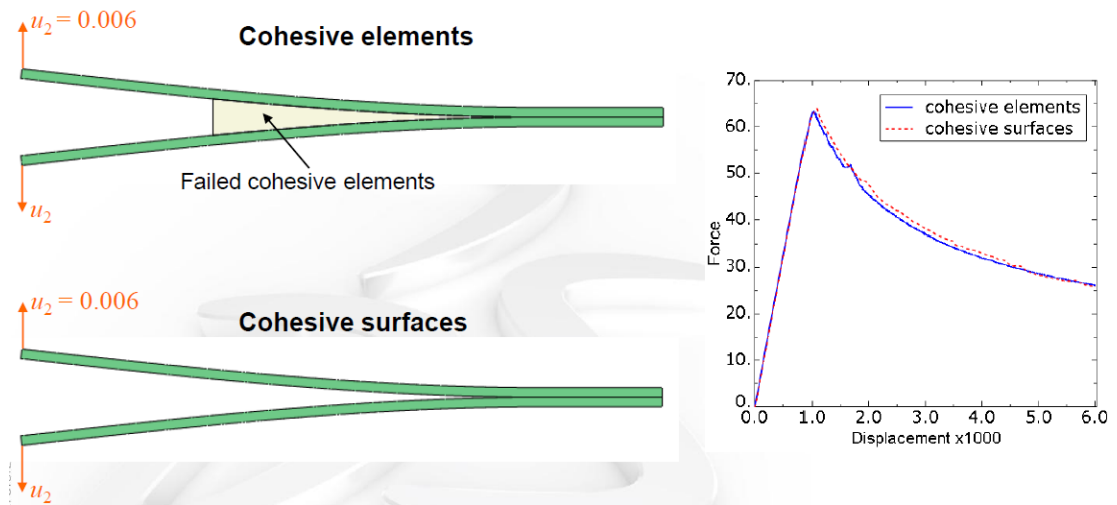
รูป 3.27 ลักษณะแบบจำลองชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก



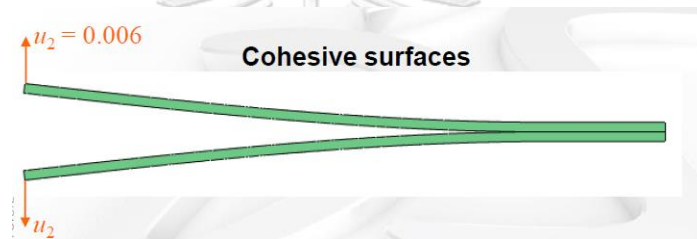
รูป 3.28 ลักษณะแบบจำลองชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กเมื่อยึดติดแบบมีสลักเกลียว

#### 3.2.4 แบบจำลองของรอยต่อ

วัสดุยึดเหนี่ยวระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กและแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กคือ อีพอกซี ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อีพอกซีของ Sikadur30 โดยใช้คุณสมบัติแรงยึดเหนี่ยวในการจำลองอีพอกซีนั้นสามารถทำการจำลองได้สองวิธีคือ การสร้างชิ้นส่วนยึดเกาะ (Cohesive elements) และ พื้นผิวยึดเกาะ (Cohesive surfaces) เนื่องจากข้อจำกัดของเวลาในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจึงเลือกใช้พื้นผิวยึดเกาะ (Cohesive surfaces) ที่ประหยัดเวลาในการวิเคราะห์มากกว่า โดยคุณสมบัติของรอยต่อสามารถทำการจำลองได้ด้วย โดยตัวแปรที่ต้องการได้แก่  $K_{nn}$ ,  $K_{ss}$ ,  $K_{tt}$  เมื่อค่า  $K_{nn}$  คือค่าความแข็ง (normal stiffness) ในแกนปกติ และ  $K_{ss}$ ,  $K_{tt}$  คือค่าความแข็ง (Tangential stiffness) ในแนวแกนอื่น



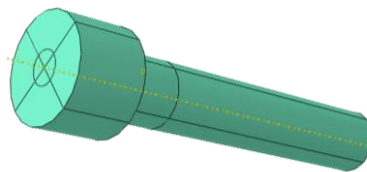
รูป 3.29 ชนิดรอยต่อในการจำลอง



รูป 3.30 ลักษณะรอยต่อในการจำลอง

### 3.2.5 แบบจำลองสลักเกลียว

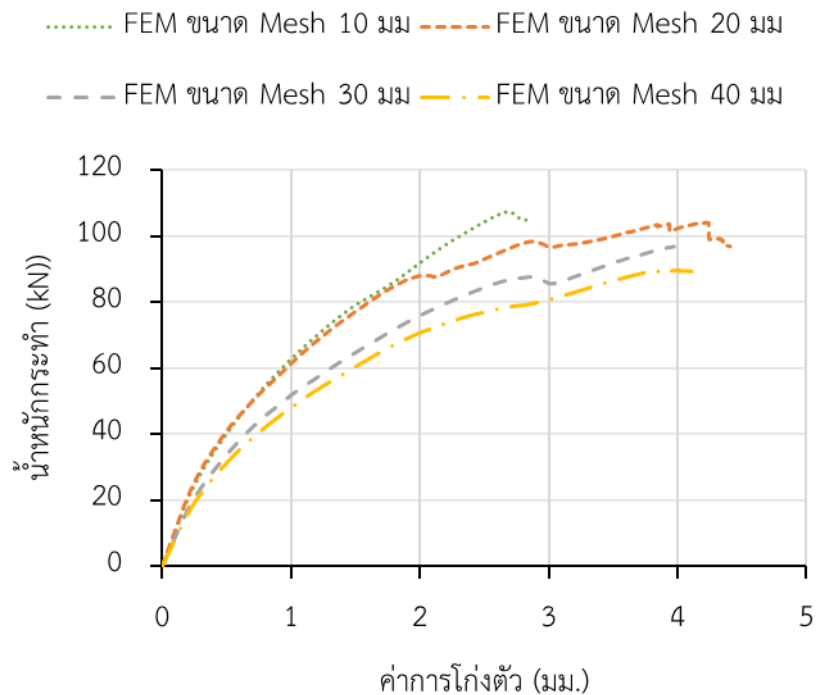
การจำลองสลักเกลียวในโปรแกรม ABAQUS เลือกใช้ Solid Elements เพื่อตอบสนองกับพฤติกรรมของสลักเกลียวโดย Solid Elements 3 มิติ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ Hexahedra Elements (C3D8R) เป็นทรงลูกบาศก์ที่ประกอบด้วยจุด 8 จุดและมีพื้นที่ผิว 6 ด้านโดยที่จุดแต่ละมี 3 DOFs ซึ่งหมายความว่าหนึ่งลูกบาศก์จะมี 24 DOFs โดยสลักเกลียวมีขนาด 12 มม. ยาว 150 มม. และ 10 มม. ยาว 150 มม. การแบ่งขนาดเอลิเมนต์ของสลักเกลียวทำการแบ่งขนาด 5 มม.



รูป 3.31 ลักษณะสลักเกลียวในการจำลอง

### 3.3 ขนาดของเอลิเมนต์

ผู้วิจัยได้ศึกษาขนาดของเอลิเมนต์ (Mesh) เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยวิเคราะห์คาน ที่ขนาดเอลิเมนต์ของคาน B1 เท่ากับ 10 20 30 และ 40 มม. ผลการวิเคราะห์ของเอลิเมนต์ขนาด ต่างๆ เทียบกับผลการทดลองแสดงในรูป 3.32 และทำการเปรียบเทียบน้ำหนักกระทำสูงสุดได้ดัง ตาราง 3.1 พบว่า ขนาดเอลิเมนต์การลดขนาดของเอลิเมนต์ 10 มม. และ 20 มม. มีน้ำหนักกระทำ สูงสุดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่ขนาดเอลิเมนต์ 10 มม. ใช้เวลาในการวิเคราะห์สูง จึงเลือกใช้ ขนาดเอลิเมนต์ 20 มม. ในแบบจำลอง



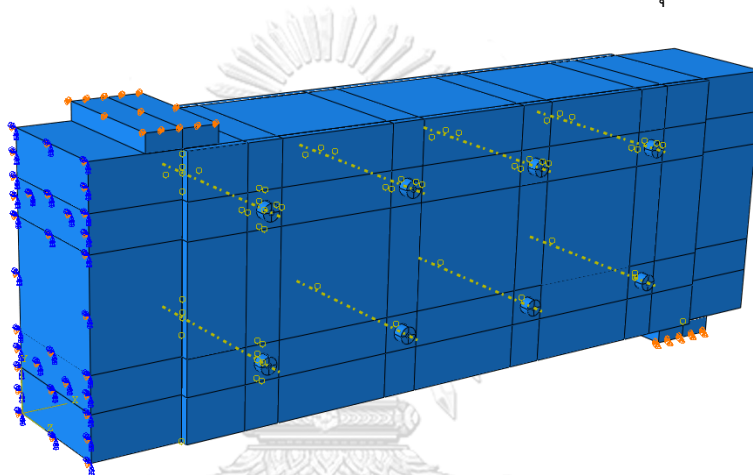
รูป 3.32 อิทธิพลของขนาดเอลิเมนต์ต่อผลการวิเคราะห์กำลังของคาน B1

ตาราง 3.1 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คาน B1 ที่ขนาดเอลิเมนต์ต่าง ๆ

| คาน     | ขนาดเอลิเมนต์ (มม.) | น้ำหนักกระทำ (kN) | ค่าการโก่งตัว (มม.) |
|---------|---------------------|-------------------|---------------------|
| Mesh 10 | 10                  | 107.45            | 2.83                |
| Mesh 20 | 20                  | 104.11            | 4.40                |
| Mesh 30 | 30                  | 96.88             | 3.97                |
| Mesh 40 | 40                  | 89.78             | 4.11                |

### 3.4 เงื่อนไขขอบเขต

เงื่อนไขขอบเขตในการจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเป็นไปตามรูป 3.33 โดยใช้ฐานรองรับคานขนาด 80 มม. เนื่องจากได้ทำการจำลองด้วยขนาดฐานรองรับที่เล็กกว่านี้แล้วมีผลของการเสียรูปที่ผิดปกติ โดยพื้นผิวด้านล่างของฐานรองรับ (Support) เป็นพื้นผิวรองรับที่ป้องกันการเคลื่อนที่ 3 แนวแกน (Fix support) และ พื้นที่ถ่ายแรงด้านบนเป็นจุดรองรับป้องกันการเคลื่อนที่ 2 แกน (Pin Support) โดยพื้นที่ผิวสัมผัสกับคานเป็นพื้นผิวเรียบ (Frictionless) แบบ Hard contact ส่วนหน้าตัดคานมีเงื่อนไขขอบเขตแบบ XSYMM ( $U_1=U_{R2}=U_{R3}=0$ ) คือพื้นผิวรองรับที่ป้องกันการเคลื่อนที่แนวแกนและการหมุนของแกนอื่น



รูป 3.33 เงื่อนไขขอบเขตในการจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใย

### 3.5 คุณสมบัติของวัสดุ

#### 3.5.1 คุณสมบัติของคอนกรีต

งานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองความเสียหายของวัสดุ แบบ Concrete damage plasticity model มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังนี้

ค่าขยายมุม ( $\psi$ ) คือการเสียรูปในแนวเอียงของพื้นผิว โดยอธิบายจากมุมแรงเสียดทานภายในของคอนกรีตซึ่งเท่ากับ 36 องศา

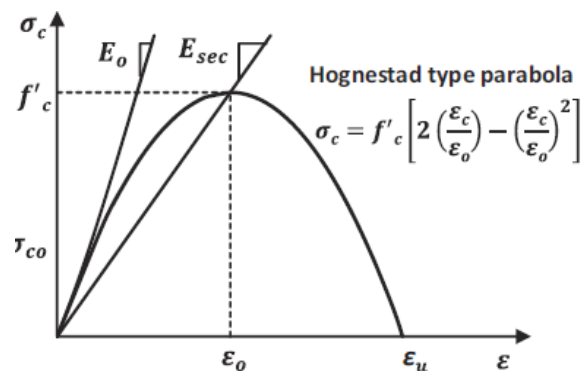
ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการไหล ( $\epsilon$ ) เป็นความผิดปกติใช้เพื่อเป็นตัวกำหนดรูปร่างและความต้านทานของพื้นผิว โดยหากหาค่าไม่ได้ให้ประมาณเท่ากับ 0.1

อัตราส่วนของความเค้น ( $\sigma_{bo} / \sigma_{co}$ ) คืออัตราส่วนความแข็งแรงของการรับแรงในแนวแกน โดยค่ามาตรฐานมีค่าเท่ากับ 1.16

อัตราส่วนระหว่างระยะห่างของแกนกับแรงกดและแรงดึง ( $K_c$ ) มีค่าที่แนะนำคือ 0.667 และตัวแปรความเหนียว ( $\mu$ ) มีค่าเท่ากับ 0.001

### 3.5.1.1 คุณสมบัติการรับแรงอัดของคอนกรีต

Hognestad [28] ได้ศึกษาคุณสมบัติในการรับแรงอัดของคอนกรีตนำเสนอแบบจำลองตั้งการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถหาได้จากสมการ (3.1)



รูป 3.34 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของหน่วยแรงอัดในแบบจำลอง [28]

$$\sigma_c = f'_c \left[ 2 \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right) - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

โดย

$\epsilon_0$  คือค่าความเครียดที่จุดสูงสุด  $\epsilon_0 = 2f'_c / E_c$

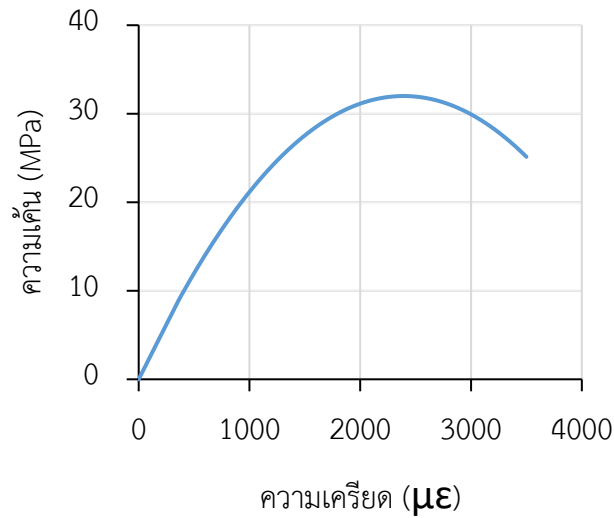
$\epsilon_u$  คือค่าความเครียดที่จุดประลัย

$E_c$  คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต มีค่าเท่ากับ  $E = 4730\sqrt{f'_c}$

คุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้เป็นไปดังรูป 3.35 ซึ่งจะได้พฤติกรรมการรับกำลังอัดของคอนกรีตที่นำมาใช้ในแบบจำลองการประมาณค่ากำลังการรับแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังรูป 3.35

ตาราง 3.2 ตารางคุณสมบัติของคอนกรีต

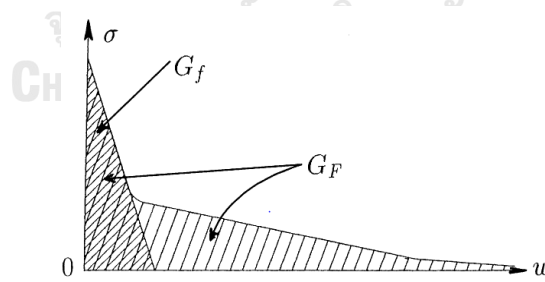
| โมดูลัสยืดหยุ่น<br>(GPa) | อัตราส่วนปัวซอง | กำลังรับแรงอัด<br>(MPa) | กำลังรับแรงดึง<br>(MPa) | $G_f$<br>(N/mm) |
|--------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| 27                       | 0.2             | 32                      | 3.26                    | 1.79            |



รูป 3.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตในการวิเคราะห์

### 3.5.1.2 คุณสมบัติการรับแรงดึงของคอนกรีต

ในงานวิจัยนี้ใช้คุณสมบัติ Fracture Energy ( $G_f$ ) โดยที่  $G_f$  คือค่าความสามารถในการรับแรงหลังจากเกิดการรอยแตกของวัสดุ สามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้นและความกว้างรอยแตกดังรูป 3.36 Bazant และ Becq-Giraudon [29] นำเสนอสมการคำนวณค่า  $G_f$  ดังสมการ (3.2) ค่า  $G_f$  ที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในรูป 3.36



รูป 3.36 คุณสมบัติในการรับแรงดึงของคอนกรีต [29]

$$G_f = (0.0469d_a^2 - 0.5d_a + 26)\left(\frac{f'_c}{10}\right)^{0.7} \quad (3.2)$$

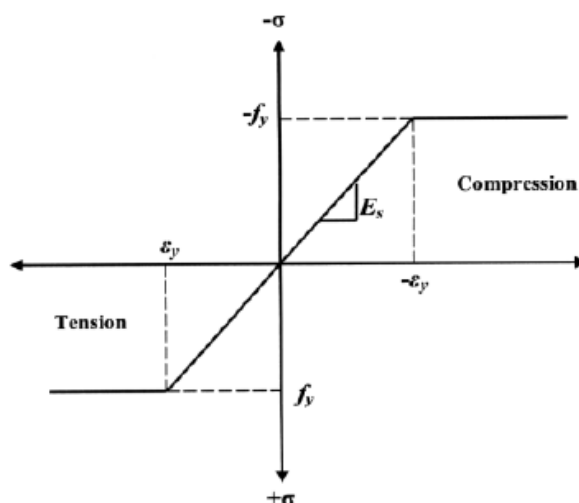
โดยที่ค่า

$G_f$  คือ ค่า Fracture Energy

$d_a$  คือ ขนาดหินใหญ่ที่สุด

### 3.5.2 คุณสมบัติของเหล็ก

เหล็กเสริมรับแรงดึงที่ใช้ คือ DB25 มีค่าความเค้นครากเท่ากับ  $502 \text{ N/mm}^2$  ในขณะที่เหล็กเสริมรับแรงอัดและเหล็กปลอกใช้เหล็ก RB6 ซึ่งมีความเค้นครากเท่ากับ  $235 \text{ N/mm}^2$  โดยมีพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดและแรงดึงเป็นไปดังรูป 3.37 มีคุณสมบัติของเหล็กที่ใช้ดังตาราง 3.3



รูป 3.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในแรงอัดและแรงดึง

ตาราง 3.3 ตารางคุณสมบัติของเหล็ก

| ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง<br>(มม.) | โมดูลัสยืดหยุ่น<br>(GPa) | อัตราส่วนปัวซอง | $f_y$<br>(MPa) | $\epsilon_y$<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|-------------------------------|--------------------------|-----------------|----------------|-----------------------------------|
| 25                            | 200                      | 0.3             | 502            | 1200                              |
| 6                             | 200                      | 0.3             | 235            | 2000                              |

### 3.5.3 คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

งานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองความเสียหายของวัสดุ แบบ Concrete damage plasticity model มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังนี้

ค่าขยายมุม ( $\nu$ ) คือการเสียรูปในแนวเอียงของพื้นผิว โดยอธิบายจากมุมแรงเสียดทานภายในของคอนกรีตซึ่งเท่ากับ 36 องศา

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการไหล ( $\epsilon$ ) เป็นความผิดปกติใช้เพื่อเป็นตัวกำหนดรูปร่างและความต้านทานของพื้นผิว โดยหากหาค่าไม่ได้ให้ประมาณเท่ากับ 0.1



อัตราส่วนของความเค้น ( $\sigma_{bo} / \sigma_{co}$ ) คืออัตราส่วนความแข็งแรงของการรับแรงในแนวแกน โดยค่ามาตรฐานมีค่าเท่ากับ 1.16

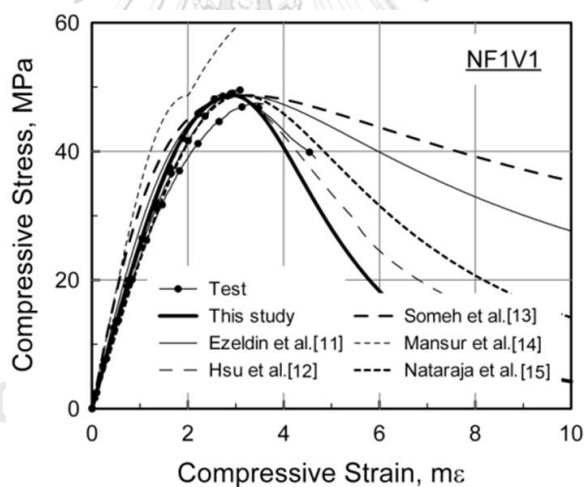
อัตราส่วนระหว่างระยะห่างของแกนกับแรงกดและแรงดึง ( $K_c$ ) มีค่าที่แนะนำคือ 0.667 และ

ตัวแปรความเหนียว ( $\mu$ ) มีค่าเท่ากับ 0.001

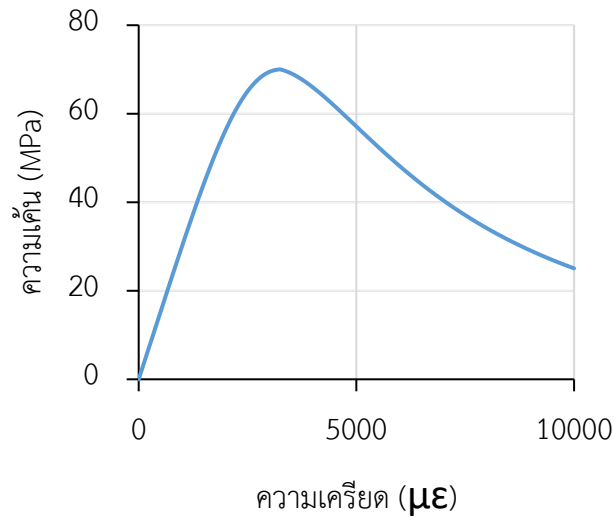
### 3.5.3.1 คุณสมบัติการรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

งานวิจัยนี้ได้ใช้สมการจากงานวิจัยของ Lee et al. [7] ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นดังรูป 3.38 ความเนืองจากมีความใกล้เคียงของคุณสมบัติการรับแรงอัดของคอนกรีตและชนิดของเส้นใย โดยสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นได้จากสมการ (3.4) และ (3.8) โดยเส้นใยเหล็กมีคุณสมบัติดัง

ตาราง 3.4 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังรูป 3.39



รูป 3.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้น [7]



รูป 3.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กในการวิเคราะห์

$$E_c = \left( -367V_f \frac{l_f}{d_f} + 5520 \right) f_c'^{0.41} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_0 = \left( 0.0003V_f \frac{l_f}{d_f} + 0.0018 \right) f_c'^{0.12} = (0.0003RI + 0.0018) f_c'^{0.12} \quad (3.4)$$

$$A = B = \frac{1}{1 - \left( \frac{f_c'}{\varepsilon_0 E_c} \right)} \quad \text{สำหรับ } \varepsilon_c / \varepsilon_0 \leq 1.0 \quad (3.5)$$

$$A = 1 + 0.723 \left( V_f \frac{l_f}{d_f} \right)^{-0.957} \quad \text{สำหรับ } \varepsilon_c / \varepsilon_0 > 1.0 \quad (3.6)$$

$$B = \left( \frac{f_c'}{50} \right)^{0.064} \left[ 1 + 0.882 \left( V_f \frac{l_f}{d_f} \right)^{-0.882} \right] \geq A \quad \text{สำหรับ } \varepsilon_c / \varepsilon_0 > 1.0 \quad (3.7)$$

$$f_c = f_c' \left[ \frac{A(\varepsilon_c / \varepsilon_0)}{A - 1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_0)^B} \right] \quad (3.8)$$

เมื่อ

$f_c'$  คือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (MPa)

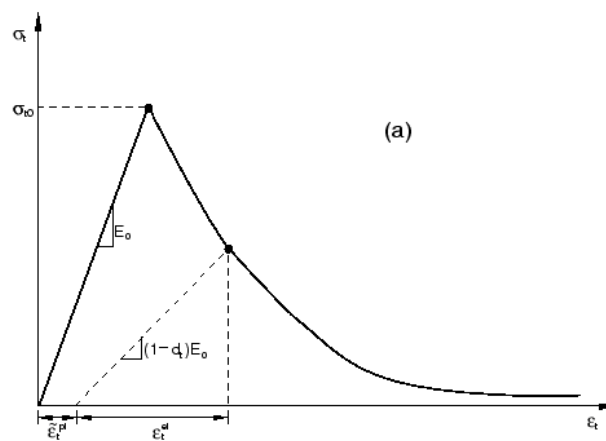
$A$  และ  $B$  คือตัวแปรคูณปรับแก้ค่า  $f_c'$

ตาราง 3.4 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก

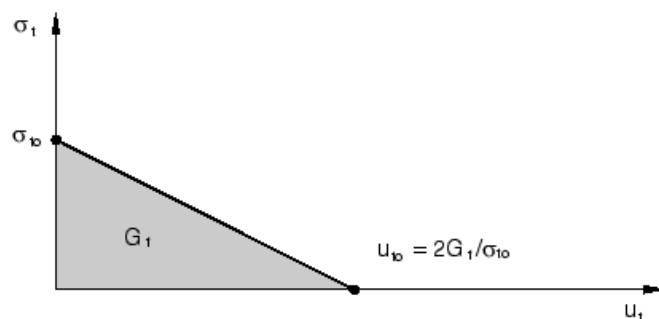
| ชนิด  | ความยาว<br>(มม) | เส้นผ่าศูนย์กลาง<br>(มม) | อัตราส่วน | กำลังในการรับแรง<br>ดึง (MPa) | $E$ (GPa) | ลักษณะ<br>ของเส้นใย |
|-------|-----------------|--------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|---------------------|
| เหล็ก | 35              | 0.55                     | 65        | 1050                          | 210       | Hooked              |

### 3.5.3.2 คุณสมบัติการรับแรงดึงของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

งานวิจัยนี้ได้ใช้พลังงานการแตกหัก (Fracture energy) ในการจำลองคุณสมบัติการรับแรงดึงของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กมีลักษณะดังรูป 3.40 และรูป 3.41 โดยการรับแรงดึงในช่วงแรกจะมีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นดังรูป 3.40 และเมื่อเกิดรอยแตกลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการแตกหักและระยะรอยแตกดังรูป 3.41



รูป 3.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้น



รูป 3.41 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการแตกหักและระยะรอยแตก

สมการในการหา Fracture energy ( $G_f$ ) สามารถหาได้จากสมการของงานวิจัยในอดีต [11] ดังสมการ (3.10) โดยคุณสมบัติการรับแรงดึงของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กในการจำลองมีคุณสมบัติ ดังตาราง 3.5

$$G_f = \frac{\int_0^{25} F(\delta) d\delta}{B \cdot H} \quad (3.9)$$

$$F(\delta) = C_1 \delta^{C_2} e^{-C_3 \delta^{C_4}} \quad (3.10)$$

เมื่อ

$G_f$  คือ Fracture energy (N/mm)

$C_1$  คือตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีต โดย  $C_1 = 2F_{cr}$  ( $F_{cr}$  คือแรงที่ทำให้เกิด Macro-crack)

$C_2$   $C_3$  และ  $C_4$  คือตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเส้นใยและปริมาณเส้นใย

$C_2$  เท่ากับ 0.1-0.5 ตามกำลังของเส้นใย

$C_3 = f_{fm}/1000$  ( $f_{fm}$  คือกำลังของเส้นใย)

$C_4 = 0.4027V^{0.292}$  ( $V$  คือปริมาณร้อยละเส้นใย)

ค่า Poisson's ratio สำหรับคอนกรีตเสริมเส้นใยมีค่าเท่ากับ 0.31 ตาม Padmarajaiah [16]

ตาราง 3.5 คุณสมบัติการรับแรงดึงของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กในการจำลอง

| โมดูลัสยืดหยุ่น<br>(GPa) | อัตราส่วน<br>ปัวซอง | กำลังรับแรงอัด<br>(MPa) | กำลังรับแรงดึง<br>(MPa) | ปริมาณเส้นใย<br>(%) | $G_f$<br>(N/mm) |
|--------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------|
| 31                       | 0.31                | 70                      | 5.4                     | 0                   | 4.05            |
| 31                       | 0.31                | 70                      | 5.4                     | 1.0                 | 7.30            |
| 31                       | 0.31                | 70                      | 5.4                     | 1.5                 | 8.82            |

### 3.5.4 คุณสมบัติของสลักเกลียว

สลักเกลียวขนาด 10 และ 12 มม. ยาว 150 มม. ทำการยึดตามคุณสมบัติของ Anchor rod (HIT-V M12x150 grade 5.8) มีคุณสมบัติในการจำลองดังตาราง 3.6

ตาราง 3.6 คุณสมบัติสลักเกลียวที่ใช้ในการจำลอง

| ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง<br>(มม.) | โมดูลัสความ<br>ยืดหยุ่น<br>(GPa) | อัตราส่วนปัวซอง | $f_y$<br>(MPa) | $\epsilon_y$<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|-------------------------------|----------------------------------|-----------------|----------------|-----------------------------------|
| 10                            | 200                              | 0.3             | 520            | 2500                              |
| 12                            | 200                              | 0.3             | 520            | 2500                              |

### 3.5.5 คุณสมบัติของรอยต่อ

งานวิจัยนี้ได้ใช้อีพอกซีของ Sikadur30 และสลักเกลียว Injectable mortar (HIT-HY 200-R) ในการยึดติดคานคอนกรีตและแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก โดยกาวอีพอกซีทำหน้าที่เป็นตัวยึดเหนี่ยวระหว่างคานคอนกรีตเดิมและแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก จากคู่มือ ABAQUS พบว่าการจำลองการสร้างชิ้นส่วนยึดเกาะและพื้นผิวยึดเกาะมีความใกล้เคียงกัน ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การจำลองด้วยวิธีพื้นผิวยึดเกาะ โดยคุณสมบัติของอีพอกซีที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นไปดังตาราง 3.7 นอกจากนี้อีพอกซีมีค่าระยะยึดก่อนขาดประมาณ 0.4 มม. (ตามมาตรฐาน ISO 75) โมดูลัสความยืดหยุ่นแรงดึง 5000 N/mm<sup>2</sup> (ตามมาตรฐาน ISO527) และโมดูลัสความยืดหยุ่นแรงเฉือน 4600 N/mm<sup>2</sup> (ตามมาตรฐาน ASTM D695) ค่าแรงยึดเกาะ 4 N/mm<sup>2</sup> แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นที่ผิวของคานคอนกรีตและสลักเกลียว และพื้นที่ผิวของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยและสลักเกลียว ได้ใช้คุณสมบัติของกาว Injectable mortar (HIT-HY 200-R) ช่วยในการยึดเหนี่ยว โดยมีคุณสมบัติในการรับแรงดึงตามระยะในการฝัง โดยหากมีการฝังตามระยะมาตรฐาน 110 มม. จะสามารถรับแรงดึงได้ 20 kN และแรงเฉือน 12 kN หากฝังที่ระยะน้อยสุด 70 มม. จะสามารถรับแรงดึงได้ 11.7 kN และรับแรงเฉือนได้ 12 kN โดยมีค่า  $K_{nn}$ ,  $K_{ss}$ ,  $K_{tt}$  เท่ากับค่า  $G$  ส่วนด้วยความหนาของกาวอีพอกซี

ตาราง 3.7 คุณสมบัติแรงยึดเหนี่ยวของอิพอกซี (Hilti)

| ข้อมูลในการออกแบบ |                   |                                | หน่วย | ขนาดของสลักเกลียว (นิ้ว) |      |      |     |     |     |     |
|-------------------|-------------------|--------------------------------|-------|--------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|
|                   |                   |                                |       | 3/8                      | 1/2  | 5/8  | 3/4 | 7/8 | 1   | 5/4 |
| ระยะฝังขั้นต่ำ    |                   |                                | มม.   | 60                       | 70   | 79   | 89  | 89  | 102 | 127 |
| ระยะฝังสูงสุด     |                   |                                | มม.   | 191                      | 254  | 318  | 381 | 445 | 508 | 635 |
| คอนกรีต<br>แห้ง   | อุณหภูมิช่วง<br>1 | แรงยึด<br>เหนี่ยว <sup>1</sup> | MPa   | 11                       | 10.8 | 10.4 | 10  | 9.7 | 9.4 | 9   |



## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของคานตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในบทนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์พฤติกรรมรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยภายหลังจากการวิเคราะห์ ผู้วิจัยได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจากการเปรียบเทียบน้ำหนักกระทำ ค่าการโก่งตัว ความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงดึง (DB25) ความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (RB6) และรูปแบบรอยแตก (crack pattern) กับผลการทดลองในอดีต [20] และ [21]

จากผลการทดลองในอดีตของคาน B1 ถึงคาน B9 พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักกระทำของคานคือปริมาณเส้นใยและจำนวนสลักเกลียว โดยมีความแตกต่างของปริมาณเส้นใยและจำนวนสลักเกลียวดังตาราง 4.1 จากการเปรียบเทียบปริมาณเส้นใยของคาน B3 และ B6 ที่มีความแตกต่างของปริมาณเส้นใยที่ 1.5% และ 1.0% พบว่าคาน B3 มีความสามารถในการรับแรงกระทำ 222.73 kN และคาน B6 มีความสามารถในการรับแรงกระทำ 200.18 kN ตามลำดับ การเปรียบเทียบจำนวนสลักเกลียวของคาน B3 และ B7 ที่มีจำนวนสลักเกลียว 8 และ 6 สลักเกลียวพบว่า คาน B3 มีความสามารถในการรับน้ำหนักกระทำ 222.73 kN และคาน B7 มีความสามารถในการรับน้ำหนักกระทำ 202.78 kN โดยตัวแปรที่ไม่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักกระทำของคานคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักเกลียว คาน B7 และ B9 มีความสามารถในการรับน้ำหนักกระทำ 202.78 kN และ 202.17 kN ตามลำดับดังแสดงในตาราง 4.1

#### 4.1 การเปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวของคาน

จากผลการทดลองในอดีต [20] และ [21] ของคาน B1 ถึงคาน B9 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ความสามารถในการรับน้ำหนักกระทำมีความใกล้เคียงกัน ผลการวิเคราะห์น้ำหนักกระทำที่มีความแม่นยำสูงสุดคือคาน B8 โดยจากผลการทดลองคาน B8 สามารถรับน้ำหนักกระทำสูงสุด 218.9 kN ผลการวิเคราะห์คาน B8 สามารถรับน้ำหนักกระทำสูงสุด 219.3 kN มีค่าความแม่นยำในการวิเคราะห์อยู่ที่ 100% ผลการวิเคราะห์น้ำหนักกระทำที่มีคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือคาน B5 โดยจากผลการทดลองคาน B5 สามารถรับน้ำหนักกระทำสูงสุด 217.8 kN ผลการวิเคราะห์คาน B5 สามารถรับน้ำหนักกระทำสูงสุด 204.7 kN มีค่าความแม่นยำในการวิเคราะห์อยู่ที่ 94% ตามตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ตารางเปรียบเทียบผลการทดลอง [20] และ [21] กับผลการวิเคราะห์

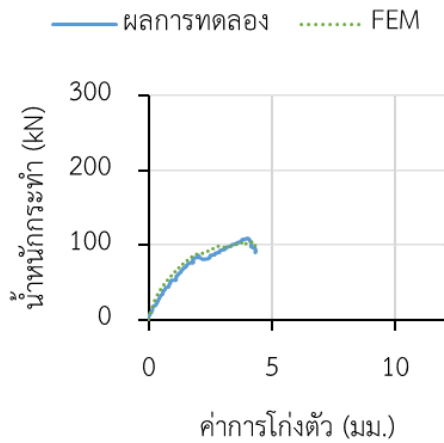
| คาน | จำนวน<br>สลักเกลียว | ขนาดสลัก<br>เกลียว<br>(มม.) | คุณสมบัติของ<br>แผ่นคอนกรีต | น้ำหนักกระทำสูงสุด  |                   |                   | ค่าการโก่งตัว<br>(มม.) |                | ความเครียด<br>ของเหล็ก<br>เสริมรับแรง<br>ดึง DB25<br>( $\mu\epsilon$ ) |                  |                  |
|-----|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|------------------------|----------------|--|------------------|------------------|
|     |                     |                             |                             | ปริมาณเส้นใย<br>(%) | $P_{exp}$<br>(kN) | $P_{fem}$<br>(kN) | $P_{fem}/P_{exp}$      | $\Delta_{exp}$ | $\Delta_{fem}$   | $\epsilon_{exp}$ | $\epsilon_{fem}$ |
| B1  | -                   | -                           | -                           | -                   | 108.4             | 104.1             | 0.96                   | 4.34           | 4.40   | 1523             | 1456             |
| B2  | -                   | -                           | 1.5                         | -                   | 206.60            | 201.96            | 0.98                   | 12.06          | 10.60  | 2713             | 2467             |
| B3  | 8                   | 12                          | 1.5                         | -                   | 222.73            | 218.11            | 0.98                   | 8.56           | 8.38   | 2730             | 2970             |
| B4  | 8                   | 12                          | 0                           | -                   | 205.98            | 207.40            | 1.01                   | 10.49          | 6.92   | -                | 2408             |
| B5  | 8                   | 10                          | 1.5                         | -                   | 217.76            | 204.73            | 0.94                   | 5.98           | 5.52   | 2035             | 2047             |
| B6  | 8                   | 12                          | 1.0                         | -                   | 200.18            | 204.04            | 1.02                   | 3.60           | 6.62   | 1712             | 1805             |
| B7  | 6                   | 12                          | 1.5                         | -                   | 202.78            | 204.02            | 1.01                   | 5.78           | 6.53   | 2303             | 2512             |
| B8  | 4                   | 12                          | 1.5                         | -                   | 218.98            | 219.26            | 1.00                   | 5.34           | 6.60   | 1687             | 1900             |
| B9  | 6                   | 10                          | 1.5                         | -                   | 202.17            | 205.65            | 1.02                   | 5.78           | 5.73   | 2429             | 2552             |

การวิเคราะห์ค่าการโก่งตัวของคานพบว่า มีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง โดยจากผลการทดลองในอดีตคานที่มีการโก่งตัวสูงสุดคือคาน B2 ซึ่งมีค่าการโก่งตัวสูงสุดเท่ากับ 12.06 มม. และคานที่มีการโก่งตัวต่ำสุดคือคาน B6 ซึ่งมีค่าการโก่งตัวต่ำสุดเท่ากับ 3.60 มม. การวิเคราะห์ค่าการโก่งตัวคาน B2 พบว่าผลการวิเคราะห์ค่าการโก่งตัวมีค่าเท่ากับ 10.60 มม. และผลการวิเคราะห์ค่าการโก่งตัวคาน B6 มีค่าเท่ากับ 6.62 มม.

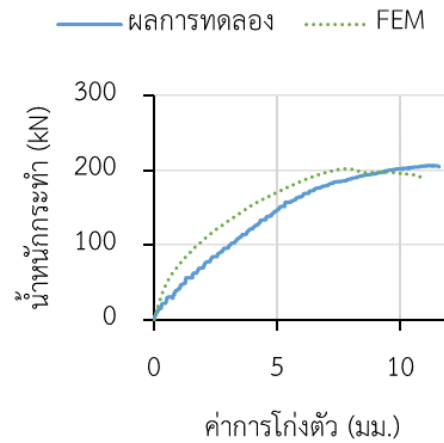
การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวของคานจากผลการทดลองในอดีตกับผลการวิเคราะห์ดังรูป 4.1 พบว่าผลการวิเคราะห์ของแต่ละคานมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการทดลอง โดยผลการวิเคราะห์คาน B2 จะเห็นได้ว่าเมื่อน้ำหนักกระทำสูงสุด แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวมีค่าลดลงเนื่องจากรอยต่อที่ใช้ในการจำลองเกิดความเสียหายมากกว่ารอยต่อของคานจากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คานที่มีสลักเกลียว พบว่าส่วนมากช่วงแรกคานจะมีความแข็ง (Stiffness) มากกว่า แต่เมื่อการโก่งตัว



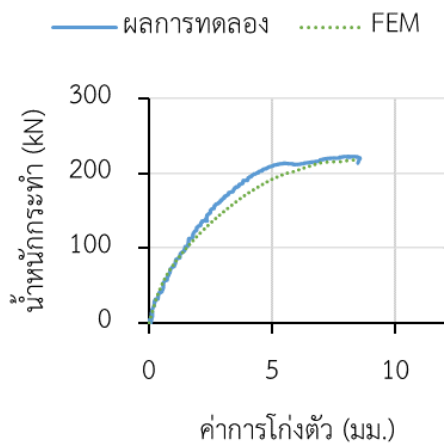
เพิ่มขึ้นผลการวิเคราะห์ที่มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากรอยต่อสลักเกลียวในการจำลองเมื่อได้รับความเสียหายแล้วทำให้คานามีค่าความแข็งแรงลดลง ทำให้แนวโน้มมีค่าลดลง



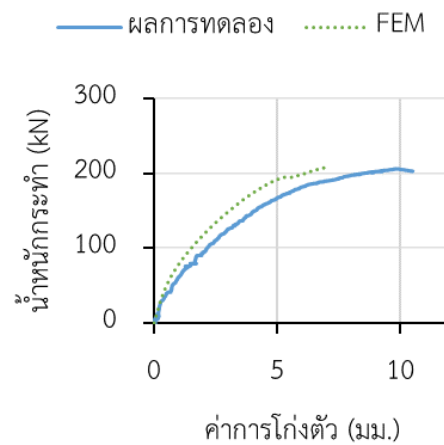
(ก) B1



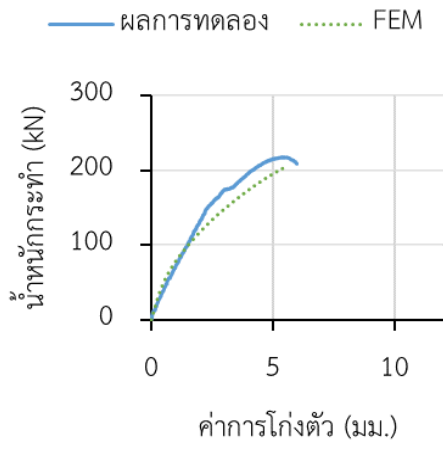
(ข) B2



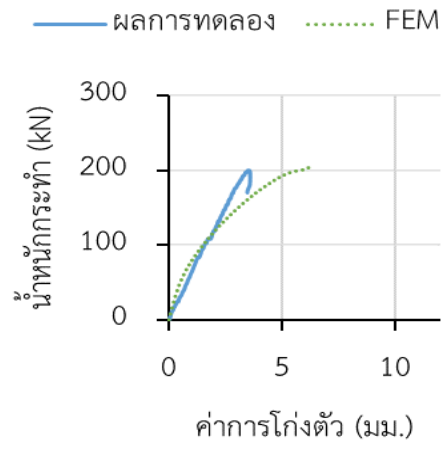
(ค) B3



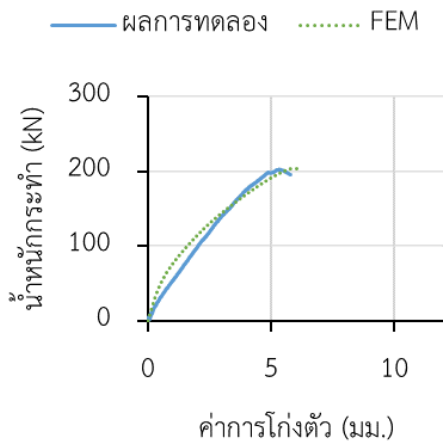
(ง) B4



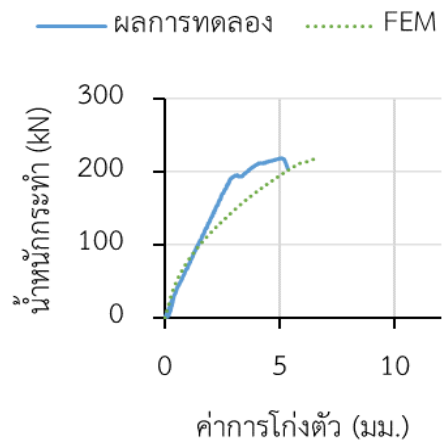
(จ) B5



(ฉ) B6

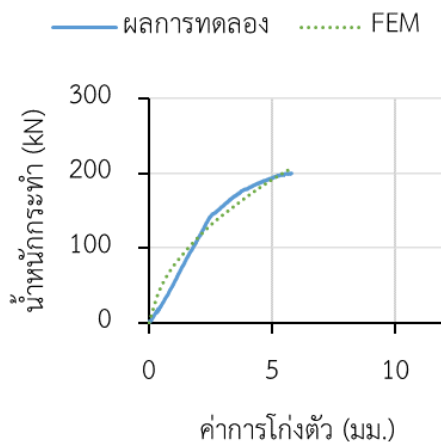


(ซ) B7



(ฅ) B8





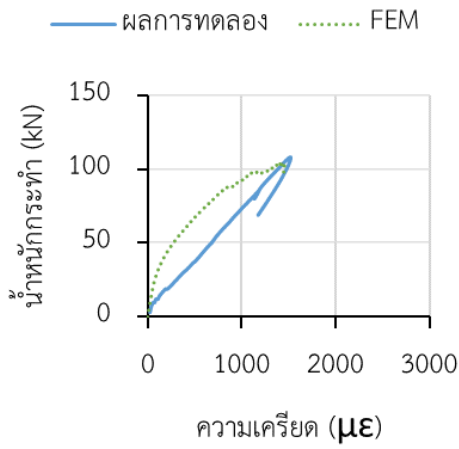
(ณ) B9

รูป 4.1 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและค่าโก่งตัวของคาน B1 ถึง B9

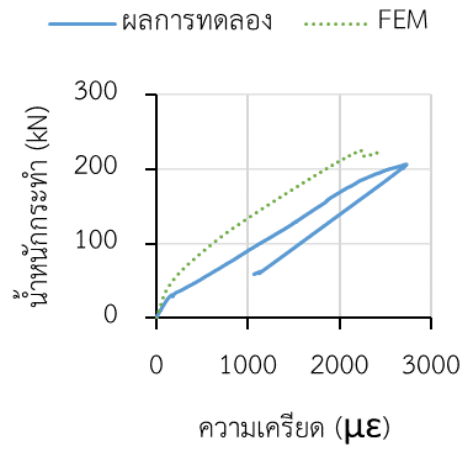
#### 4.2 การเปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึง DB25

เหล็กเสริม DB25 ที่นำมาใช้มีค่าความเครียดที่จุดครากเท่ากับ  $2000 \mu\epsilon$  จากผลการทดลองพบว่า ความเครียดของเหล็กเสริมในคาน B2, B3, B5, B7 และ B9 ถึงจุดครากที่แรงกระทำสูงสุด คานที่รับน้ำหนักกระทำสูงสุดตามตาราง 4.1 แล้วเหล็กเสริมรับแรงดึงไม่ถึงจุดครากได้แก่คาน B1, B6 และ B8 และคานที่ไม่มีผลการทดลองได้แก่คาน B4

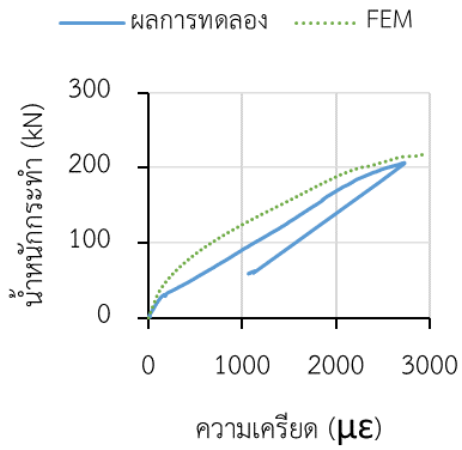
ผลการวิเคราะห์พบว่าคาน B2, B3, B5, B7 และ B9 เหล็กเสริมรับแรงดึงมีค่าความเครียดถึงจุดครากเหมือนผลการทดลองในอดีต และผลการวิเคราะห์คาน B1 และ B6 พบว่าค่าความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงไม่ถึงจุดครากเหมือนผลการทดลองในอดีต ดังนั้นการจำลองคานคอนกรีตเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กสามารถวิเคราะห์ความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงดึง DB25 ได้มีความใกล้เคียงดังรูป 4.2



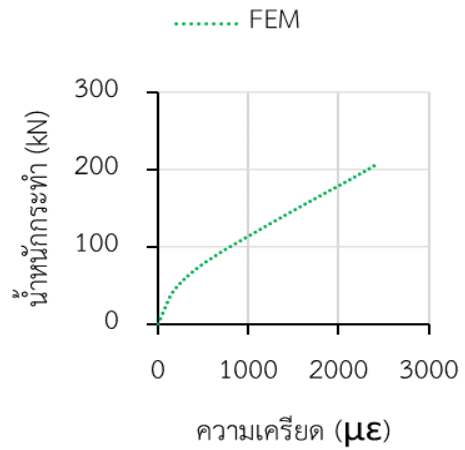
(ก) B1



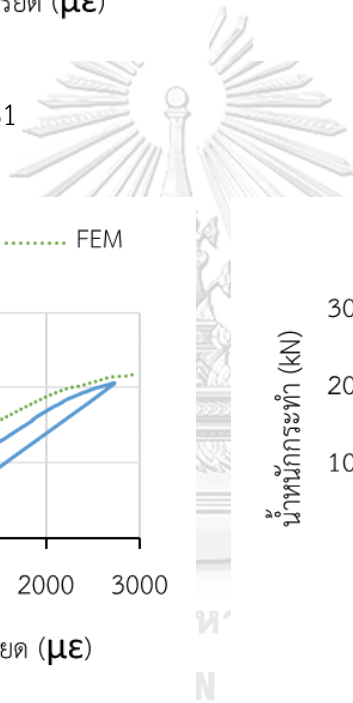
(ข) B2

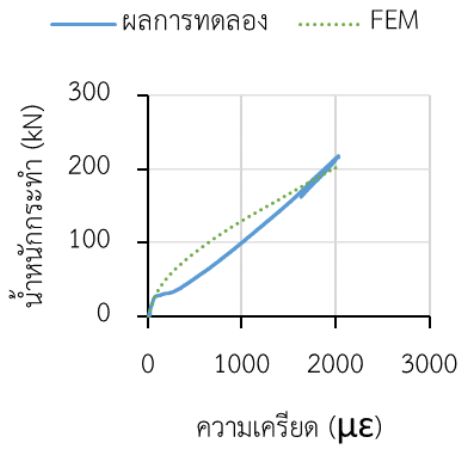


(ค) B3

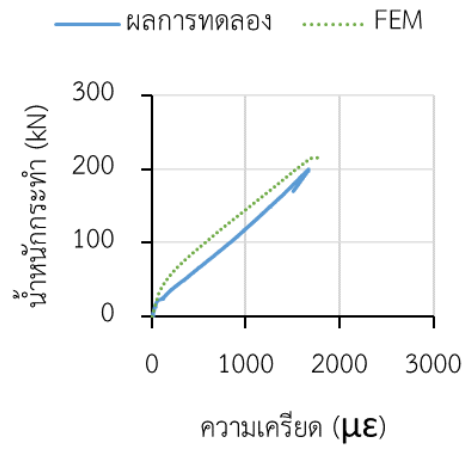


(ง) B4

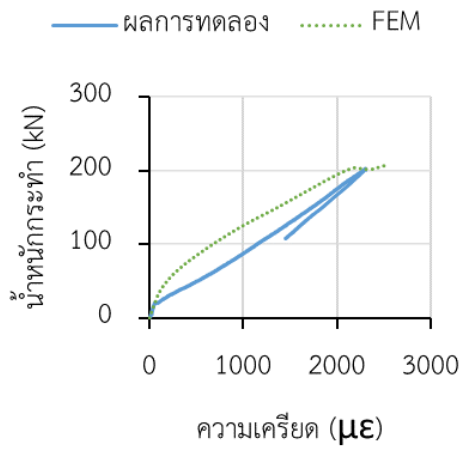




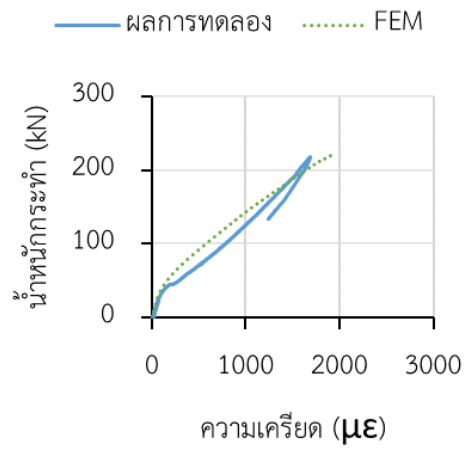
(จ) B5



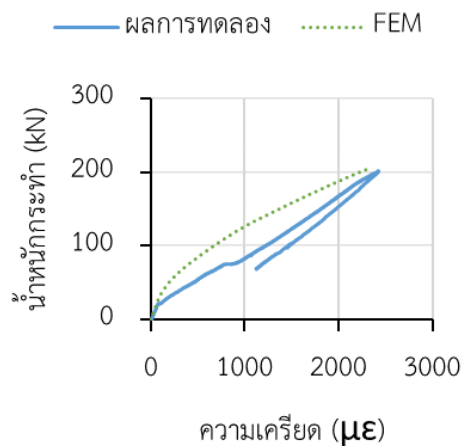
(ฉ) B6



(ช) B7



(ซ) B8

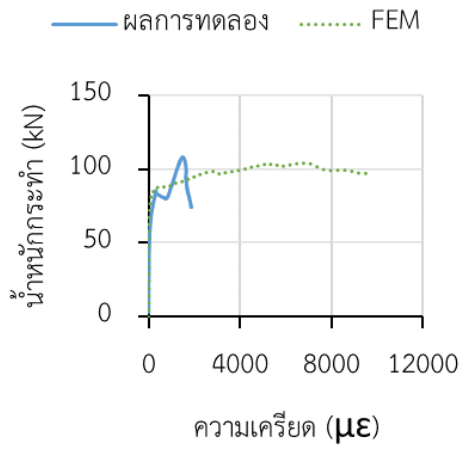


(ณ) B9

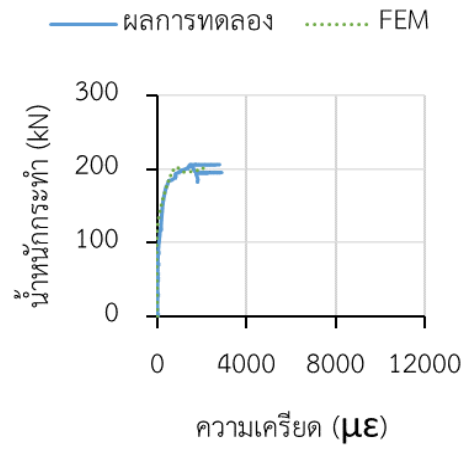
รูป 4.2 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก DB25 ของคาน B1 ถึง B9

#### 4.3 การเปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน RB6

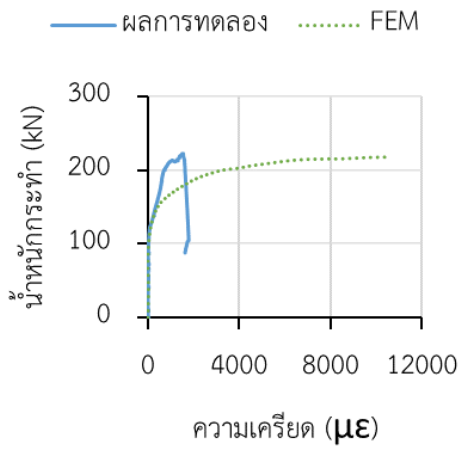
คุณสมบัติโดยทั่วไปความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงเฉือน RB6 ถึงจุดครากที่  $1200 \mu\epsilon$  จากผลการทดลองในอดีต พบว่า ความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงเฉือนถึงจุดครากทั้งหมด โดยคาน B6 และ B9 ไม่มีผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อคานรับน้ำหนักกระทำสูงสุด ความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงเฉือนมีค่าถึงจุดครากทั้งหมดดังรูป 4.3 (ก) ถึง (ณ)



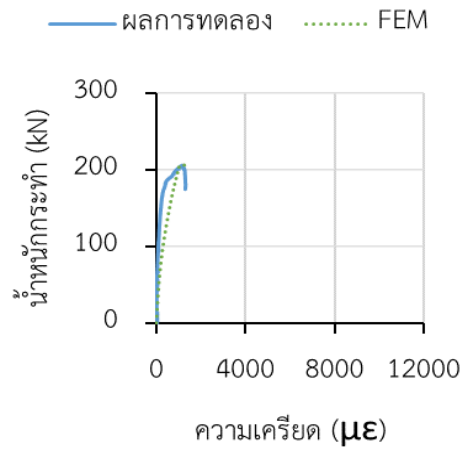
(ก) B1



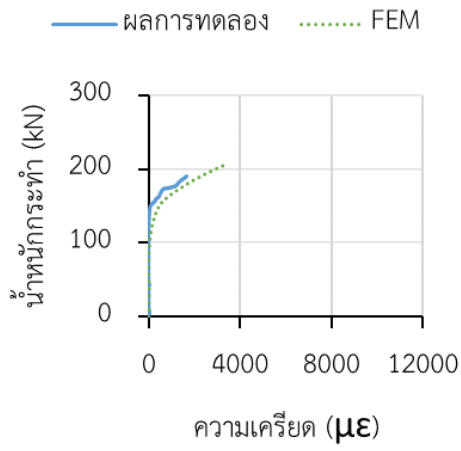
(ข) B2



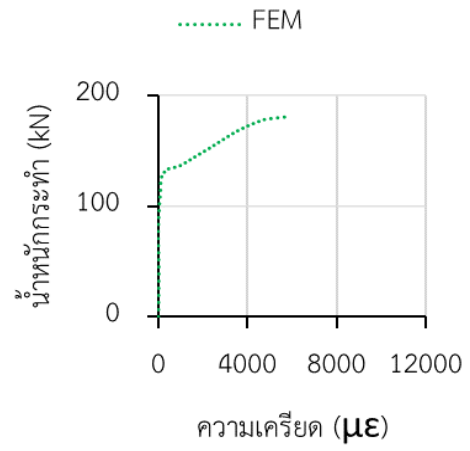
(ค) B3



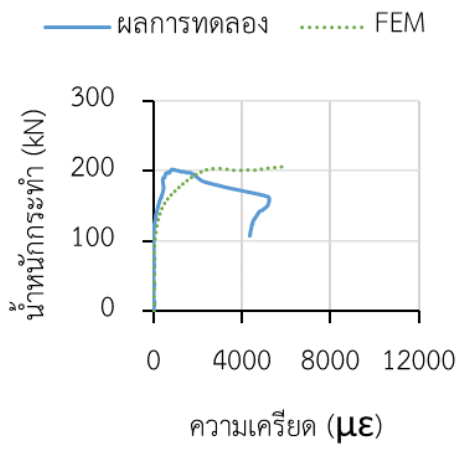
(ง) B4



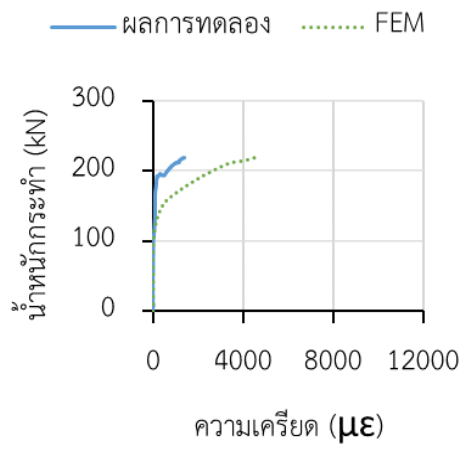
(จ) B5



(ฉ) B6

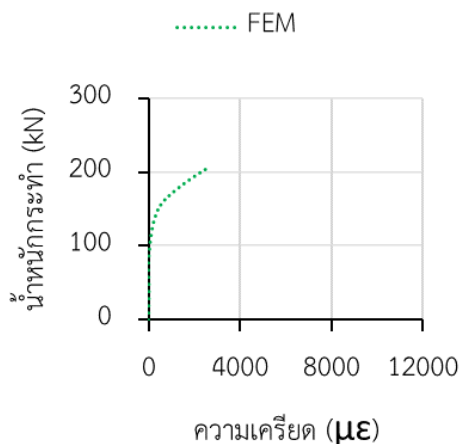


(ช) B7



(ซ) B8





(ณ) B9

รูป 4.3 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก RB6 ของคาน B1 ถึง B9

#### 4.4 การเปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกของคานตัวอย่างในอดีตและคานจำลอง

ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS แสดงให้เห็นลักษณะรูปแบบรอยแตกของคานคอนกรีตและรูปแบบรอยแตกของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกกับผลการทดลองในอดีต พบว่ารูปแบบรอยแตกมีความใกล้เคียงกันตามตาราง 4.2 โดยทำการเปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกคาน ได้แก่ คานคอนกรีตเสริมเหล็ก คานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กยึดติดด้วยอีพอกซี และคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กยึดติดด้วยอีพอกซี และสลักเกลียว

คาน B1 คือคานคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่ามีรูปแบบรอยแตกของการวิเคราะห์มีรูปแบบรอยแตกใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยรูปแบบรอยแตกมีแนวทแยงเนื่องจากการวิบัติภายใต้แรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตที่ผิวบนมีการแตกภายใต้แรงอัด

คาน B2 คือคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กยึดติดด้วยอีพอกซี จากผลการทดลอง พบว่าเกิดการหลุดร่อนของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก แต่ผลจากการวิเคราะห์คาน B2 พบว่าผลการวิเคราะห์ไม่สามารถตรวจจับการหลุดร่อนของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กได้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้จำลองอีพอกซีด้วยวิธี Cohesive surface ทำให้ไม่มีกรณีที่จะหลุดร่อนได้

คานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กยึดติดด้วยอีพอกซี และสลักเกลียว จากผลการทดลองในอดีต พบว่า รูปแบบรอยแตกของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กมีรอยแตกตามการจัดเรียงตัวของสลักเกลียวและบนผิวของคานคอนกรีตพบรอยแตก


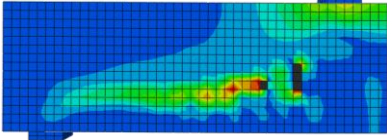

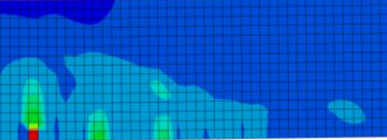
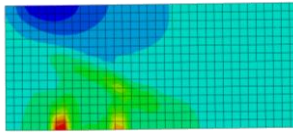
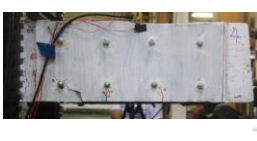
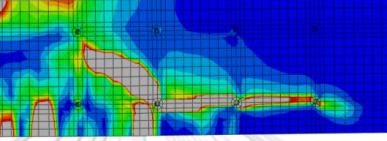
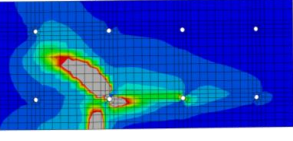
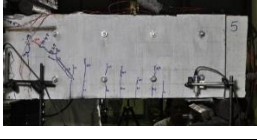
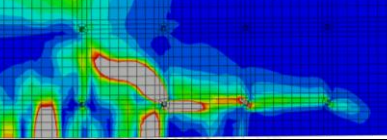
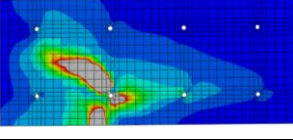

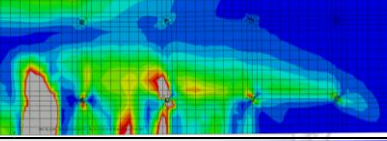
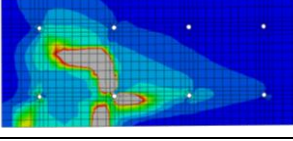

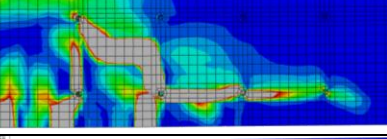
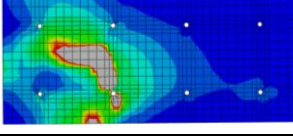

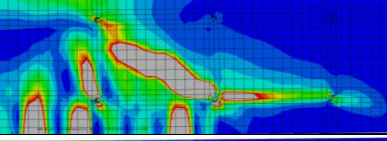
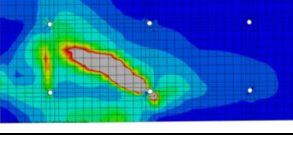

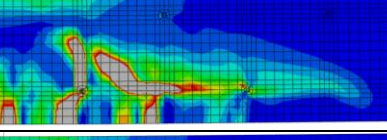
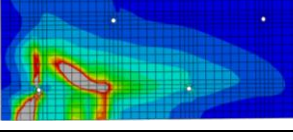

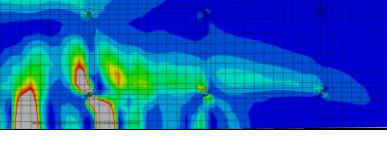
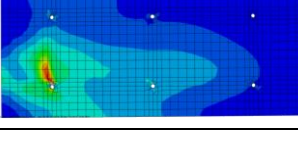
ของคอนกรีตภายใต้แรงอัด เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกจากผลการวิเคราะห์พบว่าบางคาน รูปแบบรอยแตกมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กมีรูปแบบรอยแตกตามการจัดเรียงตัวของสลักเกลียวและบนผิวคานคอนกรีตมีรอยแตกของคอนกรีตภายใต้แรงอัด อย่างไรก็ตามในคาน B8 และ B9 รูปแบบรอยแตกของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กมีลักษณะต่างจากผลการทดลองอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นการจำลองไม่สามารถตรวจจึรูปแบบรอยแตกที่สมบูรณ์ได้

#### 4.5 ความแม่นยำของแบบจำลอง

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์ พบว่ามีความสอดคล้องกันตั้งแต่แบบจำลองที่ใช้สามารถอธิบายพฤติกรรมในการรับแรงของคาน ความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงดึง แต่แบบจำลองไม่สามารถจำลองความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงเฉือนและรูปแบบรอยแตกที่สมบูรณ์ได้



ตาราง 4.2 เปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกของคานตัวอย่างในอดีต [20] และ [21] และคานจำลอง

| คาน | รูปแบบรอยแตกจากการทดลอง   | รูปแบบรอยแตกในคอนกรีต  | รูปแบบรอยแตกในแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใย  |
|-----|---|--|---|
| B1  |    |    |   |
| B2  |    |    |    |
| B3  |    |    |    |
| B4  |   |   |   |
| B5  |  |  |  |
| B6  |  |  |  |
| B7  |  |  |  |
| B8  |  |  |  |
| B9  |  |  |  |

## บทที่ 5

### การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรออกแบบ

หลังจากทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดลองในอดีต [20, 21] ผู้วิจัยได้ทำการขยายผลการวิเคราะห์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอื่น ๆ ที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของคานาคอนกรีตเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

#### 5.1 ตัวแปรที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักกระทำของคาน

ตัวแปรที่งานวิจัยในอดีตได้ศึกษาไปแล้วคือ ร้อยละของปริมาณเส้นใย จำนวนสลักเกลียว และ ขนาดของสลักเกลียว ซึ่งพบว่าตัวแปรดังกล่าวส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของคาน อย่างไรก็ตาม ยังมีตัวแปรอื่นที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก โดยตัวแปรที่คาดว่าจะมีผล ได้แก่

1. ความหนาของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก
2. กำลังรับแรงอัดของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก
3. ค่า Fracture Energy ( $G_f$ ) ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก
4. จำนวนสลักเกลียว
5. การจัดเรียงตัวของสลักเกลียว

ตาราง 5.1 รายละเอียดคานที่วิเคราะห์

| คาน | คุณสมบัติคอนกรีต |                | คุณสมบัติของแผ่นคอนกรีต |                 |                |                 | จำนวนสลักเกลียว | ตัวแปรที่ศึกษา                               |
|-----|------------------|----------------|-------------------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|--|
|     | $f'_c$<br>(MPa)  | $f_t$<br>(MPa) | ความหนา<br>(มม.)        | $f'_c$<br>(MPa) | $f_t$<br>(MPa) | $G_f$<br>(N/mm) |                 |  |
| BP1 | 32.4             | 3.26           | 15                      | 61.8            | 5.24           | 8.82            | 8               | ความหนาของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก        |
| BP2 | 32.4             | 3.26           | 20                      | 61.8            | 5.24           | 8.82            | 8               |  |
| BP3 | 32.4             | 3.26           | 10                      | 50.0            | 4.95           | 8.82            | 8               | กำลังรับแรงอัดของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก |
| BP4 | 32.4             | 3.26           | 10                      | 90.0            | 6.64           | 8.82            | 8               |  |
| BP5 | 32.4             | 3.26           | 10                      | 61.8            | 5.24           | 4.04            | 8               | ค่า $G_f$ ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก     |
| BP6 | 32.4             | 3.26           | 10                      | 61.8            | 5.24           | 9.66            | 8               |  |
| BP7 | 32.4             | 3.26           | 10                      | 61.8            | 5.24           | 8.82            | 4               |  |

| คาน | คุณสมบัติคอนกรีต |                | คุณสมบัติของแผ่นคอนกรีต |                 |                |                 | จำนวนสลักเกลียว | ตัวแปรที่ศึกษา                                  |
|-----|------------------|----------------|-------------------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|---|
|     | $f'_c$<br>(MPa)  | $f_t$<br>(MPa) | ความหนา<br>(มม.)        | $f'_c$<br>(MPa) | $f_t$<br>(MPa) | $G_f$<br>(N/mm) |                 |   |
| BP8 | 32.4             | 3.26           | 10                      | 61.8            | 5.24           | 8.82            | 10              | จำนวนสลักเกลียว และ<br>การจัดเรียงตัวสลักเกลียว |

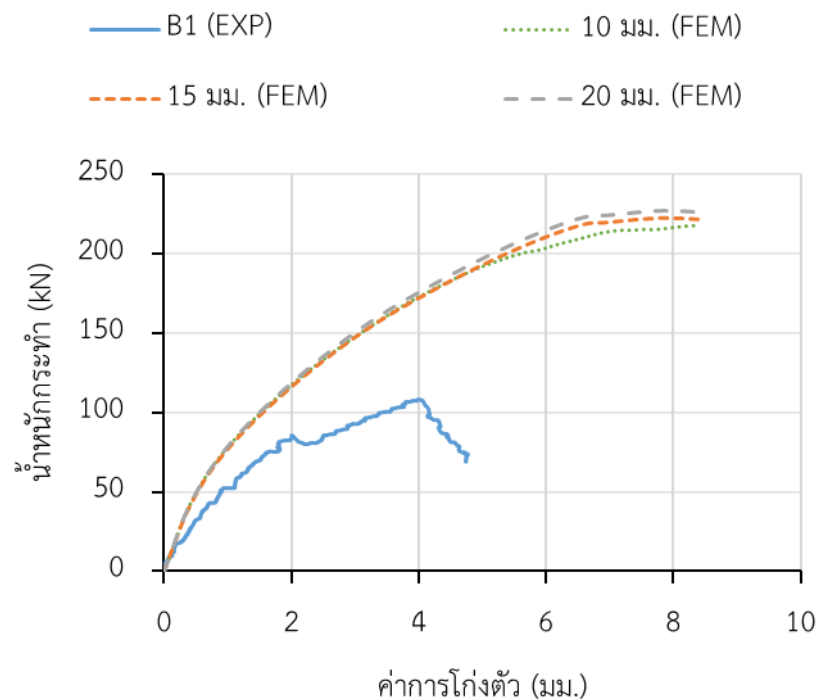
ตาราง 5.2 ผลการวิเคราะห์ของการศึกษาเชิงตัวแปร (Parametric study)

| คาน | น้ำหนักกระทำสูงสุด (kN) |           | $V$ (kN) | ค่าการโก่งตัว (มม.) |                |
|-----|-------------------------|-----------|----------|---------------------|----------------|
|     | $P_{EXP}$               | $P_{FEM}$ |          | $\Delta_{EXP}$      | $\Delta_{FEM}$ |
| B1  | 108.40                  | 104.10    | 54.20    | 4.34                | 4.40           |
| B3  | 222.73                  | 218.11    | 111.36   | 8.56                | 8.38           |
| B7  | 202.78                  | 204.02    | 101.39   | 5.78                | 6.53           |
| B8  | 218.98                  | 219.26    | 109.49   | 5.34                | 6.60           |
| BP1 | -                       | 222.78    | 111.39   | -                   | 8.44           |
| BP2 | -                       | 227.33    | 113.65   | -                   | 8.44           |
| BP3 | -                       | 202.78    | 101.39   | -                   | 6.22           |
| BP4 | -                       | 221.45    | 110.72   | -                   | 10.77          |
| BP5 | -                       | 217.01    | 108.50   | -                   | 8.28           |
| BP6 | -                       | 222.79    | 111.39   | -                   | 8.22           |
| BP7 | -                       | 186.37    | 93.18    | -                   | 5.40           |
| BP8 | -                       | 208.84    | 104.42   | -                   | 8.46           |

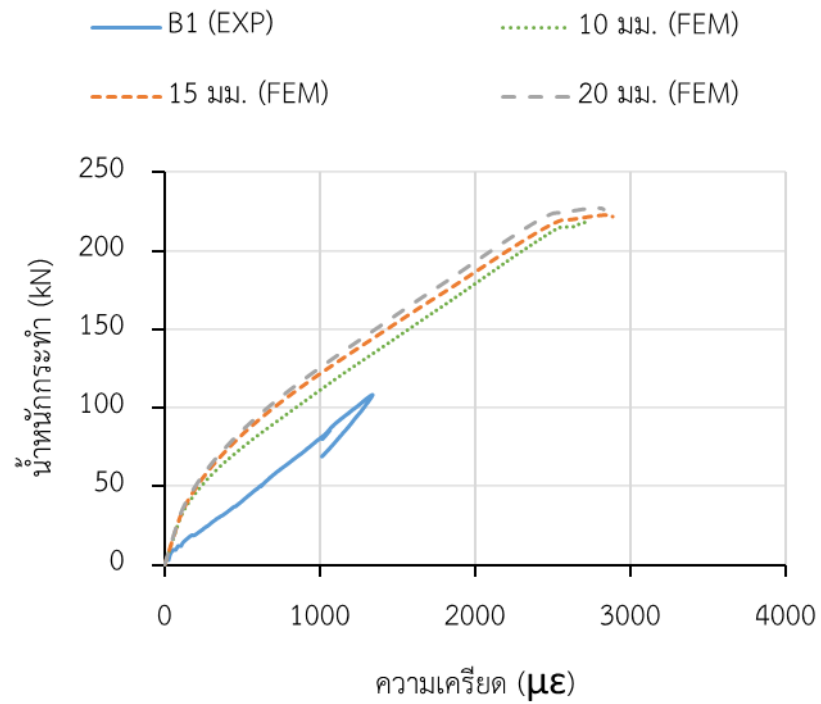
## 5.2 อิทธิพลของความหนาของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

การทดลองในอดีตได้ศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักกระทำของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก โดยใช้ความหนาของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กเท่ากับ 10 มม. เพียงความหนาเดียวได้แก่คาน B3 ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเพิ่มเติมด้วยความหนาของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก 15 มม. และ 20 มม. ได้แก่คาน BP1 และ BP2 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มขนาดความหนาแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กเพิ่มน้ำหนัก

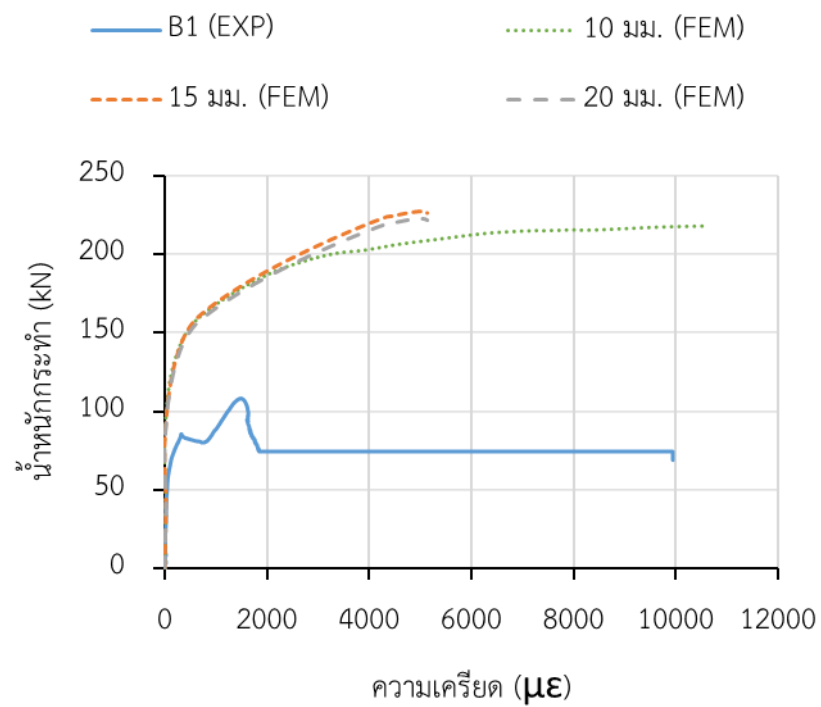
กระทำรูป 5.1 ความเครียดของเหล็ก DB25 และ RB6 แสดงในรูป 5.2 และรูป 5.3 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของคาน B1 กับคาน B3 (10 มม.) BP1 (15 มม.) และ BP2 (20 มม.) พบว่าการเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตที่มีความหนา 10 15 และ 20 มม. การเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานเพิ่มขึ้น 54.86 57.20 และ 59.47 kN เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละพบว่าการรับแรงเฉือนของคานเพิ่มขึ้น 101% 106% และ 110% ตามลำดับ โดยการเสริมความหนาของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กทำให้หน้าตัดในการรับแรงเฉือนของคานเพิ่มขึ้น แต่เมื่อการเพิ่มความหนาที่มากขึ้น จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงเฉือนของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ ทั้งนี้ เนื่องจากกำลังรับน้ำหนักกระทำของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นถูกจำกัดโดยการเกิดรอยแตกของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยที่บริเวณสลักเกลียว ดังที่เห็นดังตาราง 5.3 อาจกล่าวได้ว่าการจัดเรียงของสลักเกลียวเป็นตัวควบคุมค่ากำลังรับแรงเฉือนของคาน



รูป 5.1 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและค่าโก่งตัวตามความหนาของแผ่น SFRC



รูป 5.2 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก DB25 ตามความหนาของแผ่น SFRC



รูป 5.3 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก RB6 ตามความหนาของแผ่น SFRC



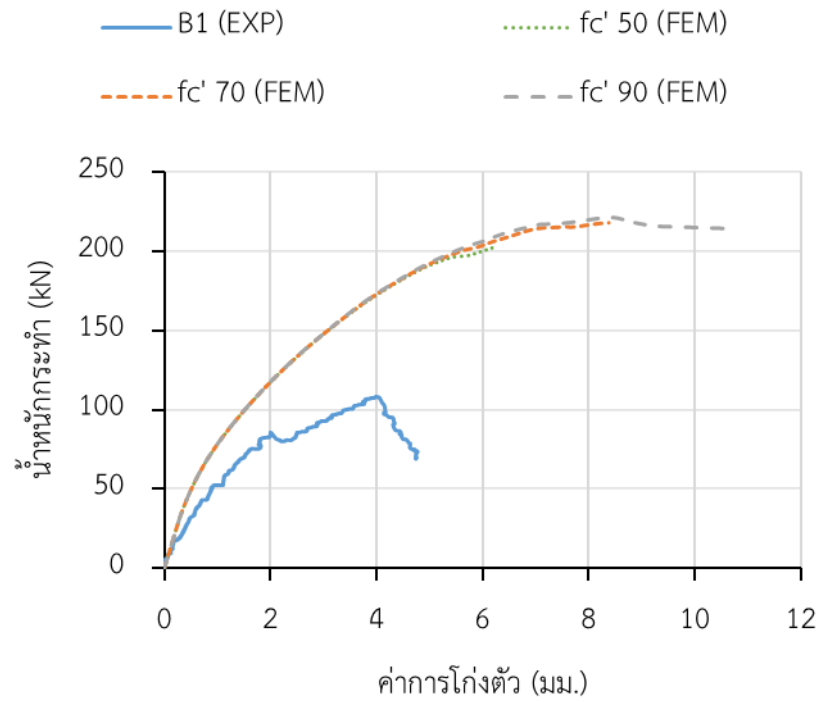
ตาราง 5.3 เปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกตามความหนาของแผ่น SFRC

| คาน            | รูปแบบรอยแตกในคอนกรีต | รูปแบบรอยแตกในแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใย |
|----------------|-----------------------|--------------------------------------|
| B3<br>(10 mm)  |                       |                                      |
| BP1<br>(15 mm) |                       |                                      |
| BP2<br>(20 mm) |                       |                                      |

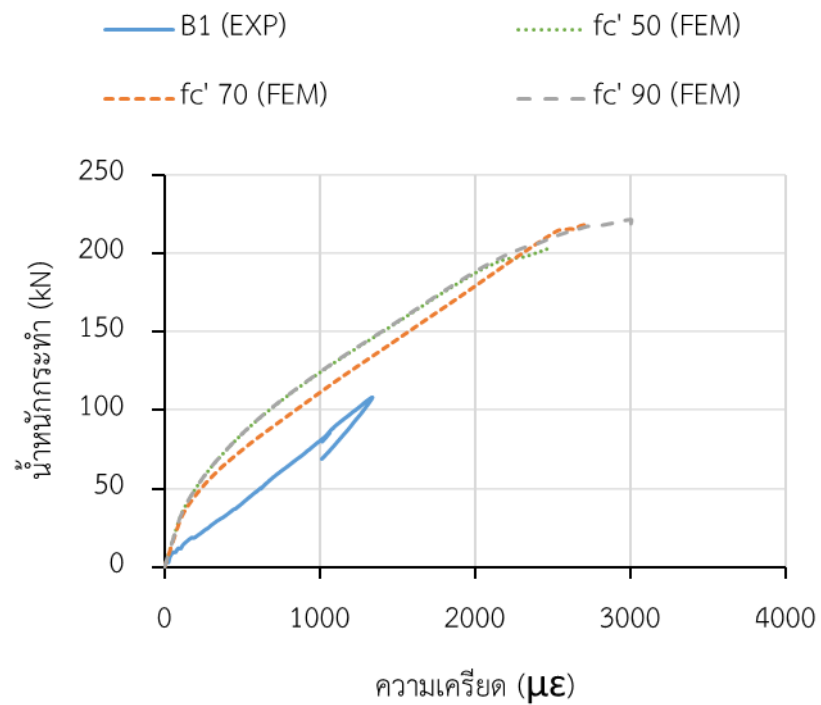
### 5.3 อิทธิพลของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

ในงานวิจัยในอดีตทำการศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ( $f_c'$ ) มีค่าเท่ากับ 70 MPa ได้แก่คาน B3 ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเพิ่ม เมื่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง จึงได้เปลี่ยนกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กเป็น 50 MPa และ 90 MPa ได้แก่คาน BP3 และ BP4 ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กทำให้กำลังรับแรงเฉือนของคานเพิ่มขึ้นดังรูป 5.4 เนื่องจากการเปลี่ยนกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทำให้กำลังรับแรงดึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคาน B1 การเสริมกำลังด้วยแผ่นคอนกรีต โดยการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กจาก 50 70 และ 90 MPa ทำให้คานรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น 47.2 54.86 และ 56.53 kN เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละพบว่ากำลังรับแรงเฉือนของคานเพิ่มขึ้น 87% 101% และ 104% ตามลำดับ ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กรับแรงดึงแสดงในรูป 5.5 และ รูป 5.6 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกดังตาราง 5.4 พบว่าการเพิ่ม-ลดของ  $f_c'$  มีผลต่อรอยแตกของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยและรอยแตกของคาน

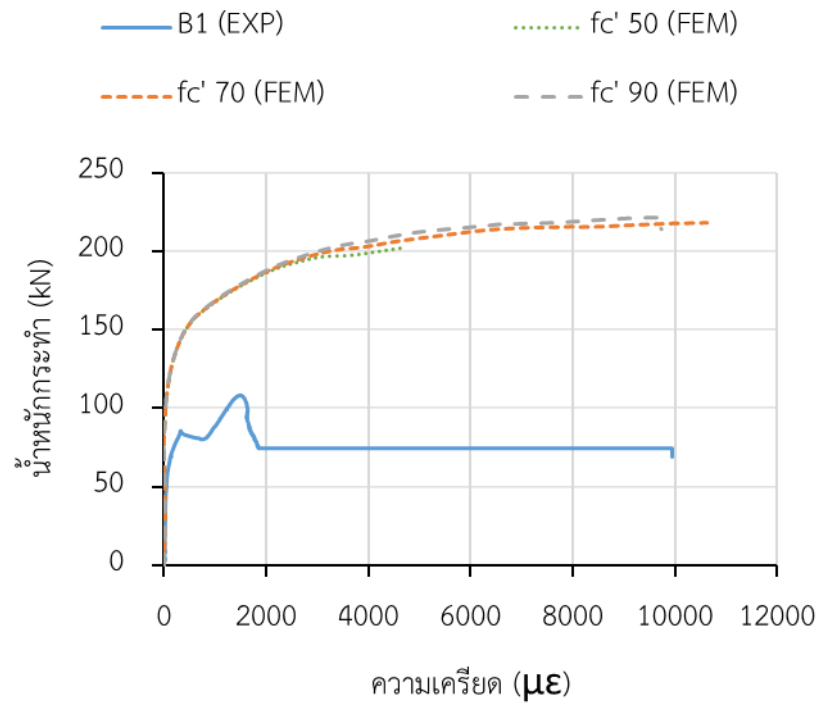




รูป 5.4 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและค่าโก่งตัวของคานตามกำลังรับแรงอัดแผ่น SFRC



รูป 5.5 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดเหล็ก DB25 ตามกำลังรับแรงอัดแผ่น SFRC



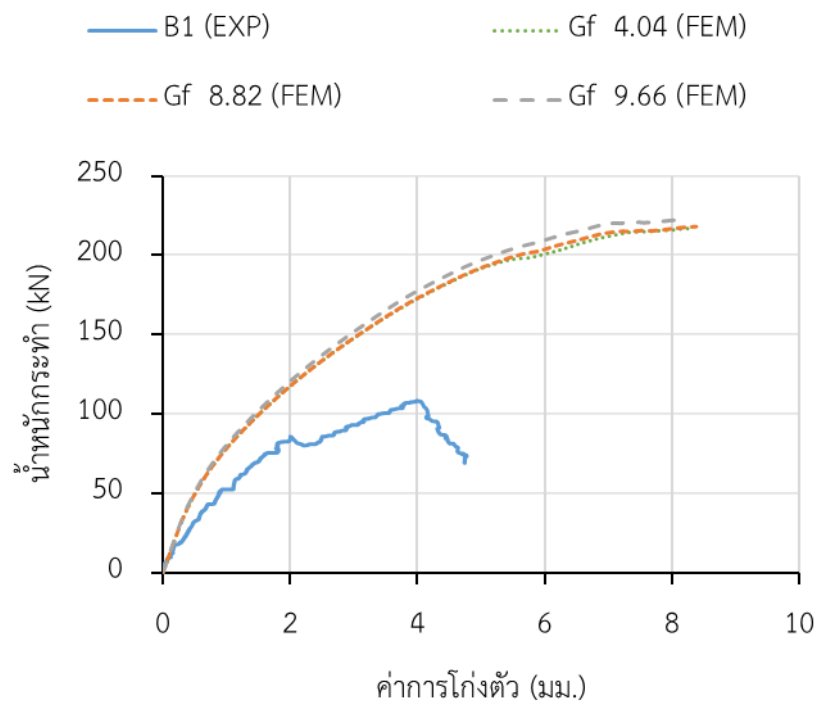
รูป 5.6 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดเหล็ก RB6 ตามกำลังรับแรงอัดแผ่น SFRC

ตาราง 5.4 เปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกของคานจำลองตามกำลังรับแรงอัดแผ่น SFRC

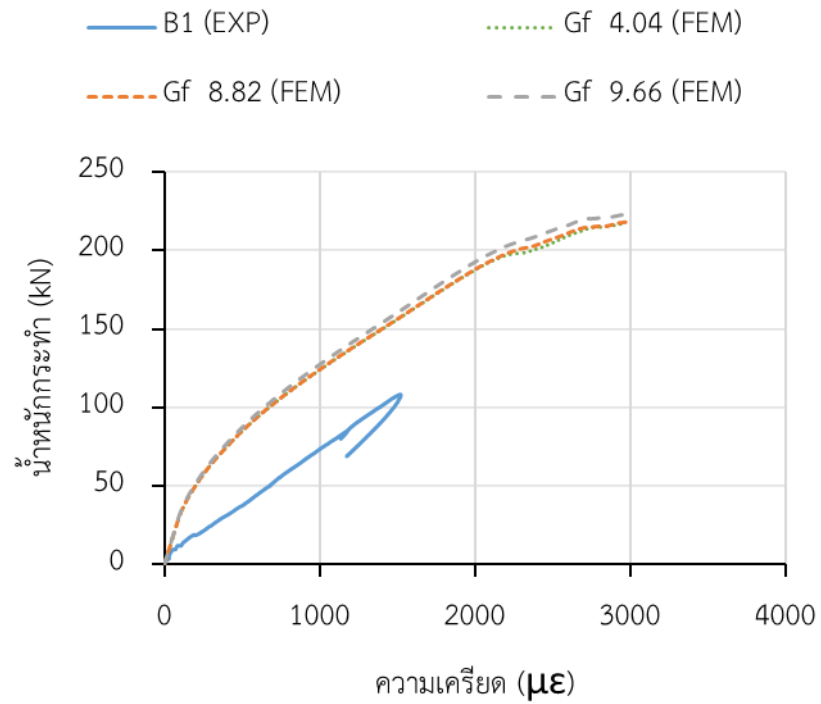
| คาน                | รูปแบบรอยแตกในคอนกรีต | รูปแบบรอยแตกในแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใย |
|--------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| BP3<br>(50<br>MPa) |                       |                                      |
| B3<br>(70<br>MPa)  |                       |                                      |
| BP4<br>(90<br>MPa) |                       |                                      |

#### 5.4 อิทธิพลของค่า Fracture Energy ( $G_f$ ) ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

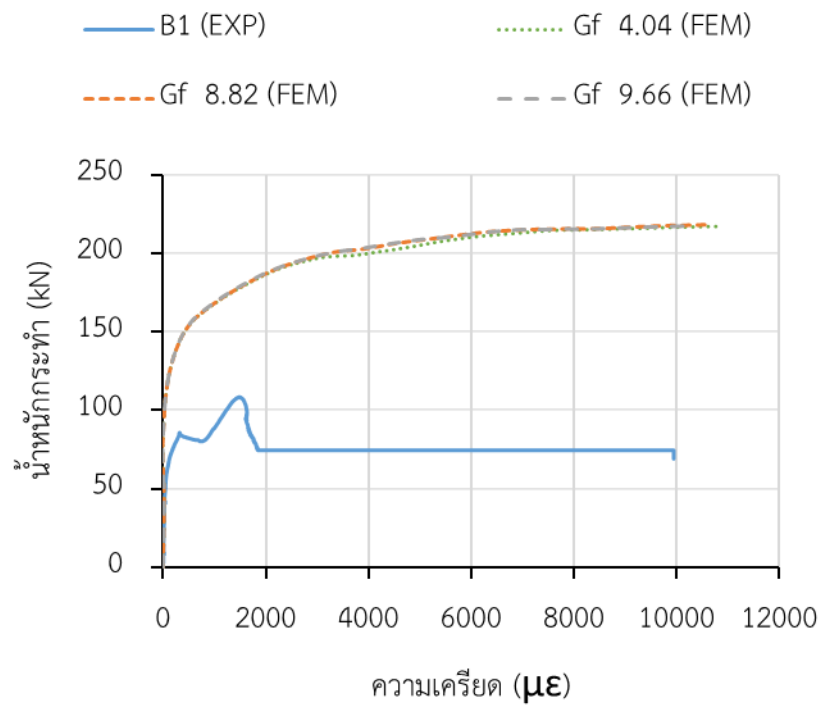
การทดลองในอดีตได้ใช้ Fracture Energy ( $G_f$ ) ในแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กเท่ากับ 8.82 N/mm ได้แก่คาน B3 งานวิจัยนี้จึงศึกษาค่า  $G_f$  นอกเหนือจากเดิม ค่า  $G_f$  สามารถคำนวณได้จากการแทนค่า  $f_c'$  ลงในสมการการ (3.9) เมื่อ  $f_c'$  เท่ากับ 50 และ 90 MPa จะได้ค่า  $G_f$  เท่ากับ 4.04 และ 9.66 N/mm ได้แก่คาน BP5 และ BP6 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์พบว่าความสามารถรับน้ำหนักกระทำของคานแปรผันตามค่า  $G_f$  แต่ค่าการโก่งตัวของคานไม่มีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูป 5.7 การเปลี่ยนแปลงค่า  $G_f$  ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของแผ่นคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อค่า  $G_f$  มีค่าสูงขึ้น ทำให้แผ่นคอนกรีตมีกำลังรับแรงเฉือนมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบรอยแตกดังตาราง 5.5 พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า  $G_f$  ไม่ส่งผลกับรอยแตกของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก โดยรอยแตกมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยทำให้กำลังรับแรงเฉือนของคานไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของคาน B1 การเสริมกำลังด้วยแผ่นคอนกรีต โดยการเพิ่มค่า  $G_f$  พบว่าเมื่อค่า  $G_f$  มีค่าเท่ากับ 4.04 8.82 และ 9.66 N/mm ได้แก่คาน BP5 B3 และ BP6 กำลังรับแรงเฉือนของคานมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 54.31 54.86 และ 57.20 kN ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละ พบว่าการเพิ่มค่า  $G_f$  จาก 4.04 8.82 และ 9.66 N/mm สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก 100% 101% และ 106% ตามลำดับ



รูป 5.7 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและค่าโก่งตัวของคานตามค่า  $G_f$

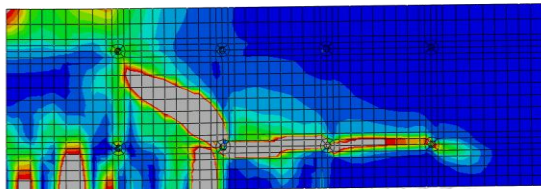
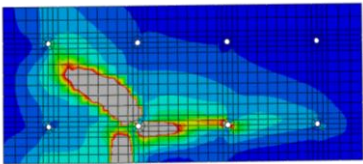
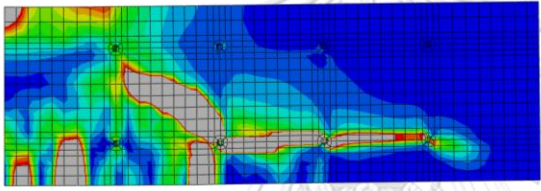
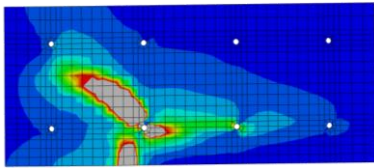
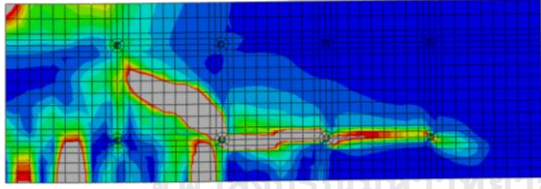
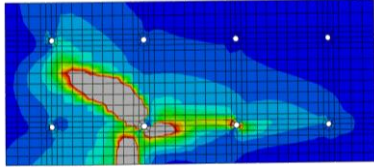


รูป 5.8 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก DB25 ของคานคานตามค่า  $G_f$



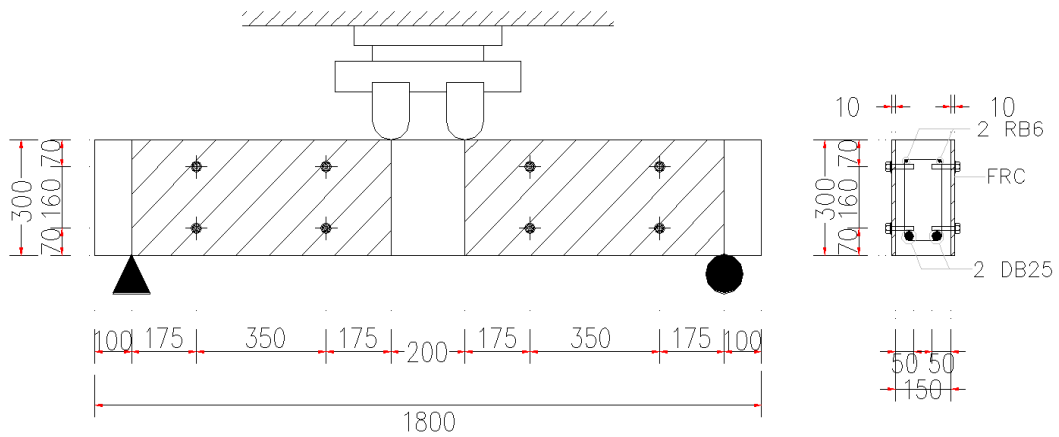
รูป 5.9 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก RB6 คานตามค่า  $G_f$

ตาราง 5.5 เปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกของคานตามค่า  $G_f$ 

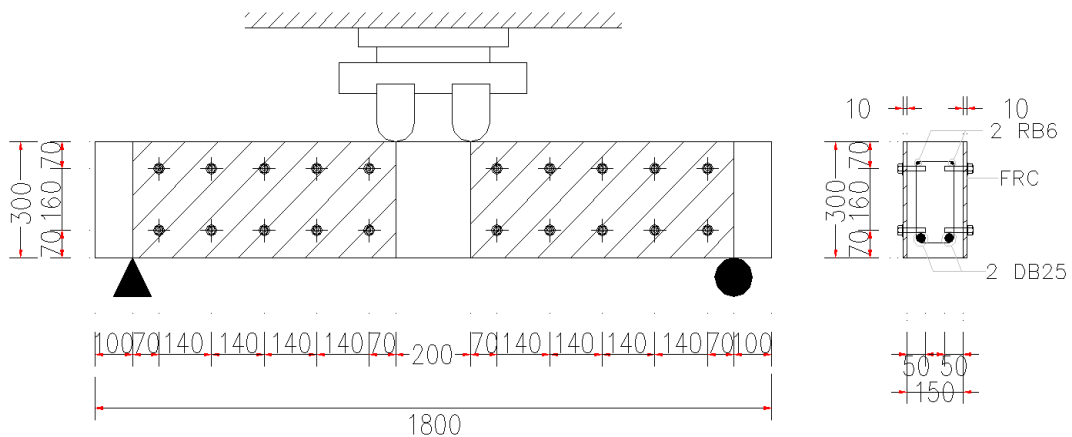
| คาน  | รูปแบบรอยแตกในคอนกรีต   | รูปแบบรอยแตกในแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใย  |
|--|---|---|
| BP5<br>( $G_f = 4.04$<br>N/mm <sup>2</sup> ) |    |    |
| B3<br>( $G_f = 8.82$<br>N/mm <sup>2</sup> )  |   |   |
| BP6<br>( $G_f = 9.66$<br>N/mm <sup>2</sup> ) |  |  |

### 5.5 อิทธิพลของจำนวนสลักเกลียว

การทดลองในอดีตได้ทำการศึกษาผลกระทบของจำนวนสลักเกลียวต่อกำลังรับน้ำหนักกระทำของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ยึดติดด้วยอีพอกซี และสลักเกลียว จำนวน 6 และ 8 สลักเกลียว ได้แก่คาน B7 และ B3 ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มจำนวนสลักเกลียวมีผลต่อกำลังรับน้ำหนักกระทำของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ในงานวิจัยนี้จึงทำการจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กยึดติดด้วยอีพอกซี และสลักเกลียว จำนวน 4 สลักเกลียวและ 10 สลักเกลียวได้แก่คาน BP7 และ BP8 ดังรูป 5.10 และ รูป 5.11 ตามลำดับ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของจำนวนสลักเกลียว



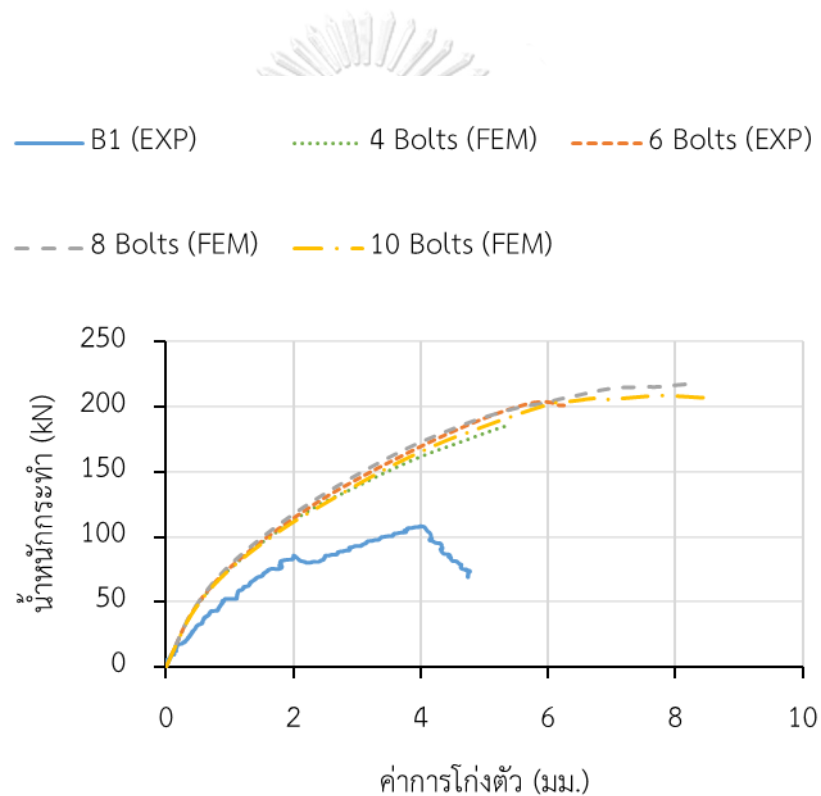
รูป 5.10 คานจำลองสลักเกลียวจำนวน 4 สลักเกลียว (BP7)



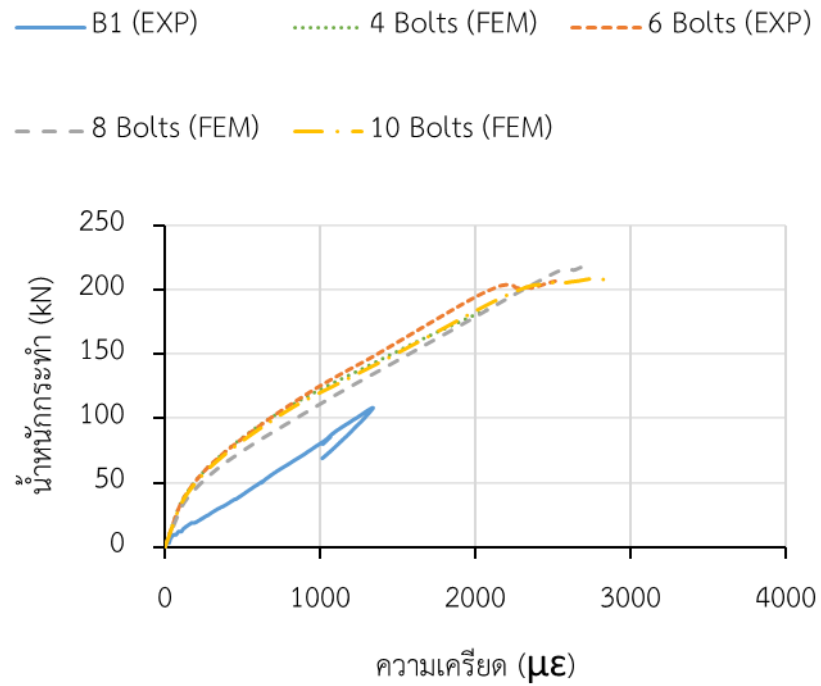
รูป 5.11 คานจำลองสลักเกลียวจำนวน 10 สลักเกลียว (BP8)

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าการลดจำนวนสลักเกลียวเหลือ 4 สลักเกลียวคาน BP7 ทำให้น้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวมีค่าลดลงตามรูป 5.12 และการเพิ่มจำนวนสลักเกลียว 10 สลักเกลียวคาน BP10 พบว่าน้ำหนักกระทำมีค่าลดลง แต่ค่าการโก่งตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบรอยแตกดังตาราง 5.6 พบว่าการเพิ่มขึ้นของสลักเกลียวทำให้อรอยแตกของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กมีทิศทางตามแนวขนานกับการจัดเรียงตัวของสลักเกลียว การเพิ่มขึ้นของสลักเกลียวจาก 4 สลักเกลียว เป็น 6 และ 8 สลักเกลียว พบว่ารอยแตกตามรอยแนวสลักเกลียวมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยมีทิศทางรอยแตกเป็นแนวทแยง การรับแรงของแผ่นคอนกรีตจึงมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อการเพิ่มสลักเกลียวเป็น 10 สลักเกลียว รอยแตกตามรอยสลักเกลียวมีปริมาณเพิ่มขึ้นแต่ทิศทางรอยแตกอยู่ในแนวขนานกับการจัดเรียงตัวของสลักเกลียว เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของคาน B1 กับผลการ

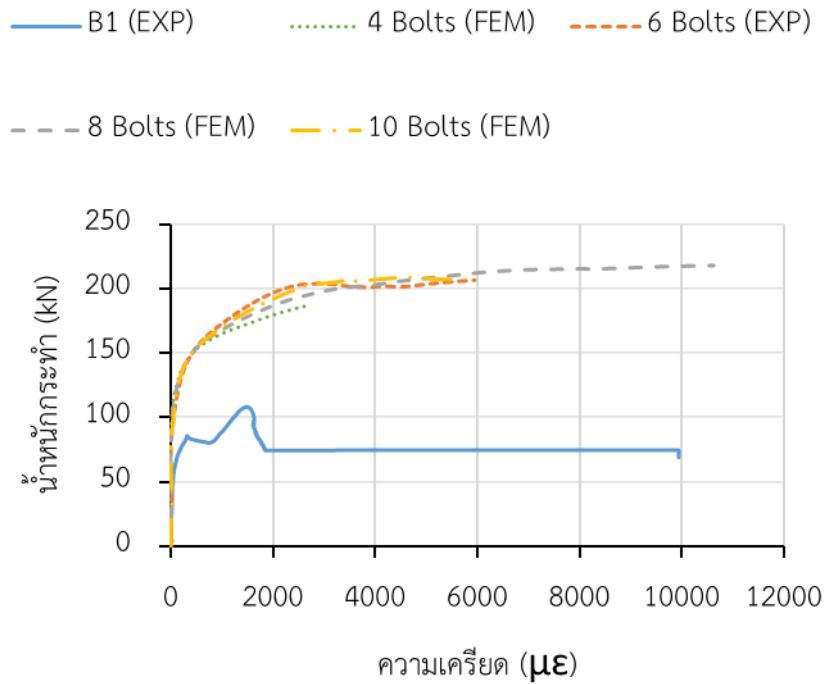
เสริมกำลังด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กพบว่ามีค่าสูงขึ้น เมื่อจำนวนสลักเกลียวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อจำนวนสลักเกลียวเพิ่มขึ้นเป็น 10 สลักเกลียวกลับมีค่าลดลง โดยมีกำลังรับแรงเฉือนของคาน 4 6 8 และ 10 สลักเกลียวเพิ่มขึ้นเท่ากับ 38.99 47.82 54.86 และ 50.22 kN ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนเป็นร้อยละ พบว่าการเพิ่มจำนวนสลักเกลียวเป็น 4 6 8 และ 10 สลักเกลียว ทำให้กำลังรับแรงเฉือนมีค่าสูงขึ้น 71% 88% 101% และ 92% ตามลำดับ ดังนั้นการเพิ่มจำนวนสลักเกลียวมากเกินไปทำให้กำลังรับแรงเฉือนของคานมีค่าลดลงเพราะพื้นที่รับแรงของคอนกรีตต่อจำนวนสลักเกลียวมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบความเครียดในสลักเกลียวดังรูป 5.15 จะเห็นว่าตำแหน่งการจัดเรียงตัวและจำนวนสลักเกลียวมีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของคาน



รูป 5.12 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและค่าโก่งตัวของคาน



รูป 5.13 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก DB25 ของคาน

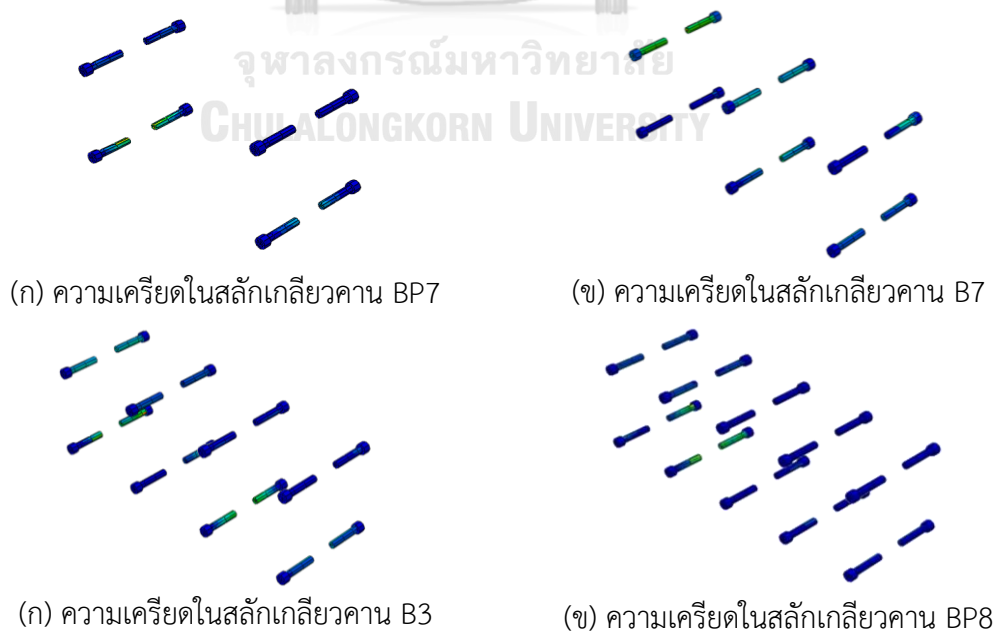


รูป 5.14 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก RB6



ตาราง 5.6 เปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกของคานจำลอง

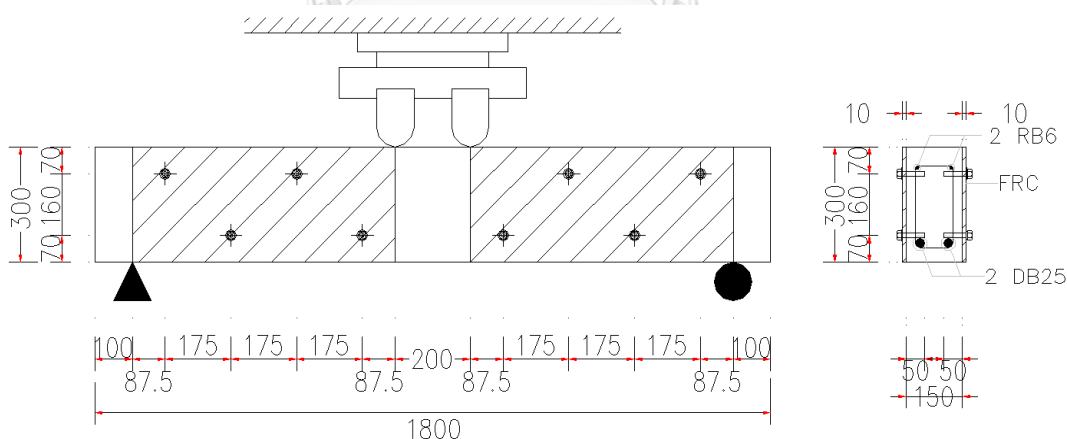
| คาน               | รูปแบบรอยแตกในคอนกรีต | รูปแบบรอยแตกในแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใย |
|-------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| BP7<br>(4 bolts)  |                       |                                      |
| B7<br>(6 bolts)   |                       |                                      |
| B3<br>(8 bolts)   |                       |                                      |
| BP8<br>(10 bolts) |                       |                                      |



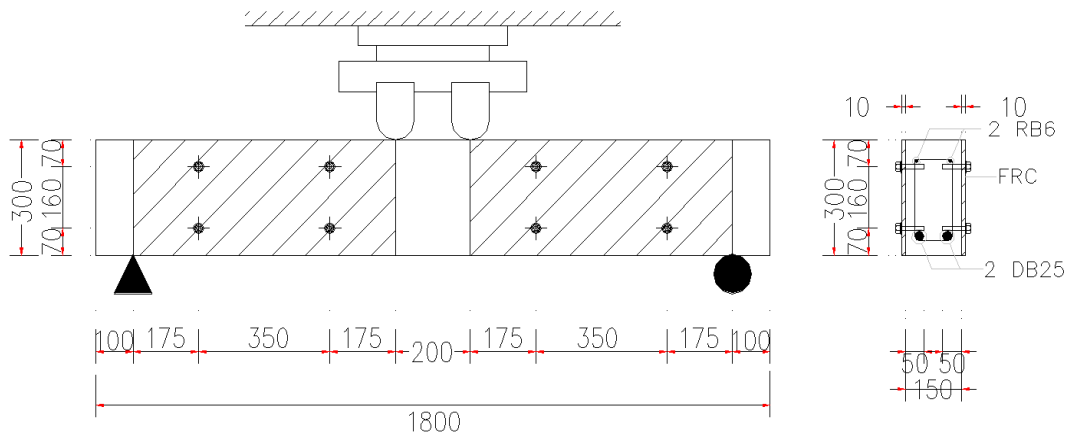
รูป 5.15 ความเครียดในสลักเกลียวคาน

## 5.6 อิทธิพลของการจัดเรียงสลักเกลียว

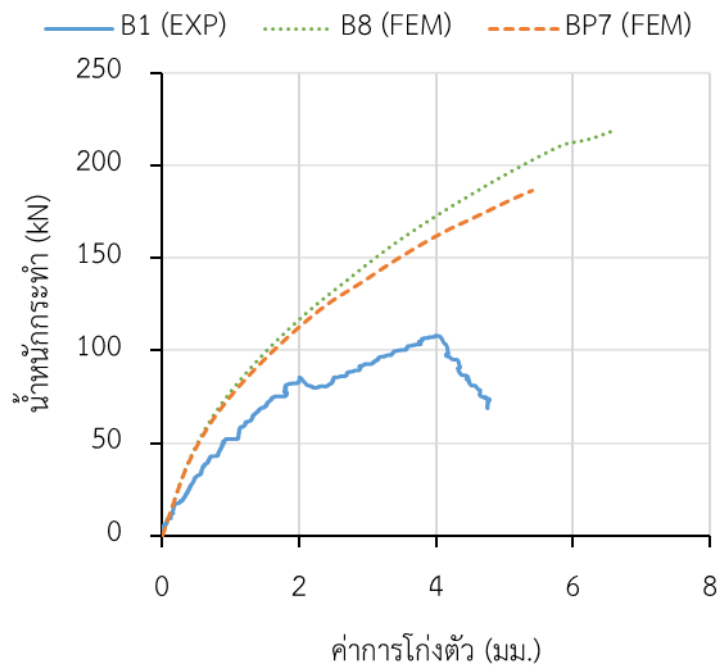
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของการจัดเรียงตัวของสลักเกลียว โดยอ้างอิงจากผลการทดลองในอดีต [20] โดยคาน B8 มีสลักเกลียวจำนวน 4 สลักเกลียว มีการจัดเรียงสลักเกลียวแบบเว้นระยะห่างกันดังรูป 5.16 รับน้ำหนักกระทำสูงสุด 218.98 kN งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการจัดเรียงตัวของสลักเกลียว 4 สลักเกลียวรูปแบบสมมาตรดังรูป 5.17 พบว่าการจัดเรียงสลักเกลียวแบบคาน BP7 ทำให้กำลังรับน้ำหนักกระทำของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนมีค่าลดลงเหลือ 186.37 kN เมื่อเปรียบเทียบรอยแตกตามตาราง 5.7 พบว่ารอยแตกของคาน B8 มีขนาดของรอยแตกของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยใหญ่กว่าขนาดของคาน BP7 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของคาน พบว่าคาน B8 รับแรงเฉือนได้ 109.63 kN คาน BP7 รับแรงเฉือนได้ 93.19 kN เมื่อเปรียบเทียบค่าการรับแรงเฉือนเป็นร้อยละพบว่าการจัดเรียงสลักเกลียวแบบคาน B8 สามารถรับแรงเฉือนได้มากกว่า 36.74% ดังนั้นการจัดเรียงตัวของสลักเกลียวในคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กยึดติดด้วยอีพอกซี และสลักเกลียวมีผลต่อกำลังรับน้ำหนักกระทำของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กอย่างมีนัยสำคัญดังรูป 5.21 จะเห็นได้ว่าสลักเกลียวของคาน B8 มีความเครียดมากกว่าสลักเกลียวของคาน BP7 แสดงได้ว่าน้ำหนักกระทำที่ทำต่อคานสามารถส่งถ่ายไปในสลักเกลียวของคาน B8 มากกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการจัดเรียงตัวของสลักเกลียวมีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของคาน



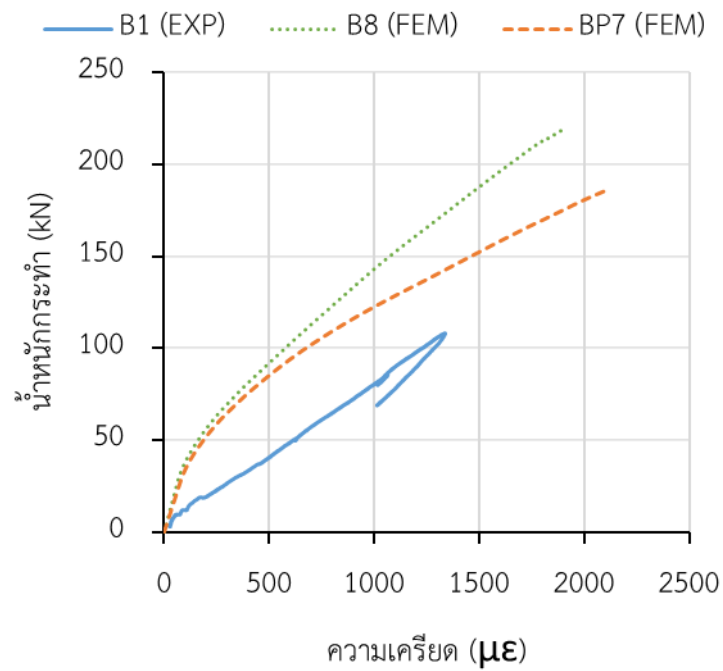
รูป 5.16 คานตัวอย่างที่ใช้ในงานทดลองหมายเลข 8 [20]



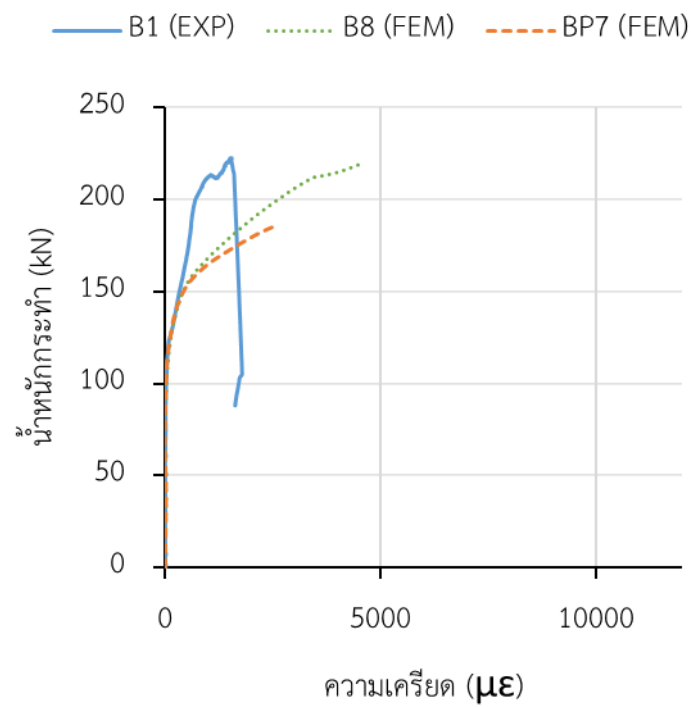
รูป 5.17 คานจำลองรูปแบบสลักเกลียว 4 สลักเกลียว (BP7)



รูป 5.18 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและค่าโก่งตัวของคาน

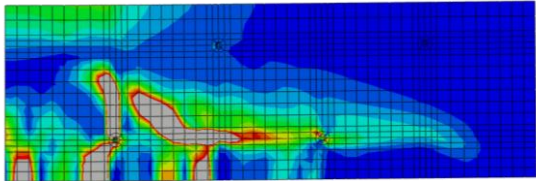
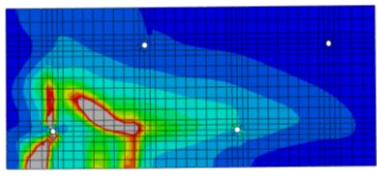
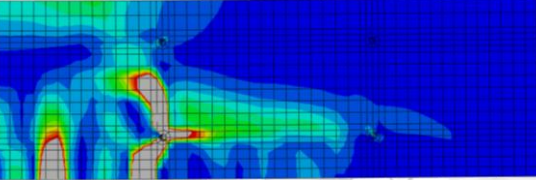
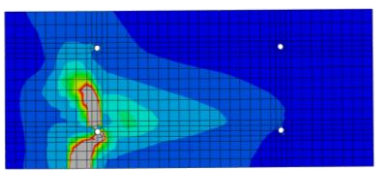


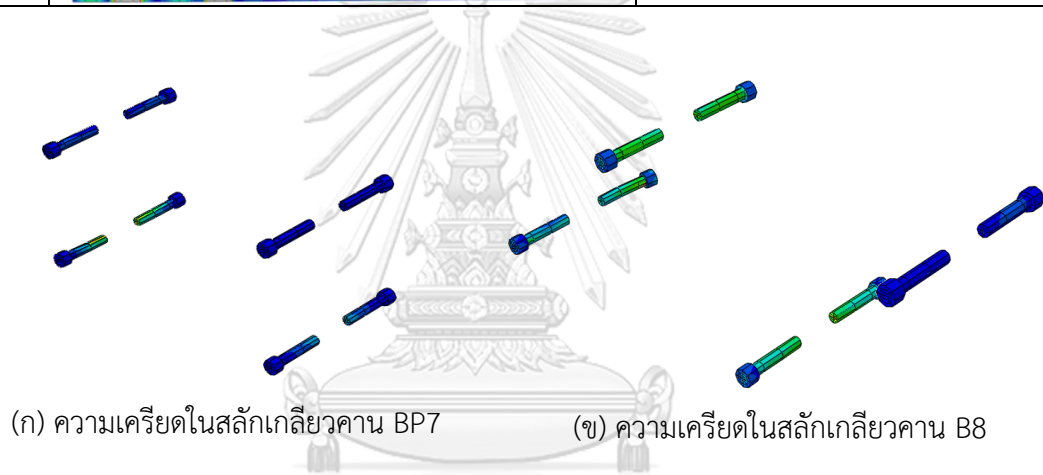
รูป 5.19 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก DB25 ของคาน



รูป 5.20 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำและความเครียดของเหล็ก RB6

ตาราง 5.7 เปรียบเทียบรูปแบบรอยแตกของคานจำลอง

| คาน | รูปแบบรอยแตกในคอนกรีต   | รูปแบบรอยแตกในแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใย   |
|-----|---|--|
| B8  |  |  |
| BP7 |  |  |



รูป 5.21 ความเครียดในสลักเกลียวของคาน BP7 และคาน B8

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์กำลังรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลองสามารถให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้แม่นยำ ในขณะที่คานที่เสริมกำลังนั้น ผลการวิเคราะห์ให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนใกล้เคียงกับผลการทดลองในอดีต โดยมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด 6 % อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าการโก่งตัวของคานจากการวิเคราะห์มีค่าความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง โดยผลการทดลองในอดีต คานมีค่าการโก่งตัวสูงสุด 12.06 มิลลิเมตรและค่าการโก่งตัวต่ำสุด 3.60 มิลลิเมตร การวิเคราะห์สามารถวิเคราะห์ค่าการโก่งตัวสูงสุด 10.60 มิลลิเมตรและค่าการโก่งตัวต่ำสุด 4.40 มิลลิเมตร จากผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงดึง และความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงเฉือน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากผลการทดลอง นอกจากนี้จากการวิเคราะห์รูปแบบรอยแตกพบว่า แบบจำลองไม่สามารถแสดงผลการหลุดร่อนของแผ่นเสริมกำลังได้ อย่างไรก็ตาม สำหรับคานส่วนใหญ่ผลการวิเคราะห์รูปแบบรอยแตกมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองสามารถใช้วิเคราะห์กำลังรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยได้

เมื่อทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก พบว่า คานรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น 101% 106% และ 110% เมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กจากความหนา 10 มม. เป็น 15 มม. และ 20 มม. ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่า ความหนาของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กไม่มีผลการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากรอยแตกและความเสียหายของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยถูกควบคุมด้วยกำลังของรอยต่อบริเวณสลักเกลียว

เมื่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น 87% 101% และ 104% เมื่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยมีค่าเท่ากับ 50 70 และ 90 MPa ตามลำดับ เนื่องจากกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในแผ่นคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงดึงของแผ่นคอนกรีตจึงมีค่าสูงขึ้น ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของคานมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานการแตกหัก ( $G_f$ ) ในแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กพบว่า การเพิ่มขึ้นของ  $G_f$  ไม่ทำให้การรับน้ำหนักกระทำสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ พบว่าเมื่อแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยมีค่า  $G_f$  เท่ากับ 4.04 8.82 และ 9.66 N/mm สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน 100% 101% และ 106% ตามลำดับเมื่อเทียบกับคานคอนกรีตที่ไม่ได้เสริมกำลัง เนื่องจากแบบจำลองพลังงานการแตกหักของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กมีลักษณะเป็นเส้นตรงทำให้อาจไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ทำให้รอยแตกและความเสียหายของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยไม่มีความแตกต่างกัน

เมื่อศึกษาจำนวนสลักเกลียว พบว่าการเพิ่มจำนวนสลักเกลียวทำให้กำลังรับแรงเฉือนของคานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มสลักเกลียวที่มากเกินไปทำให้กำลังรับแรงเฉือนของคานลดลง เนื่องจากพื้นที่คอนกรีตต่อจำนวนสลักเกลียวมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบจำนวนสลักเกลียวพบว่า การใช้จำนวนสลักเกลียวจำนวน 4 6 8 และ 10 สลักเกลียว ทำให้กำลังรับแรงเฉือนมีค่าสูงขึ้น 71% 88% 101% และ 92% ตามลำดับ ดังนั้นการใช้สลักเกลียวจำนวน 8 สลักเกลียวทำให้คานรับน้ำหนักกระทำมีค่าสูงสุด สำหรับการเพิ่มจำนวน 10 สลักเกลียวทำให้แผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยรับแรงเฉือนได้ลดลง เนื่องจากระยะห่างระหว่างสลักเกลียวลดลงทำให้รอยแตกของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยมีค่าลดลง กำลังรับแรงเฉือนของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยจึงลดลง

เมื่อเปรียบเทียบการจัดเรียงตัวของสลักเกลียว พบว่าการจัดเรียงตัวของสลักเกลียวมีผลต่อการรับน้ำหนักกระทำของคาน โดยการจัดเรียงตัวของสลักเกลียวแนวทแยงสามารถรับน้ำหนักกระทำได้มากกว่าการจัดเรียงตัวของสลักเกลียวแบบสมมาตร เมื่อเปรียบเทียบค่าการรับแรงเฉือนของคาน พบว่าการจัดเรียงตัวของสลักเกลียวแบบสมมาตรรับแรงเฉือนได้น้อยกว่า 36.74% เนื่องจากการจัดเรียงตัวของสลักเกลียวมีผลต่อขนาดและทิศทางของรอยแตกของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยและคาน

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงตัวของเส้นใย ชนิดของเส้นใยเหล็กและเส้นใยชนิดอื่น ต่อกำลังรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใย นอกจากนี้ควรศึกษาในกรณีคานที่มีค่าอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล ( $a/d$ ) ในช่วงอื่น

### รายการอ้างอิง

- [1] Van Chanh, N. (2004) Steel fiber reinforced concrete. in Faculty of Civil Engineering Ho chi minh City university of Technology. Seminar Material, pp. 108-116.
- [2] Shah, S.P., et al. (1988) Measurement of properties of fiber reinforced-concrete. ACI Mater J 85(6): 583-593.
- [3] Johnston, C.D. (1974) Steel fiber reinforced mortar and concrete: a review of mechanical properties. Special Publication 44: 127-142.
- [4] Hsu, L.S. and Hsu, C.T. (1994) Stress-strain behavior of steel-fiber high-strength concrete under compression. Structural Journal 91(4): 448-457.
- [5] Barros, J.A. and Figueiras, J.A. (1999) Flexural behavior of SFRC: testing and modeling. Journal of Materials in Civil Engineering 11(4): 331-339.
- [6] Nataraja, M., Dhang, N., and Gupta, A. (1999) Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. Cement and concrete composites 21(5): 383-390.
- [7] Lee, S.-C., Oh, J.-H., and Cho, J.-Y. (2015) Compressive behavior of fiber-reinforced concrete with end-hooked steel fibers. Materials 8(4): 1442-1458.
- [8] Rilem, T. (2003) 162-TDF, “ $\sigma$ - $\epsilon$  design method-final recommendation”. Materials and Structures 36: 560-567.
- [9] INSTRUCCIÓN, D.H.E. (2008) EHE-08. Catálogo de publicaciones del Ministerio de Fomento Año.
- [10] Code Model CEB-FIP. (2010) International Federation for Structural Concrete (fib).
- [11] Kovar, M. and Foglar, M. (2015) An analytical description of the force-deflection diagram of FRC. Composites Part B: Engineering 69: 550-561.
- [12] ACI 363R-84 (1984) State-of-the-art Report on High-strength Concrete (ACI 363R-84). in: American Concrete Institute.
- [13] Iravani, S. (1996) Mechanical properties of high-performance concrete. Materials Journal 93(5): 416-426.



- [14] Bangash, M. (1989) Concrete and concrete structures: Numerical modelling and applications.
- [15] Hemmaty, Y. (1998) Modeling of the shear force transferred between cracks in reinforced and fiber reinforced concrete structures. in Proceedings of the ANSYS Conference, pp. 201-209.
- [16] Padmarajaiah, S. (1999) Influence of fibers on the behavior of high strength concrete in fully/partially prestressed beams: an experimental and analytical study. Bangalore, India: Indian Institute of Science 904.
- [17] Özcan, D.M., Bayraktar, A., Şahin, A., Haktanir, T., and Türker, T. (2009) Experimental and finite element analysis on the steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behavior. *Construction and Building Materials* 23(2): 1064-1077.
- [18] Padmarajaiah, S. and Ramaswamy, A. (2002) A finite element assessment of flexural strength of prestressed concrete beams with fiber reinforcement. *Cement and Concrete Composites* 24(2): 229-241.
- [19] Genikomsou, A.S. and Polak, M.A. (2015) Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. *Engineering Structures* 98: 38-48.
- [20] อติชน คุณาวิศรุต และ สิริลาภมล พูลทรัพย์ (2558) อิทธิพลของชนิดรอยต่อต่อพฤติกรรมการต้านแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก. *ปริญาฎตรี, วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.*
- [21] ชัยสิริพงษ์ คุณากรมงคล และ นรวิษณุ เหมสถาปัตยกรรม (2559) การเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยสำเร็จรูป. *ปริญาฎตรี, วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.*
- [22] Willam, K. and Warnke, E. (1974) Constitutive Model for Triaxial Behaviour of Concrete”, Seminar on Concrete Structures Subject to Triaxial Stresses. in International Association of Bridge and Structural Engineering Conference, Bergamo, Italy, p. 174.
- [23] Nammur Jr, G. and Naaman, A.E. (1989) Bond stress model for fiber reinforced concrete based on bond stress-slip relationship. *Materials Journal* 86(1): 45-57.

- [24] Edwards, A. and Yannopoulos, P. (1979) Local bond-stress to slip relationships for hot rolled deformed bars and mild steel plain bars. in *Journal Proceedings*, pp. 405-420.
- [25] Spencer, R., Panda, A., and Mindess, S. (1982) Bond of deformed bars in plain and fibre reinforced concrete under reversed cyclic loading. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 4(1): 3-17.
- [26] Soroushian, P. and Lee, C.-D. (1990) Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete. *Materials Journal* 87(5): 433-439.
- [27] Hu, H.-T., Lin, F.-M., and Jan, Y.-Y. (2004) Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened by fiber-reinforced plastics. *Composite Structures* 63(3): 271-281.
- [28] Hognestad, E. (1951) Study of combined bending and axial load in reinforced concrete members. University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station.
- [29] Bažant, Z.P. and Becq-Giraudon, E. (2002) Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard. *Cement and Concrete Research* 32(4): 529-556.



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีรวัช โภยแก้วพริ้ง เกิดเมื่อวันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2534 ที่กรุงเทพมหานคร เป็นบุตรคนที่ 1 จากจำนวนทั้งหมด 2 คนของคุณพ่อ กิตติพจน์ โภยแก้วพริ้ง และคุณแม่ เจริญ โภยแก้วพริ้ง ได้เข้ารับการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนพหุพัฒน์นทบุรี ส่วนในระดับมัธยมศึกษาได้เข้ารับการศึกษที่โรงเรียนอมาตยกุล และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2555 และได้เข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา (โครงสร้าง) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 จนถึงปัจจุบัน

