



พฤติกรรมรอยต่อคอนกรีตสมรรถนะสูงเสริมเส้นใยของคานคอนกรีตสำเร็จรูป
Ultra-High Performance Fiber Concrete Joint Behavior of Precast Concrete
Beam

นฤสรณ์ ศรีสวัสดิ์
Narusorn Srisawat

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Prince of Songkla University
2566
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



พฤติกรรมรอยต่อคอนกรีตสมรรถนะสูงเสริมเส้นใยของคานคอนกรีตสำเร็จรูป
Ultra-High Performance Fiber Concrete Joint Behavior of Precast Concrete
Beam

นฤสรณ์ ศรีสวัสดิ์
Narusorn Srisawat

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Prince of Songkla University

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ พหุติกรรมรอยต่อคอนกรีตสมรรถนะสูงเสริมเส้นใยของคานคอนกรีตสำเร็จรูป
 ผู้เขียน นายณัฐสรณ์ ศรีสวัสดิ์
 สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชัยรัตน์ แก้วเจือ)

.....ประธานกรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะวัชร ฝอยทอง)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์อินทร์ อินทฤทธิ)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชัยรัตน์ แก้วเจือ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง
 ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กวิณพัฒน์ สิริกานโสภาณ)
 รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชัยรัตน์ แก้วเจือ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ

(นายณฤศร์ ศรีสวัสดิ์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นายณฤศร์ ศรีสวัสดิ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ พฤติกรรมรอยต่อคอนกรีตสมรรถนะสูงเสริมเส้นใยของคานคอนกรีตสำเร็จรูป
ผู้เขียน นายนฤสรณ์ ศรีสวัสดิ์
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)
ปีการศึกษา 2566

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีการใช้โครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปในงานก่อสร้างขนาดใหญ่มากขึ้นเช่น บันได แผ่นพื้น คาน เสา และผนัง การใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปส่วนที่ต้องระวังมากที่สุด คือ จุดเชื่อมต่อของชิ้นส่วนในแต่ละชั้นจะต้องมีความแข็งแรงที่เพียงพอในการเชื่อมต่อ เช่น จุดต่อของเสาและคาน จุดต่อระหว่างคานกับคาน ก็จะใช้การต่อเหล็กเสริมกำลังและใช้คอนกรีตปิดรอยต่อนั้น ๆ การควบคุมคุณภาพของจุดต่อนั้นกระทำได้ยากมาก เพราะมีเหตุปัจจัยภายนอกมากมายเกินการควบคุม ดังนั้นจึงเห็นว่า จุดต่อระหว่างคานกับคานสามารถต่อโดยการใช้เหล็กเสริมทาบกันเหมือนกับการทาบต่อเหล็กปกติแต่ในส่วนช่องว่างนั้นใช้วิธีการต่อด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูงมาใช้แทนการต่อด้วยคุณกิริตธรรมดา กำลังของคอนกรีตสมรรถนะสูงนั้นมีค่าประมาณ 100-160 เมกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึง ศึกษาพฤติกรรมของจุดต่อระหว่างคาน และคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเหล็กเสริมกำลังต่อด้วยการทาบแบบทั่วไป และจุดต่อของคอนกรีตจะเชื่อมต่อด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูง และปูนซีเมนต์แบบไม่หดตัว โดยทำการทดสอบแรงดัดแบบ 4 จุด มีวัตถุประสงค์เพื่อ ประเมินสมรรถนะของการเชื่อมต่อในการถ่ายเทแรงในคานและสังเกตการณ์บริเวณวิกฤตของรอยเชื่อมต่อ ตัวอย่างคานที่ใช้ทดสอบมี ความกว้าง 150 มิลลิเมตร ความสูง 150 มิลลิเมตร และความยาว 700 มิลลิเมตร คอนกรีตกำลังอัดออกแบบรูปทรงกระบอกมาตรฐานบ่มด้วยอากาศที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 32 เมกะปาสคาลใช้เหล็กข้ออ้อยรับแรงดิ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ชั้น คุณภาพ SD40 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ คือ ระยะทาบของเหล็กเสริมกำลังในช่วงกลางคาน โดยใช้ระยะทาบของเหล็กเท่ากับ 3 เท่า, 6 เท่า และ 9 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก และอัตราส่วนความลึกระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูงกับปูนซีเมนต์แบบไม่หดตัว โดยความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงจะมี 3 ระดับ คือ 50 มิลลิเมตร, 75 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร ของความลึกคาน โดยทำการเตรียมตัวอย่าง ทั้งหมด 30 ตัวอย่าง และทดสอบภายใต้ตัวแปรที่กำหนดแบบละ 3 ตัวอย่าง ทำการบันทึกรูปแบบการวิบัติ การแตกร้าว และการตอบสนองต่อแรง ผลการศึกษาระยะทาบที่ 9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม และความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงเท่ากับ 100 มิลลิเมตร สามารถรับน้ำหนักได้มากที่สุด แต่ก็ยังน้อยกว่าคานที่ไม่มีการเชื่อมต่อ

คำสำคัญ : คอนกรีตสมรรถนะสูง, การทดสอบแรงดัดแบบสี่จุด, เหล็กข้ออ้อย, ระยะทาบเหล็ก, ปูนซีเมนต์แบบไม่หดตัว

Thesis Title	Ultra-High Performance Fiber Concrete Joint Behavior of Precast Concrete Beam
Author	Mr. Narusorn Srisawat
Major Program	Civil Engineering (Structural Engineering)
Academic Year	2023

ABSTRACT

Currently, precast concrete structures are gaining popularity in large-scale construction projects, such as staircases, floor slabs, beams, columns and walls. The most critical part of using precast components is the strength of the connections between these components, such as the connections between column and beam or beam and beam. Ensuring the quality of these connections is challenging because there are many external factors to control. Therefore, it is seen that the connections between beam and beam can be made by using reinforced steel bars like traditional steel connections. High-performance concrete is used instead of ordinary concrete in the gap. The strength of high-performance concrete is approximately 100-160 MPa, which is significantly higher than regular concrete. Thus, this research studies the behavior of connections between beam and beam with high-strength concrete, where reinforced steel bar is connected by traditional steel connections and the connection points of concrete are made with high-strength concrete and non-shrinking cement. The tests are conducted in a 4-point bending configuration with the objective of evaluating the performance of the connections in transmitting forces between the beams and observing critical failure phenomena of the connection. The tested beams have dimensions of 150 mm in width, 150 mm in height, and 700 mm in length. The concrete is designed with a standard cylinder compressive strength of 32 MPa at 28 days, and the steel reinforcement has a diameter of 12 mm with a quality grade of SD40. The depths of high-strength concrete are divided into three levels i.e. 50 mm, 75 mm and 100 mm. A total of 30 samples are prepared and tested under the specified variables in sets of three samples. The testing data is recorded deformation patterns, crack propagation, and response to loads. The results shown that the splice length of

(7)

9 times the diameter of the reinforcement steel and a depth of 100 mm of high-strength concrete can support the highest load, although it is still less than a beam without a connection.

Keywords: Ultra-high performance concrete, four-point bending test, reinforced steel, splice length of reinforcement steel, non-shrinking cement

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชัยรัตน์ แก้วเจือ อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะวัชร ฝอยทอง ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์อินทร์ อินทฤทธิ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษา และข้อเสนอแนะต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย ทำให้ผู้เขียนวิจัยมีความรู้ความเข้าใจ ทั้งในเชิงวิชาการ และเทคนิคต่าง ๆ มากขึ้น รวมถึงการตรวจสอบข้อบกพร่องที่เกิดจากความเอาใจใส่

ขอขอบพระคุณ นายจารึก ไชยวรรณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม ที่อำนวยความสะดวก ให้คำแนะนำ คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการใช้อุปกรณ์ห้องปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี

ขอขอบพระคุณ นายสิทธิพงษ์ สมดำ ที่ให้ความสะดวก และความสนับสนุน เครื่องมืออุปกรณ์ ในการใช้ห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตสำเร็จรูป

ขอขอบพระคุณ ทางบริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด ที่ให้ความสนับสนุนอุปกรณ์ในการทดสอบ Strain Gauge, ส่วนผสมในการทำคอนกรีตสมรรถนะสูง เครื่องไม้คอนกรีตสมรรถนะสูง ทำให้มีโอกาสได้ใช้ความรู้ในการหล่อคอนกรีตสมรรถนะสูงและได้มีโอกาสศึกษางานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่สนับสนุน ทั้งสถานที่ และแหล่งข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ผองเพื่อน และรุ่นพี่รุ่นน้องที่มีส่วนร่วม และให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ครูอาจารย์ทั้งในอดีต และปัจจุบันที่ได้ให้การอบรม สั่งสอน ให้ความรู้แก่ผู้วิจัย ซึ่งส่งผลให้ผู้วิจัยสามารถมาสู่อีกจุดสำเร็จหนึ่งของชีวิตได้

ท้ายที่สุดผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่มอบความรัก อบรมสั่งสอน เลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษา ให้การช่วยเหลือด้านต่าง ๆ และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ทำให้การศึกษา และทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นฤสรณ์ ศรีสวัสดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(8)
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(13)
สัญลักษณ์และคำย่อ	(15)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรม	4
2.1 คอนกรีตทั่วไป	4
2.2 คอนกรีตสมรรถนะสูง	4
2.3 มาตรฐานการทดสอบการรับแรงดัดของคอนกรีต	5
2.4 การทดสอบความต้านทานแรงอัดของคอนกรีต	6
2.5 ระยะเวลาต่อทาบเหล็กเสริมในคาน	7
2.6 การวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	8
2.7 ทบทวนวรรณกรรม	8
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	15
3.1 ขั้นตอนการวิจัย	15
3.2 ลักษณะทั่วไปของคาน	16
3.3 รายละเอียดคานตัวอย่าง	18
3.4 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์	20
3.4.1 วัสดุผสมคอนกรีต	20
3.4.2 เหล็กเสริมในคอนกรีต	21
3.4.3 คอนกรีตสมรรถนะสูง	21
3.5 การหล่อคานตัวอย่างและเชื่อมต่อคาน	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.1 การหล่อคานตัวอย่าง	23
3.5.2 การเชื่อมต่อกานด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูง	27
3.6 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบคาน	31
บทที่ 4 ผลการทดสอบคาน	35
4.1 ผลการทดสอบกำลังการรับแรงอัดของคอนกรีตและคอนกรีตสมรรถนะสูง	35
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโก่งตัวและแรงกับความเครียดของเหล็กเสริมในคาน	36
4.3 กำลังรับแรงต่อระยะทาบของเหล็กเสริมและความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง	41
4.3.1 กำลังรับแรงต่อระยะทาบของเหล็กเสริม	41
4.3.2 กำลังรับแรงต่อความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง	44
4.4 รอยแตกร้าวและลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง	48
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	62
5.1 สรุปผลการศึกษา	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	64
บรรณานุกรม	65
ภาคผนวก	68
ภาคผนวก ก	69
ภาคผนวก ข	71
ภาคผนวก ค	74
ภาคผนวก ง	78
ภาคผนวก จ	80
ประวัติผู้เขียน	111

รายการตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงระยะทาบเหล็กที่ใช้	7
ตารางที่ 3.1 แสดงสัญลักษณ์ของตัวอย่างคาน	17
ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตของคานต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร	20
ตารางที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด	20
ตารางที่ 3.4 แสดงคุณสมบัติของเหล็กเสริม	21
ตารางที่ 3.5 แสดงรายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร	21
ตารางที่ 4.1 แสดงกำลังการต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเฉลี่ย	35
ตารางที่ 4.2 แสดงน้ำหนักประลัยเฉลี่ย ความเครียดในเหล็กเสริม และการโก่งตัวของตัวอย่างคาน	37
ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดลักษณะรอยแตกร้าวของคานทั้งหมด 10 แบบ จำนวน 30 ตัวอย่าง	49

รายการภาพประกอบ

	หน้า
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	16
รูปที่ 3.2 รายละเอียดของตัวอย่างคาน	19
รูปที่ 3.3 ปูนที่ใช้ผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง	22
รูปที่ 3.4 เส้นใยเหล็ก (STEEL FIBER)	22
รูปที่ 3.5 สารลดน้ำ	23
รูปที่ 3.6 การผูกเหล็กเสริม	24
รูปที่ 3.7 การติดตั้งตัววัดความเครียด (STRAIN GAUGE)	24
รูปที่ 3.8 การใส่เหล็กเสริมลงในแบบ	25
รูปที่ 3.9 การใส่คานที่มีจุดเชื่อมต่อลงในแบบ	25
รูปที่ 3.10 การผสมคอนกรีต	26
รูปที่ 3.11 การทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต	26
รูปที่ 3.12 การนำคอนกรีตใส่ลงในแบบหล่อ	27
รูปที่ 3.13 การประกอบแบบหล่อเพื่อเชื่อมต่อคาน	28
รูปที่ 3.14 การทาน้ำยาเชื่อมประสานคอนกรีต	28
รูปที่ 3.15 การทดสอบการไหลของคอนกรีตสมรรถนะสูง (UHPC)	29
รูปที่ 3.16 การเก็บตัวอย่างคอนกรีตสมรรถนะสูง	30
รูปที่ 3.17 การเทคอนกรีตสมรรถนะสูง และปูนนอนชริงเพื่อเชื่อมต่อคาน	30
รูปที่ 3.18 การนำจุดรองรับการกระจายแรง และติดตั้งเครื่องวัดแรง (LOAD CELL)	31
รูปที่ 3.19 การตัววัดการโก่งตัว (LVDT) บริเวณกึ่งกลางคาน	32
รูปที่ 3.20 การติดตั้ง และตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์ก่อนทดสอบ	33
รูปที่ 3.21 ตัวอย่างคานเมื่อทำการทดสอบ และเกิดการวิบัติ	34
รูปที่ 3.22 เก็บข้อมูลรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง	34
รูปที่ 4.1 แสดงการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง	36
รูปที่ 4. 2 แสดงตัวอย่างกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-0D-00	39
รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างกำลังการรับแรง และความเครียดในเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-0D-00	40
รูปที่ 4.4 แสดงกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-6D-100	40
รูปที่ 4.5 แสดงกำลังการรับแรง และความเครียดในเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-6D-100	41
รูปที่ 4.6 แสดงความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ 50 มิลลิเมตร	42
รูปที่ 4.7 แสดงความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ 75 มิลลิเมตร	42

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 แสดงความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ 100 มิลลิเมตร	43
รูปที่ 4.9 แสดงกำลังรับแรงประลัย กับระยะทาบเหล็กเสริมของคานในแต่ละความลึกของ (UHPC)	43
รูปที่ 4.10 แสดงกำลังรับแรงประลัยของคานที่ระยะทาบ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม	45
รูปที่ 4.11 แสดงกำลังรับแรงประลัยของคานที่ระยะทาบ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม	45
รูปที่ 4.12 แสดงกำลังรับแรงประลัยของคานที่ระยะทาบ 9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม	46
รูปที่ 4.13 แสดงกำลังรับแรงประลัย กับความลึกของ (UHPC) ในแต่ละระยะทาบของเหล็กเสริม ในคาน	47
รูปที่ 4.14 แสดงกำลังรับแรงประลัยเฉลี่ยของตัวอย่างคานแต่ละแบบ	47

สัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standard
kgf	Kilogram Force
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
SD	Standard Deformed Bar
UHPC	Ultra-High Performance Concrete
UHPFRC	Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete
USD	Ultimate strength design
W/B	Water Binder Ratio
W/C	Water Cement Ratio
มทช.	มาตรฐานงานทางหลวงชนบท
มยผ.	มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง
มอก.	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในงานก่อสร้างตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันขั้นตอนการก่อสร้างก็จะมีรูปแบบคือ การสร้างฐานราก และขึ้นส่วนที่ต่อขึ้นมาจากฐานรากหากเป็นบ้านเรือนก็จะเป็นคานแล้วก็เสาตามลำดับ ส่วนในงานก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น อาคารสูง คอนโดมิเนียม อพาร์ทเมนต์ ทาวน์เฮ้าส์ เป็นต้น ก็มีรูปแบบการก่อสร้างที่ไม่แตกต่างกันมาก การก่อสร้างในรูปแบบนี้ก็มีตัวเลือกในการใช้โครงสร้างที่นิยมนำมาใช้กันก็คือ โครงสร้างเหล็ก หรือโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างในแต่ละแบบก็จะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป โครงสร้างเหล็กมีข้อดีคือ สามารถก่อสร้างได้รวดเร็วเนื่องจากสามารถนำชิ้นส่วนมาประกอบได้เลย ออกแบบรูปทรงได้ตามความต้องการ มลพิษในการก่อสร้างน้อย เนื่องจากชิ้นส่วนผลิตจากโรงงาน โครงสร้างเหล็กสามารถนำมาใช้ใหม่ได้ ข้อเสียของโครงสร้างเหล็กคือ โครงสร้างเป็นชิ้นส่วนที่ถูกผลิตในโรงงานในขั้นตอนการติดตั้งประกอบจำเป็นต้องใช้ช่างฝีมือในการติดตั้ง โครงสร้างเหล็กทนไฟได้น้อยเนื่องจากเหล็กเป็นตัวนำไฟจึงต้องคำนึงถึงเรื่องนี้ ค่าบำรุงรักษาในระยะยาว เช่น ทาสีกันสนิม พันวัสดุทนไฟ ในส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กข้อดี คือ เป็นที่นิยมวัสดุในการก่อสร้างหาได้ทั่วไป การดูแลรักษาง่าย ข้อเสียของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือ ใช้เวลาในการก่อสร้างนาน เมื่อมีงานต่อเติมสามารถทำได้ยาก มลพิษด้านสิ่งแวดล้อมมาก ในปัจจุบันได้มีการใช้แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอย่างแพร่หลายมากขึ้น และในงานก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น งานก่อสร้างคอนโดมิเนียมที่มีรูปแบบการสร้างซ้ำ ๆ กันทำให้สามารถผลิตชิ้นส่วนขึ้นมาก่อนแล้วนำไปติดตั้งหน้างานเพื่อให้งานเสร็จได้เร็วขึ้น และในงานที่เป็นหมู่บ้านจัดสรรก็มีรูปแบบการก่อสร้างที่ซ้ำ ๆ กันมีการใช้ผนังสำเร็จรูปมาใช้งาน และในงานสะพานหรือ ถนนยกระดับก็ใช้ชิ้นส่วนที่ผลิตจากโรงงานมาติดตั้งในหน้างาน การใช้ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปเป็นที่แพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน

ปัจจุบันในงานก่อสร้างบ้านเดี่ยว ทาวน์เฮ้าส์ อพาร์ทเมนต์ก็มีการใช้ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปในโครงสร้างหลักของตัวบ้านกันมากขึ้น ในชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป เช่น คาน เสา แผ่นพื้น และผนัง มีการควบคุมมาตรฐานจากโรงงาน การใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปส่วนที่ต้องให้ความสำคัญที่สุดคือ จุดเชื่อมต่อของชิ้นส่วนในแต่ละชั้นจะต้องมีความแข็งแรงที่เพียงพอ ในการเชื่อมต่อ เช่น จุดเชื่อมต่อของเสาและคานก็จะใช้การเชื่อมและ ใช้คอนกรีตปัดรอยเชื่อมนั้น ซึ่งการเชื่อมนั้นสามารถควบคุมคุณภาพได้ยาก ในส่วนของจุดเชื่อมคาน และเสาคานจะเป็นตัวรับโมเมนต์และรับแรงจากพื้นทำให้ในส่วนนั้นหากจุดเชื่อมไม่แข็งแรงพอจะทำให้เกิดการวิบัติได้ ใ้ส่วนการเชื่อมต่อของเสา และคาน หรือ

ระหว่างคาน และคานสามารถเชื่อมต่อโดยการให้เหล็กทาบกันเหมือนกับการทาบต่อเหล็กปกติแต่ในส่วนช่องว่างที่เชื่อมต่อใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงมาใช้แทนการเชื่อมต่อ คอนกรีตสมรรถนะสูงนี้มีกำลังรับแรงอัดสูง 1,000-1,600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปมาก แต่ระยะการทาบที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นจุดเชื่อมต่อยังไม่ชัดเจนจึงจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับระยะการทาบที่เหมาะสมเพื่อนำไปพัฒนาต่อในการใช้กับจุดต่อของโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป และคอนกรีตสมรรถนะสูงเป็นวัสดุที่มีต้นทุนสูงจึงจำเป็นต้องลดต้นทุนโดยการใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงในบริเวณคานที่รับแรงดึง แต่ระยะความลึกของคอนกรีตที่เหมาะสม และประหยัดต้นทุนนั้น ต้องมีจำเป็นการศึกษาในงานวิจัยนี้

ในการจะใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงในจุดเชื่อมต่อนั้นก็จำเป็นที่จะต้องรู้พฤติกรรมและความสามารถในการรับแรงในจุดเชื่อมต่อนั้น คือ การทดสอบหาเพื่อกำกำลังรับแรงอัด และแรงดึงของคอนกรีตสมรรถนะสูง ทดสอบหาระยะทาบที่เหมาะสม และความลึกของคอนกรีตสำหรับคอนกรีตเสริมแรงสมรรถนะสูงเพื่อจะสามารถนำไปออกแบบจุดเชื่อมต่อนั้นได้อย่างปลอดภัย

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

วัตถุประสงค์ในการศึกษาจุดเชื่อมต่อของคานด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูงมีดังนี้

- 1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตัดของคานที่มีจุดเชื่อมต่อของคอนกรีตสมรรถนะสูง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาระยะทาบที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตเสริมเหล็กสมรรถนะสูง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาหาความลึกที่เหมาะสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงสำหรับการใช้ในจุดเชื่อมต่อ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนคอนกรีตสมรรถนะสูง ตัววัดความเครียดในเหล็กเสริม (Strain gauge) และเครื่องมือคอนกรีตสมรรถนะสูง จากบริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (SCG) เพื่อนำมาทดสอบให้เกิดประโยชน์ในการพัฒนาวัสดุในงานก่อสร้างที่ก้าวหน้าขึ้นในอนาคตขอบเขตของงานวิจัยมีดังนี้

- 1.3.1 ขนาดของคานทดสอบกว้าง 150 มิลลิเมตร ลึก 150 มิลลิเมตร และยาว 700 มิลลิเมตร
- 1.3.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กสมรรถนะสูงที่ระยะทาบต่าง ๆ ในจุดเชื่อมต่อนั้น ระยะทาบที่ 3 เท่า 6 เท่า และ 9 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม
- 1.3.3 ความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงในบริเวณจุดเชื่อมต่อความลึกที่ใช้คือ 5.0 เซนติเมตร 7.5 เซนติเมตร และ 10.0 เซนติเมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษามีดังนี้

1.4.1 ได้รู้พฤติกรรมการตั้งของคานที่มีรอยต่อคอนกรีตสมรรถนะสูง

1.4.2 สามารถนำไปใช้ในการออกแบบจุดเชื่อมต่อที่ใช้คอนกรีตเสริมเหล็กสมรรถนะ

สูงได้

1.4.3 ได้รู้พฤติกรรมการวิบัติของคานที่มีจุดเชื่อมต่อคอนกรีตเสริมเหล็กสมรรถนะ

สูง

บทที่ 2

ทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรม

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระยะทาบเหล็กเสริมของคานที่มีการเชื่อมต่อกับคองกรีตสมรรถนะสูงเพื่อหาระยะทาบที่เหมาะสม และความลึกที่เหมาะสมของคองกรีตสมรรถนะสูงในการเชื่อมต่อ

2.1 คองกรีตทั่วไป

คองกรีตโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมที่สำคัญอยู่ 4 อย่างคือ ปูนซีเมนต์ ทราย (มวลรวมละเอียด) หิน หรือกรวด (มวลรวมหยาบ) และน้ำ โดยจะมีสารเคมีที่เติมเข้าไปขึ้นอยู่กับประเภทของการใช้งาน ปูนซีเมนต์ และน้ำจะทำปฏิกิริยาทางเคมี คือ ไฮเดรชัน เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจะเรียกว่า ซีเมนต์ จะเป็นตัวที่ช่วยยึดเกาะให้มวลรวมยึดเข้าด้วยกันจนแข็งตัว การพัฒนากำลังของคองกรีตขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือมีความร้อนจากภายนอกจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์จึงต้องมีการบ่มคองกรีตเมื่อคองกรีตแข็งตัวแล้ว โดยทั่วไปแล้วกำลังของคองกรีตจะพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 28 วันแรกหลังจากนั้นจะเป็นการพัฒนาอย่างช้า ๆ คุณสมบัติหลักของคองกรีตคือ กำลังรับแรงอัด ส่วนกำลังรับแรงดึงของคองกรีตน้อยจะมีค่าน้อยเพราะคองกรีตเป็นวัสดุเปราะ กำลังรับแรงดึงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัด

2.2 คองกรีตสมรรถนะสูง

คองกรีตสมรรถนะสูง (Ultra-High Performance Concrete, UHPC) เป็นวัสดุซีเมนต์รุ่นใหม่ที่มีความแข็งแรงความเหนียว และความต้านทานสูงมีการใช้งานในการก่อสร้างซ่อมแซมส่วนที่เสียหาย หรือในสิ่งที่ต้องการเสริมกำลัง เช่น การซ่อมโครงสร้างส่วนที่เสียหาย คองกรีตสมรรถนะสูงมีกำลังรับแรงอัดประมาณ 1,000-1,600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ขึ้นไป มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ต่ำมาก และอัตราน้ำต่อสารยึดเกาะ (W/B) 0.14 ถึง 0.20 ซึ่งต่ำกว่าคองกรีตทั่วไปที่อยู่ 0.40 ถึง 0.50 คองกรีตสมรรถนะสูงจะมีส่วนผสมอื่นที่แตกต่างจากคองกรีตทั่วไป คือ ซิลิกาฟูม เส้นใยชนิดที่ใช้มีหลากหลายรูปแบบ เช่น เส้นใยเหล็ก เส้นใยแก้ว เส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ และทรายควอทซ์ละเอียดมาก ซึ่งในการใช้คองกรีตสมรรถนะสูงที่ก็มีการปรับเปลี่ยนส่วนผสมและปรับปรุงคุณสมบัติตามการใช้งานที่เหมาะสม

ส่วนประกอบ และอัตราส่วนของคองกรีตสมรรถนะสูง คองกรีตโดยทั่วไปจะมีความพรุน ซึ่งความพรุนเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มกำลังคองกรีตถ้าความพรุนในคองกรีตน้อยกำลังของคองกรีตก็จะเพิ่มขึ้น ส่วนประกอบที่สำคัญของคองกรีตสมรรถนะสูง คือ สารยึดเกาะเป็นที่ยอมรับ

กำลังรับแรงของคอนกรีตมีคุณภาพสูงขึ้นโดยสารยึดเกาะนี้จะมีขนาดที่เล็กเป็นพิเศษ สารยึดเกาะที่ใช้คือ ปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟูม ผงหินปูน ผงควอทซ์ ตะกรันที่ได้จากเตาหลอม และสารลดน้ำถูกใช้งานเพื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ให้มีค่าน้อยลง และการไหลของคอนกรีตยังสามารถทำงานได้ง่าย องค์ประกอบอาจมีมากกว่านี้ หรือน้อยกว่านี้ได้ขึ้นอยู่กับสูตรในการใช้งาน และการปรับปรุงองค์ประกอบ

2.3 มาตรฐานการทดสอบการรับแรงดัดของคอนกรีต

มาตรฐานการทดสอบการรับแรงดัดของคอนกรีต (มทช.(ท) 105.2-2545) (Flexural Strength of Concrete) การทดสอบหาการรับแรงดัดของคอนกรีต โดยสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีใช้แรงกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคาน (Center-Point Loading) และวิธีใช้แรงกดคาน 2 จุด โดยให้ตำแหน่งของจุดทั้งสองเป็นตำแหน่งที่แบ่งคานออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน (Third-Point Loading) การทดสอบการรับแรงดัดของคอนกรีตทำได้โดยการทดสอบคานตัวอย่างมาตรฐานที่มีความยาวประมาณ 3 เท่าของส่วนสูงโดยทั่วไปชิ้นตัวอย่างจะต้องมีขนาดที่กำหนดให้ในแต่ละงาน ความเป็ยเบนจากขนาดที่กำหนดจะต้องไม่เกิน 3.2 มิลลิเมตร สำหรับขนาดกว้าง หรือลึกเกิน 152 มิลลิเมตร ขึ้นไป และไม่เกิน 1.6 มิลลิเมตร สำหรับขนาดเล็กกว่านั้น การคำนวณค่าการรับแรงดัดจะกำหนดให้อยู่ในรูปของโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of Rupture)

สำหรับการกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคาน (Center-Point Loading) สามารถหาค่าการรับแรงดัดได้จากสมการ (2.1)

$$R = \frac{3Pa}{2bd^2} \quad (2.1)$$

สำหรับการกดสองจุดโดยตำแหน่งที่จุดทั้งสองแบ่งคานออกเป็นสามส่วน (Third-Point Loading) สามารถหาค่าการรับแรงดัดได้ จากสมการ (2.2)

- เมื่อรอยแตกอยู่ในช่วงกลางคาน

$$R = \frac{PL}{2bd^2} \quad (2.2)$$

- เมื่อรอยแตกอยู่นอกช่วงกลางคาน และห่างจากช่วงกลาง ไม่เกินร้อยละ 5 ของช่วงคานใช้ สมการ (2.3)

$$R = \frac{3Pa}{2bd^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ R = ค่าการรับแรงดัดเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

P = แรงที่จุดวิบัติของคานเป็นกิโลกรัม

L = ช่วงคานเป็นเซนติเมตร

b = ความกว้างเฉลี่ยที่หน้าตัดบริเวณรอยแตกเป็นเซนติเมตร

d = ความลึกเฉลี่ยที่หน้าตัดบริเวณรอยแตกเป็นเซนติเมตร

a = ระยะเฉลี่ยของรอยแตกจากฐานรองคานด้านใกล้ที่สุดเป็นเซนติเมตร

2.4 การทดสอบความต้านทานแรงอัดของคอนกรีต

กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับมวลรวมหยาบ และพันธะระหว่างมอร์ตาร์กับมวลรวม คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่มีคุณภาพมีกำลังรับแรงที่ดีกำลังการรับแรงของคอนกรีตก็จะมากขึ้นด้วย การเพิ่มมวลรวมหยาบในคอนกรีตจะทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นแต่ต้องคำนึงถึงการทำงานเนื่องจากถ้ามวลรวมหยาบเพิ่มขึ้นการทำงานจะยากขึ้นคอนกรีตจะไหลได้ยาก คอนกรีตที่มีพันธะระหว่างมอร์ตาร์กับมวลรวมสูงก็จะทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นสูงด้วย พันธะของมอร์ตาร์กับมวลรวมหยาบขึ้นอยู่กับ ลักษณะของมวลรวม และปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ การลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ให้น้อยลงก็จะสามารถเพิ่มกำลังให้คอนกรีตได้ แต่ต้องคำนึงถึงการไหลของคอนกรีตเนื่องจากน้ำน้อยทำให้คอนกรีตหนืดขึ้น จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงของคอนกรีตนั้นจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมที่เหมาะสม และต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ ด้วยนอกจากเรื่องของกำลังการรับแรง เช่น ความสะดวกในการทำงาน กำลังของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติหลักในการนำมาออกแบบโครงสร้างการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตจะทำการทดสอบเมื่อคอนกรีตอายุครบ 28 วันเป็นเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากคอนกรีตจะพัฒนากำลังอัดเต็มที่เมื่อ 28 วัน และจะพัฒนาเพิ่มขึ้นหลังนี้แล้วได้น้อยมาก โดยการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดมีอยู่ 2 มาตรฐานคือ

2.4.1 ทรงลูกบาศก์มาตรฐาน BS EN 12390-1, BS EN 12390-2, BS EN 12390-3, BS EN 12390-4 ขนาดของตัวอย่างคือ $15 \times 15 \times 15$ เซนติเมตร กำลังต้านทานแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์จะมีค่ามากกว่าทรงกระบอกเนื่องจากตัวอย่างทรงลูกบาศก์มีความชะลุดันน้อยกว่าทรงกระบอก วิธีการทดสอบนำตัวอย่างวางบนเครื่องทดสอบแรงอัด และให้แรงกดอย่างสม่ำเสมอจนตัวอย่างวิบัติ

2.4.2 ทรงกระบอกมาตรฐาน ASTM C 192 ขนาดของตัวอย่างคือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร วิธีการทดสอบนำตัวอย่างทรงกระบอกมาพอกตัวกำมะถันด้านบน และด้านล่างของตัวอย่างเพื่อให้ผิวที่รับแรงที่ลักษณะเรียบ ให้แรงกดอย่างสม่ำเสมอจนตัวอย่างวิบัติ

กำลังต้านทานแรงอัดคำนวณได้ จากสมการ(2.4)

$$f_c = \frac{P_u}{A} \quad (2.4)$$

เมื่อ f_c = กำลังต้านทานแรงอัด

P_u = แรกกดสูงสุด

A = พื้นที่เฉลี่ยที่รับแรงกด

2.5 ระยะเวลาต่อทาบเหล็กเสริมในคาน

การก่อสร้างบางครั้งอาจจะต้องมีการต่อทาบเหล็กเสริมเนื่องจากคาน หรือพื้นที่มีช่วงยาวทำให้ไม่สามารถใช้เหล็กเพียง 1 เส้นยาวตลอดช่วงนั้นได้ ซึ่งการต่อทาบเหล็กจึงจำเป็นต้องทำอย่างถูกต้องไม่ส่งผลต่อการรับแรงที่ได้ออกแบบไว้ ต้องมีมาตรฐานในการควบคุมระยะเวลาทาบตามมาตรฐานงานเหล็กเสริมคอนกรีต (มยผ.1103-52) แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงระยะทาบเหล็กที่ใช้

ชนิดเหล็ก	คุณสมบัติเหล็ก	ระยะทาบ (เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก)
เหล็กกลม	-	40
เหล็กข้ออ้อย	SD-30	30
เหล็กข้ออ้อย	SD-40	36
เหล็กข้ออ้อย	SD-50	45

การงอปลายเหล็กเสริมคอนกรีต สำหรับการงอ 90 องศา ให้ใช้กับเหล็กข้ออ้อยทุกขนาด และเหล็กเส้นกลมขนาดตั้งแต่ 15 มิลลิเมตรขึ้นไป และส่วนปลายจะต้องยาวต่อไปอีกอย่างน้อย 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก สำหรับการงอ 180 องศา ใช้กับเหล็กเส้นกลมที่มีขนาดเล็กกว่า 15 มิลลิเมตร และส่วนปลายจะต้องยาวต่อไปอีกอย่างน้อย 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก และระยะนี้ต้องไม่น้อยกว่า 60 มิลลิเมตร

2.6 การวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในขั้นตอนการออกแบบคาน เราจะออกแบบโดยให้คานอยู่ในสภาวะต่ำกว่าสมดุล (Under reinforcement) การเสริมเหล็กน้อยกำลังจากเหล็กเสริมมีค่าน้อยกว่ากำลังจากคอนกรีตทำให้เหล็กเสริมคราก่อน เป็นสภาวะที่ต้องการคือโครงสร้างจะไม่วิบัติโดยทันทีที่จะสามารถเห็นรอยร้าวจากคอนกรีตได้ก่อน หากเสริมเหล็กมากจะเป็นสภาวะสูงกว่าสมดุล (Over reinforcement) คอนกรีตจะวิบัติก่อนทำให้โครงสร้างวิบัติอย่างทันทีโดยไม่มีสัญญาณเตือนเนื่องจากคอนกรีตไม่เกิดการแตกร้าวเหล็กเสริมยังไม่ได้รับแรง ในการออกแบบจึงจำเป็นต้องใช้เหล็กให้เหมาะสม

รูปแบบการวิบัติของคานจึงมีการวิบัติด้วยการตัด และอีกรูปแบบหนึ่งคือ การวิบัติด้วยแรงเฉือนจะเกิดขึ้นทันทีทันใดดังนั้นในการออกแบบคานผู้ออกแบบจะออกแบบให้คานนั้นวิบัติด้วยการตัดก่อน เพื่อให้โครงสร้างมีความเหนียว คานคอนกรีตจะรับแรงดึงได้ต่ำจะมีรอยร้าวเกิดขึ้นเมื่อคานได้รับแรงดึงเกินกำลังที่ต้านได้ รอยร้าวจะทำมุมประมาณ 45 องศาจะอยู่ใกล้กับบริเวณจุดรองรับ รอยร้าวเอวเฉือน (Web shear) เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงในแนวทแยงเกิดกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต และในบางครั้งที่เกิดโมเมนต์ดัดในบริเวณเดียวกันจะเกิดรอยแตกจากแรงดัดก่อนและจะขยายเพิ่มขึ้นตามแนวแรงดึงคือ รอยร้าวดัดเฉือน (Flexural shear) จะเกิดขึ้นในบริเวณที่โมเมนต์ดัดน้อย และแรงเฉือนมีค่ามาก ลักษณะของรอยร้าวคือ จะมีรอยร้าวในแนวตั้งก่อนตามมาด้วยรอยร้าวเอียง

2.7 ทบทวนวรรณกรรม

Yin, Qiao and Hu (2019) ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของการแตกหักของคานภายใต้แรงดัดโดยใช้การทดสอบแรงดัดจอบแบบสี่จุด ตัวอย่างของคานทั้งหมดใช้ส่วนผสมเดียวกัน ขนาดของคานตัวอย่างเดียวกัน คือ มีความยาว 1000 มิลลิเมตร กว้าง 120 มิลลิเมตร และความลึก 200 มิลลิเมตร โดยให้รอยแตกเกิดขึ้นช่วงกลางของคาน อัตราส่วนของรอยแตกต่อความลึกมีค่าเท่ากับ 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตชนิดลูกบาศก์ $150 \times 150 \times 150$ มิลลิเมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 40.78 เมกะปาสคาล และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 32.46 จิกะปาสคาล ผลการศึกษาพบว่ารอยแตกเริ่มต้นจากปลายของรอยแตก การโก่งตัวของรอยแตกส่วนใหญ่เกิดจากบนเส้นรอยแตกล้วนมีมวลรวมหยาบ และเกิดจากผลของแรงเฉือน เมื่ออัตราส่วนความลึกของรอยแตกเพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 0.6 แรงสูงสุดที่ทำให้ตัวอย่างวิบัติก็จะเพิ่มขึ้น

Mousa (2015) ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตที่มีความยาวของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่แตกต่างกัน คานที่ใช้ทดสอบมีความยาว 2,200 มิลลิเมตร มีหน้าตัดของคานขนาด 200×150 มิลลิเมตร ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบนี้ คือ ความยาวของระยะรอยต่อของเหล็กเส้นรับแรงดึง 0, 300, 500 และ 700 มิลลิเมตร ขนาดของเหล็กเสริม 12 และ 16 มิลลิเมตร ปริมาณการเสริมเหล็กตามขวาง และระยะหุ้มคอนกรีต 20 และ 35 มิลลิเมตร โดยคอนกรีตที่ใช้จะมี

สองแบบ คือ ไม่ผสมซิลิกาฟูมและผสมซิลิกาฟูม 15 เปอร์เซ็นต์ โดยให้มีกำลังอัดที่ 55 และ 65 เมกะปาสคาล ตามลำดับ การทดสอบการตัดโดยใช้การทดสอบแบบ 4 จุด ผลจากการศึกษาพบว่า การแตกร้าวของคอนกรีตที่เหล็กเสริม 12 มิลลิเมตร และความยาวของรอยต่อ 300 มิลลิเมตร เกิดขึ้นอย่างฉับพลัน และเกิดขึ้นตลอดความยาวของรอยต่อ การใช้ซิลิกาฟูม 15 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ความแข็งแรงลดลงเล็กน้อย การแตกร้าวการรับน้ำหนัก และความเหนียวลดลงเพียงเล็กน้อย การเพิ่มขนาดของเหล็กเสริมจาก 12 มิลลิเมตร เป็น 16 มิลลิเมตร ความแข็งแรงของคานเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด การแตกร้าว และแรงที่กระทำก็เพิ่มขึ้นอย่างมาก การเพิ่มระยะหุ้มของคอนกรีตสามารถลดจำนวนรอยแตกร้าว

Ma et.al. (2020) ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของระยะทาบของเหล็กเสริม ปริมาณไฟเบอร์ และปริมาณเหล็กปลอก ตัวอย่างทดสอบใช้คอนกรีตเสริมแรงสมรรถนะสูง (Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC) ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือส่วนที่มีเหล็กปลอก และไม่มีเหล็กปลอก ลักษณะของตัวอย่างมีเหล็กเสริม 2 ชั้นทาบกันอยู่ในส่วนกลางของตัวอย่าง วิธีการทดสอบใช้การทดสอบแบบ 4 จุด เป็นลักษณะคานที่วางอยู่บนจุดรองรับ 2 ตัว และมีตัวกระจายแรงวางอยู่บนตัวอย่างถ่ายแรงลงบนตัวอย่าง 2 จุดโดยให้แรงลงบนตัวกระจายแรง ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ เกิดการวิบัติที่คอนกรีตแตกออก และเกิดการวิบัติเนื่องจากเหล็กเสริมหลัก ผลการศึกษาพบว่าเหล็กปลอกมีผลช่วยในการรับแรงดึง การเพิ่มปริมาณไฟเบอร์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงของคอนกรีต และการเพิ่มระยะทาบยังช่วยให้คอนกรีตรับแรงได้มากขึ้น

Lagier, Massicotte and Charron (2015) ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณเส้นใยไฟเบอร์ที่มีผลต่อความแข็งแรงของพันธะคอนกรีตเสริมแรงสมรรถนะสูง (Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC) โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะมีลักษณะเป็นแท่งคอนกรีตสี่เหลี่ยมมีเหล็กเสริมทาบกันอยู่ 2 คู่ทดสอบโดยใช้แรงดึงที่เหล็กเสริมให้เกิดความเค้น (Stress) ในแท่งคอนกรีต กำลังอัดของคอนกรีตเสริมแรงสมรรถนะสูงอยู่ระหว่าง 100-160 เมกะปาสคาล ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบตัวอย่างคือ ขนาดเหล็กเสริม 25 มิลลิเมตรและ 35 มิลลิเมตร ระยะทาบของเหล็กที่ 5, 8, 10, 12 และ 18 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก และปริมาณไฟเบอร์ที่ 0 เปอร์เซ็นต์ 1 เปอร์เซ็นต์ 2 เปอร์เซ็นต์ และ 4 เปอร์เซ็นต์ เส้นใยไฟเบอร์มีค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด 2,600 เมกะปาสคาล ติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียด (Strain Gauge) 2 ตัวอยู่ที่เหล็กเสริม มีเครื่องวัดความเครียดจำนวน 8 ตัวติดบนผิวคอนกรีตวัดจากขอบ 1.25 เท่าของขนาดเหล็กเสริม และมีโพเทนชิโอมิเตอร์ 8 ตำแหน่งถูกติดตั้งไว้บนผิวคอนกรีตเพื่อประเมินพฤติกรรมรอยแตก ผลการศึกษาพบว่า การวิบัติของตัวอย่างแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะคือ 1.คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเกิดขึ้นในตัวอย่างที่มีระยะทาบเหล็กน้อยกว่า 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเนื่องจากพันธะระหว่างคอนกรีตและเหล็ก

เสริมมีค่าน้อย 2.เหล็กเสริมครากและคอนกรีตแตกร้าวก่เกิดขึ้นในตัวอย่างที่มีระยะทาบตั้งแต่ 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางขึ้นไป 3.เหล็กเสริมครากก่อนที่ตัวอย่างจะวิบัติเกิดขึ้นในตัวอย่างที่มีระยะทาบตั้งแต่ 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางขึ้นไป ประสิทธิภาพของเส้นใยไฟเบอร์ในคอนกรีตช่วยยับยั้งรอยแตกร้าวก่ได้ดีในปริมาณเส้นใยไฟเบอร์ที่ 4 เปอร์เซ็นต์ และระยะทาบของเหล็กเสริมจะมีอิทธิพลมากต่อพันธะที่เกิดขึ้น ระยะทาบตั้งแต่ 12 เท่าขึ้นไปของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมทำให้ตัวอย่างเกิดการวิบัติที่เหล็กเสริม

Lagier, Massicotte and Charron (2016) ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณเส้นใยที่มีผลต่อความแข็งแรงของหน้าตัด โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะมีลักษณะเป็นแท่งคอนกรีตสี่เหลี่ยมมีเหล็กเสริมทาบกัันอยู่ 2 คู่ และได้ทำการออกแบบตัวอย่างให้เหล็กเสริมไม่ครากก่อนที่ตัวอย่างจะวิบัติเพื่อให้สามารถรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับความสามารถของ คอนกรีตเสริมแรงสมรรถนะสูง (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC) ที่แตกต่างกันในการควบคุม และกระจายการเปโตรยแตกแยก พารามิเตอร์หลักของการศึกษานี้คือปริมาณไฟเบอร์ของคอนกรีตเสริมแรงสมรรถนะสูง และความยาวของรอยต่อ ตัวอย่างจะถูกทดสอบเมื่อครบ 28 วัน การติดตั้งเครื่องมือวัดจะติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียดไว้ที่ผิวคอนกรีต ติดเครื่องมือวัดรอยแตกของตัวอย่างขณะทดลอง และยังมีกรวัดความเครียด (Strain Gauge) ภายในโดยการติดเครื่องมือวัดไว้ที่เหล็กเสริมแบบไม่รบกวนตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่าการกระจายความเค้นของเหล็กที่เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจะเพิ่มขึ้นกับระยะทาบ ความเค้นของเหล็กจะต่ำลงเมื่อปริมาณไฟเบอร์เพิ่มขึ้น การเชื่อมต่อระหว่างเหล็กและคอนกรีตมีประสิทธิภาพเนื่องจากไม่มีรอยร้าวก่ในแนวขวาง

Arango et.al. (2018) ศึกษาเกี่ยวกับข้อต่อระหว่างคานและเสาประกอบประเมินพฤติกรรมเพื่อสร้างโครงสร้างต้านทานโมเมนต์ที่ก่เกิดจากแรงแผ่นดินไหว การทดสอบจะใช้การหล่อจุดเชื่อมต่อเสาและคานขนาดที่ใช้งานจริง โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะแบ่งเป็น 2 ตัวอย่างคือ การเชื่อมต่อของเสาแบบหล่อในที่ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใช้ทั่วไป และการเชื่อมต่อของเสาแบบสำเร็จรูปโดยจะมีการสวมเสมือนทาบทเหล็กในส่วนที่เชื่อมต่อ การทดสอบทั้งสองเริ่มต้นด้วยการใช้น้ำหนักในแนวแกนกับเสาเพื่อให้ได้รับแรงอัดในแนวแกนเท่ากับ 0.17 เท่าของพื้นที่หน้าตัดรวมของเสาคูกำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต และมีการให้แรงที่ปลายคานทั้งสองด้าน กำลังรับแรงอัดแบบทรงกระบอกของคอนกรีตเท่ากับ 28 เมกะปาสคาล และกำลังครากของเหล็กเสริมที่ใช้เท่ากัน 420 เมกะปาสคาล เครื่องมือที่ใช้ในการวัดใช้เซ็นเซอร์ไฟฟ้า วัดความกว้างของรอยแตก และถ่ายภาพโดยละเอียดบันทึกความเสียหายที่ก่เกิดขึ้นขณะทดสอบเก็บรวบรวมข้อมูลที่ก่เกิดขึ้น ผลการศึกษาพบว่าเสาการเชื่อมต่อเสาสำเร็จรูปมีการแตกร้าวก่ของคอนกรีตแผ่กระจายไปในระยะทางที่สั้นกว่าเสาปกติ ผลการเปรียบเทียบเสาทั้งสองตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าเสาประกอบสำเร็จรูปสามารถใช้งานได้จริง และสามารถนำไปใช้งานได้ง่ายราคาไม่แพง

Jacquesa and Saatcioglu (2019) ศึกษาเกี่ยวกับการเสนอแบบจำลองการวิเคราะห์เพื่อทำนายพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปจากการรับน้ำหนักการดัดงอ และได้ทำการทดลองตัวอย่างเพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง แบบจำลองจะทำการวิเคราะห์พันธะระหว่างการทาบทาเหล็กเสริมกับคอนกรีตและมีการเลื่อนหลุดของเหล็กเสริมจากคอนกรีตเพื่อจะศึกษาหาระยะทาบทาที่เหมาะสม และในส่วนการทดสอบได้ทำการทดสอบการให้แรง 2 แบบคือ การให้แรงแบบคงที่ และแบบกระแทกจำนวน 22 ตัวอย่าง ตัวอย่างจะมี 11 คู่แต่ละคู่จะมีขนาดของตัวอย่างที่แตกต่างกันไป และมีเหล็กเสริมที่ต่างกันไป ลักษณะของตัวอย่างที่ใช้กำหนดในแบบจำลองจะเป็นตัวอย่างที่มีการทาบทาเหล็กในส่วนกลาง และใช้แรงดึงเหล็กเสริมออกจะแสดงลักษณะการเลื่อนหลุด L_s คือ ระยะการทาบทาของเหล็ก S คือ ระยะการเลื่อนหลุดของเหล็กเสริม L'_s คือ ระยะทาบทาของเหล็กหลังจากเลื่อนในการทดลอง ในส่วนที่ 2 ตัวอย่างการทดสอบจะเป็นคานโดยในส่วนกึ่งกลางของคานด้านล่าง และด้านบนจะมีเหล็กเสริมที่ทาบทากันอยู่ การทดสอบโดยจะให้แรงด้านบนคาน 2 จุดโดยแบ่งคานเป็น ช่วงเท่า ๆ กัน ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองนี้สามารถทำนายการตอบสนองการดัดงอของคานที่รับแรงดึงได้อย่างเหมาะสม และแบบทดลองนี้สามารถใช้ได้กับโพลีที่อัตราความเครียดสูงและต่ำ เช่น โพลีเอทิลีน และการทดสอบการตอบสนองของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงภายใต้แรงสถิต และไดนามิกสามารถคาดการณ์ได้อย่างน่าพอใจโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์พันธะบางส่วนที่เสนอ แต่การทดลองยังต้องศึกษาเพิ่มขึ้นในขนาดของคานที่มีหน้าตัดเพิ่มขึ้น

Alharbi et.al. (2021) ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการยึดติดของเหล็กเส้นกับเหล็กคอนกรีตผ่านการดัดงอขึ้นงานทดสอบ เพื่อประเมินอิทธิพลของการแตกร้าวของคอนกรีต จะแสดงถึงแรงดึงที่เกิดขึ้นระหว่างพันธะของคอนกรีต ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะเป็นคานที่รับแรงกดบริเวณกลางคานมีจุดรองรับอยู่ 2 ข้างบริเวณปลายคานทั้งสองด้าน และจะมีแรงดึงเหล็กเสริมด้านล่างบริเวณปลายคาน 1 ด้านอีกด้านหนึ่งจะติดเครื่องมือวัดระยะการเลื่อนตัวของเหล็กเสริม ผลการศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังอัดของคอนกรีตจาก 35 เมกะปาสคาล เป็น 20 เมกะปาสคาล ทำให้ความแข็งแรงพันธะลดลงประมาณ 39 เปอร์เซ็นต์ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมให้อัตราส่วนผกผันกับความแข็งแรงของพันธะคือการที่ขนาดเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นแต่ความแข็งแรงลดลง การเพิ่มความยาวของเหล็กเสริมจาก 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง เป็น 6.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง และ 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ให้ความแข็งแรงของพันธะลดลง 10 เปอร์เซ็นต์ และ 22 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มความหนาของคอนกรีตจาก 30 มิลลิเมตร เป็น 50 มิลลิเมตร และการใช้เหล็กปลอกช่วยให้ความแข็งแรงของพันธะเพิ่มขึ้น 61 เปอร์เซ็นต์ และ 26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Ma et.al. (2021) ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาทางเลือกในการทาบทาต่อเหล็กเสริมในรอยต่อเสาคานเพื่อต้านแรงแผ่นดินไหว จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบคือ การทดสอบรอบแรกเพื่อหาระยะทาบทา และรูปแบบการทาบทาที่ดีที่สุด ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบคือ ระยะทาบทาของเหล็ก

เสริมที่ 4, 6, 8 และ 10 เท่าของขนาดเหล็กเสริมในตัวอย่างที่ใช้เหล็กเสริมแบบตรงปกติ และระยะทาบที่ 5 7 และ 9 เท่าของขนาดเหล็กเสริมใช้ในเหล็กเสริมที่มีเป็นตะขอ ลักษณะเหล็กปลอกคือเหล็กปลอกแบบทั่วไป และเหล็กปลอกแบบขดสปริง, ลักษณะของเหล็กเสริมคือ เหล็กเสริมตรงแบบปกติ และเหล็กเสริมแบบเป็นตะขอ และชนิดของเหล็กเสริมคือ คุณภาพของเหล็กแบบตรง และตะขอจะต่างกัน ลักษณะของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็นทรงสี่เหลี่ยมมีเหล็กเสริมหลักทาบตรงกลางอยู่ 1 คู่ในตัวอย่างที่มีเหล็กปลอกก็จะมีเหล็กปลอกอยู่รอบนอกเหล็กเสริม ผลการวิจัยโหมดการวิบัติของตัวอย่าง วิบัติโดยการแตกของคอนกรีตจะเกิดขึ้นในตัวอย่างที่มีเหล็กเสริมเป็นตะขอ และมีระยะทาบที่น้อย และวิบัติโดยการที่เหล็กเสริมขาดจะเกิดขึ้นในตัวอย่างที่มีระยะการทาบเหล็กที่มากพอ แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของพันธะระหว่างคอนกรีต และเหล็กเสริม และในส่วนของได้มีการทดสอบในส่วนของจุดเชื่อมต่อเสาคานเพื่อทดสอบแรงแผ่นดินไหว มีการสร้างจุดเชื่อมต่อเสาคานขึ้นมา 2 แบบคือ ใช้คอนกรีตชนิดพิเศษผสมเส้นใยไฟเบอร์ในส่วนองคานทั้งสองข้างที่เชื่อมติดกับเสาคาน และใช้คอนกรีตปกติในส่วนองคานที่เชื่อมติดกับเสาคาน ผลการศึกษาพบว่า การใช้คอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยไฟเบอร์ที่มีความเหนียวสูงสามารถปรับปรุงการรับแรงแผ่นดินไหวได้ และสามารถลดรอยกว้างของการแตกได้ ตัวอย่างไม่พบความเสียหายในบริเวณคานด้านบนและด้านล่างใกล้กับเสาคานแสดงว่ามีการยึดติดที่ดี

Qi et.al. (2021) ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการยึดติดของเหล็กเสริมกับคอนกรีตเสริมแรงสมรรถนะสูง (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPC) ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีชิ้นงานทดสอบมีขนาด เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์การทดสอบที่ต้องการ กำหนดความหนาตามพื้นผิวคอนกรีตที่ต้องการ และมีเหล็กฝังอยู่ด้านบนเพื่อทำทดสอบโดยการทดสอบด้วยการดึง ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบการทดสอบคือ ขนาดของเหล็กเสริมที่ 16 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร ระยะในการฝังเหล็กเสริมที่ 2, 4, 6 และ 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก ความลึกของผิวคอนกรีตที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก การฝังท่อในตัวอย่างไว้เพื่อให้ได้ระยะการฝังตามที่ต้องการ ในการทดสอบจะมีเครื่องวัดที่ติดไว้ภายในเพื่อตรวจวัดการครากของเหล็กเสริม และมีเครื่องมือวัดระยะการดึงตัวอย่าง ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างมี 5 ลักษณะ 1.คอนกรีตจะวิบัติบริเวณผิวคอนกรีตที่ติดกับเหล็กเสริมแบบกรวย 2. คอนกรีตจะแตกบริเวณเหล็กเสริมเป็นรูปตัววี 3. การวิบัติแบบแยกออกของคอนกรีตรอยแต่นี้จะยาว และค่อย ๆ กว้างขึ้นจะเกิดขึ้นในตัวอย่างส่วนใหญ่ที่มีความลึกของตัว 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของระยะฝังที่มากกว่า 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.การวิบัติแบบเหล็กเสริมหลุดออกจากตัวอย่างแบบดึงออก 5.วิบัติโดยเหล็กเสริมคราก ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่มีระยะการหุ้มเหล็กเสริมน้อยมีแนวโน้มในการแตกเพิ่มขึ้น และความแข็งแรงของการยึดเกาะจะน้อยเนื่องจากเมื่อระยะที่หุ้มเหล็กไม่เพียงพอพันธะความแข็งแรง

คอนกรีตจะไม่แสดงผลเต็มที่ ระยะในการฝังเหล็กเสริมจะส่งผลต่อการวิบัติของผิวคอนกรีตที่ติดกับเหล็กเสริม

Tsiotsias and Pantazopoulou (2021) ศึกษาเกี่ยวกับการประเมิน และหาปริมาณแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตเสริมแรงไฟเบอร์สมรรถนะสูง (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC) โดยได้ทำการศึกษาเชิงทดลองและการวิเคราะห์ร่วมกันโดยใช้ตัวอย่าง 13 ชิ้น การทดลองนี้โดยแบ่งเป็น 4 ชุดคือ แบ่งด้วยชนิดของคอนกรีตที่มี 4 ลักษณะตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการทดลองคือ ชนิดของคอนกรีตเป็นคอนกรีตที่มีการใช้ในท้องตลาดทั่วไป 2 สูตร และเป็นสูตรที่ผลิตพัฒนาขึ้นมาโดยบริษัทอีก 2 สูตร ชนิดของไฟเบอร์ขนาดของความยาว 12 มิลลิเมตร และ 13 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฟเบอร์ที่ 0.2 มิลลิเมตร และ 0.1 มิลลิเมตร ความหนาของระยะหุ้มเหล็กคือ 16 มิลลิเมตร และ 32 มิลลิเมตร ลักษณะของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีการฝังเหล็กไว้ด้านบนเพื่อทดสอบโดยให้แรงดึง และยึดด้านข้างของตัวอย่างไว้โดยใช้การยึดทั้งสองข้างของเหล็กเสริม เหล็กเสริมที่ใช้ทดสอบมีกำลังรับแรงดึงที่ 400 เมกะปาสคาล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมแรงสมรรถนะสูงประมาณ 120 เมกะปาสคาล ผลการศึกษาพบว่า ในตัวอย่างที่ใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงความเครียดจากการยึดเกาะมีค่าเท่ากับ 8.55–19.23 เมกะปาสคาล และในตัวอย่างที่ใช้คอนกรีตทั่วไปความเครียดจากการยึดเกาะมีค่าเท่ากับ 4.22–6.93 เมกะปาสคาล การเพิ่มความหนาของระยะหุ้มเหล็กในตัวอย่างที่ 16 มิลลิเมตรเป็น 32 มิลลิเมตร ทำให้เกิดความแข็งแรงของพันธะสูงขึ้นประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ การจำลองเชิงตัวเลขนั้นสอดคล้องกับค่าทดลองส่วนใหญ่แต่ความแม่นยำจะแตกต่างกันไปตามความหนาและวัสดุที่ใช้ขึ้นงานทดสอบ รูปแบบขึ้นงานทดสอบและการตั้งค่าการทดสอบที่ใช้ในการทดสอบสามารถนำไปสู่ค่าความแข็งแรงพันธะที่หลากหลายสำหรับคอมโพสิตซีเมนต์เสริมแรงด้วยไฟเบอร์

Ul Islam (2021) ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมแรงดึงที่เกิดขึ้นของ คอนกรีตเสริมแรงไฟเบอร์สมรรถนะสูง (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC) การคืบของแรงดึงในระยะยาว โดยมีความแข็งแรงสูงสุดที่ 1,100 เมกะปาสคาล ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบขึ้นงานทดสอบขนาด 75 × 80 มิลลิเมตร (หน้าตัด) ที่มีความยาว 500 มิลลิเมตร มีการฝังเหล็กไว้ที่ปลายทั้งสองด้านเพื่อตั้งทดสอบ และตรงกลางของขึ้นงานมีลักษณะของรอยบากเพื่อกำหนดจุดที่จะวิบัติของตัวอย่าง กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 120 วันเท่ากับ 134 เมกะปาสคาล ผลการศึกษาพบว่าแรงดึงที่ต่อเนื่องต่างกัน (50 เปอร์เซ็นต์ และ 75 เปอร์เซ็นต์) ของน้ำหนักบรรทุกทุกที่ใช้ทดสอบตัวอย่างแบบไม่เสริมแรงจนแตกเร็ว จากผลการทดลองพบว่ากำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และอัตราการเพิ่มจะลดลงเมื่อครบ 28 วันขึ้นไป การหดตัวของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 25 วันแรก และความเครียดจากการหดตัวจะช้าลงจนมีเพียงเล็กน้อยจนถึง 150 วัน ค่าความต้านทานแรงดึงของตัวอย่าง 75 เปอร์เซ็นต์ น้อยกว่าตัวอย่าง 50 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดจาก

การหดตัวจะส่งผลต่อความเครียดในการรับแรงดึง ดังนั้นการหดตัวมีอิทธิพลในการเสียรูปโดยขึ้นอยู่กับเวลาที่

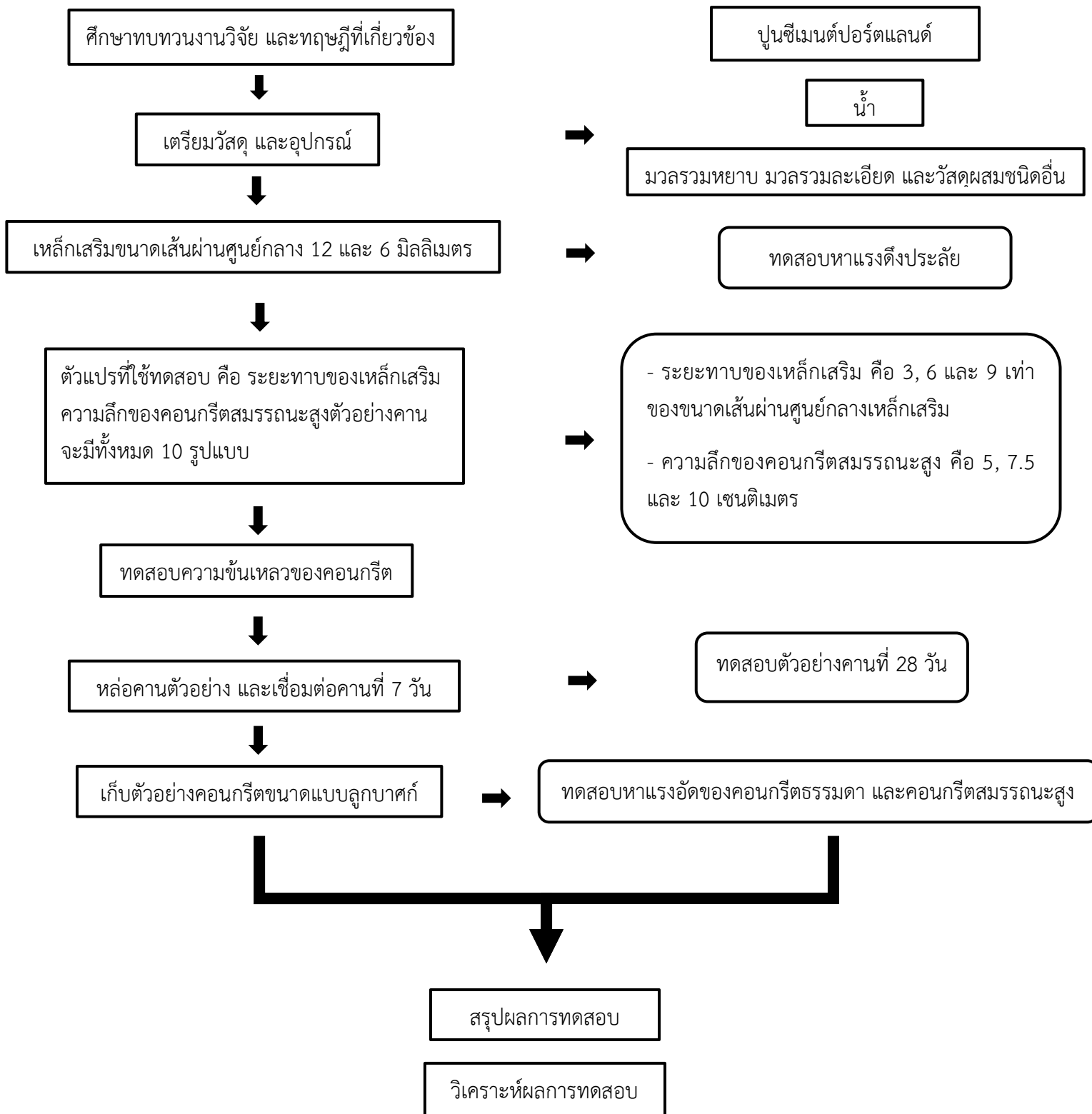
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการทำการทดสอบจำเป็นต้องวางแผนในการดำเนินงานเพื่อให้ขั้นตอนในการดำเนินงานทดสอบนั้นเป็นไปตามแผน และทำให้งานมีคุณภาพสามารถกำหนดกรอบเวลาในการทำงาน การเตรียมวัสดุอุปกรณ์ในการทำงาน และการทดสอบเป็นไปตามรูปแบบที่ถูกต้องเพื่อลดความผิดพลาดของงาน จึงจำเป็นต้องมีการวางแผนสำหรับการดำเนินงานวิจัยนี้

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนแรกจะเป็นการศึกษาหาข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวข้องเพื่อนำมาออกแบบตัวอย่างที่ทดสอบ และทำการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเพื่อเรียนรู้พฤติกรรมของตัวอย่างที่ทดสอบ และนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ขั้นตอนที่สองคือ การเตรียมวัสดุอุปกรณ์ และการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ การเตรียมวัสดุอุปกรณ์เพื่อความพร้อมสำหรับการทดสอบ ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้งานได้มาตรฐาน ขั้นตอนสามเป็นการหล่อตัวอย่าง และเตรียมชิ้นส่วนตัวอย่างเพื่อนำไปทดสอบ ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการทดสอบตัวอย่างทั้งคาน และตัวอย่างลูกบาศก์ แล้วนำข้อมูลผลการทดสอบมาสรุปผลการวิจัยสามารถแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 ลักษณะทั่วไปของคาน

ผู้วิจัยได้ทบทวนงานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ทั้งวิธีการทาบเหล็ก มาตรฐานการทาบเหล็ก คุณสมบัติคอนกรีตสมรรถนะสูง การใช้คอนกรีตสมรรถนะสูง การทดสอบคานโดยการดัดแบบ 4 จุด (four-point bending test) ซึ่งทำให้สามารถออกแบบตัวอย่างคานที่เหมาะสมกับงานวิจัยในครั้งนี้ได้ โดยได้กล่าวถึงในขอบเขตของงานวิจัยในบทที่ 1 และได้ทำการออกแบบคานจากขอบเขตของงานวิจัยที่ได้กำหนดมาโดยใช้วิธีการออกแบบรับแรงดัดของคานโดยวิธีกำลัง (Ultimate strength design ,USD) สามารถรับน้ำหนักสูงสุดได้ 120 กิโลนิวตัน แสดงรายละเอียดตัวอย่างคานที่ได้ออกแบบใน ตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 แสดงสัญลักษณ์ของตัวอย่างคาน

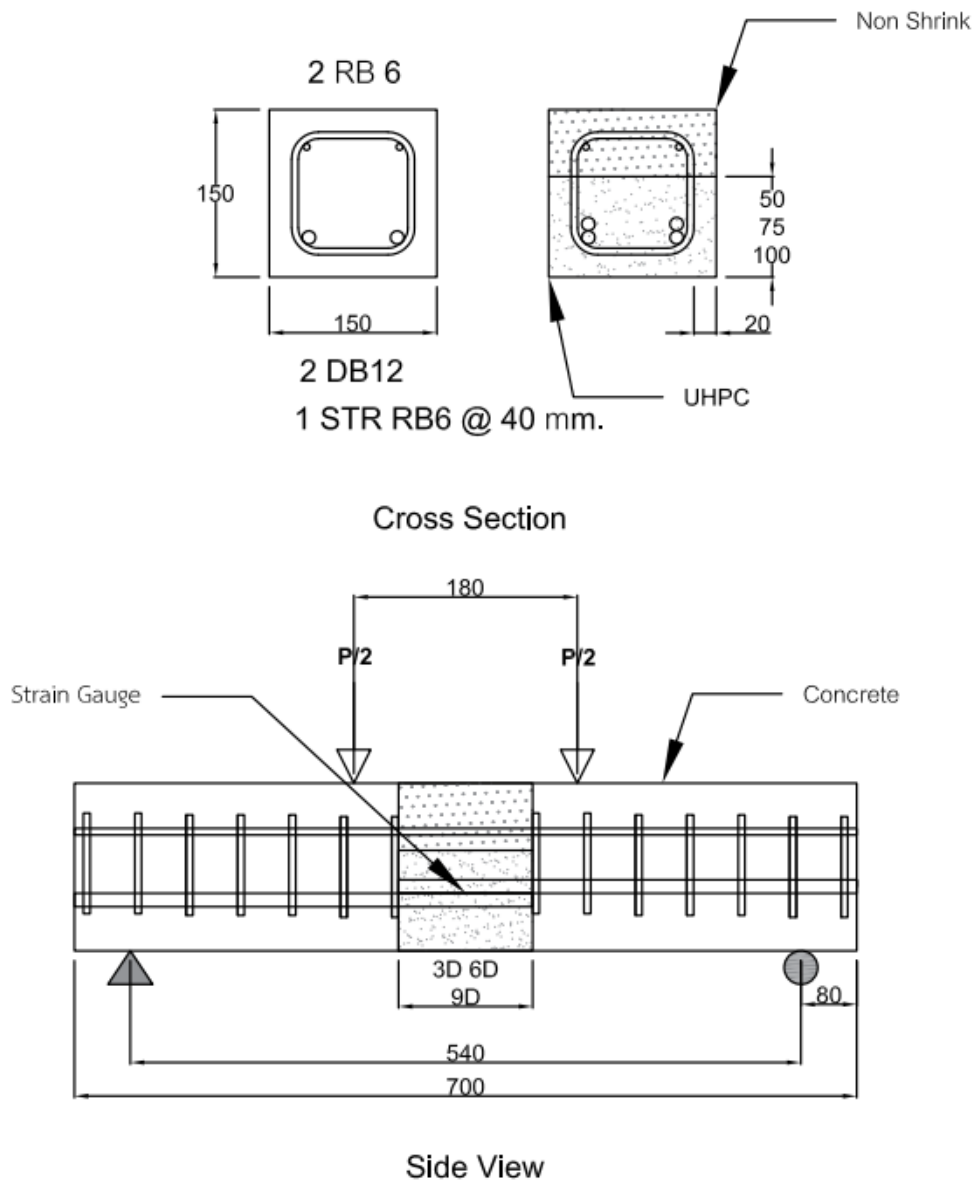
ตัวอย่าง	สัญลักษณ์ ตัวอย่าง	ความกว้าง (B) (มิลลิเมตร)	ความหนา (H) (มิลลิเมตร)	ความยาว (L) (มิลลิเมตร)	ความลึกของ คอนกรีต สมรรถนะสูง (มิลลิเมตร)	ระยะทาบ ของเหล็ก เสริม (มิลลิเมตร)
1	B-0D-00	150	150	700	0	0
2	B-3D-50	150	150	700	50	36
3	B-3D-75	150	150	700	75	36
4	B-3D-100	150	150	700	100	36
5	B-6D-50	150	150	700	50	72
6	B-6D-75	150	150	700	75	72
7	B-6D-100	150	150	700	100	72
8	B-9D-50	150	150	700	50	108
9	B-9D-75	150	150	700	75	108
10	B-9D-100	150	150	700	100	108

การวิจัยนี้ใช้เหล็กข้ออ้อยคุณภาพ SD40T ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร สำหรับเป็นเหล็กเสริมหลักที่ด้านล่างของคาน และเหล็กกลมผิวเรียบคุณภาพ SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร สำหรับเป็นเหล็กเสริมด้านบน และเหล็กเสริมรับแรงเฉือน สัญลักษณ์ของ

ตัวอย่างเช่น B-3D-50 บอกลักษณะว่าเป็นคาน เช่น B คือ คาน 3D คือ ระยะทาของเหล็กเสริม 50 คือความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง

3.3 รายละเอียดคานตัวอย่าง

ตัวอย่างคานทั้งหมดมี 10 แบบ ดังตารางที่ 3.1 แต่ละแบบจะมี 3 ตัวอย่างทำให้ตัวอย่างทั้งหมดมี 30 ตัวอย่าง ตัวอย่างคานที่ไม่มีรอยเชื่อมต่อได้ออกแบบทดสอบแบบการดัด 4 จุด (four-point bending test) จะสามารถรับแรงได้ 120 กิโลนิวตัน คานที่ใช้ทดสอบมีขนาด 150 มิลลิเมตร x 150 มิลลิเมตร x 700 มิลลิเมตร ด้านล่างจะเสริมเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตรจำนวน 2 เส้น ด้านบนจะเสริมเหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรจำนวน 2 เส้น เหล็กกลมผิวเรียบรับแรงเฉือนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรทุก 40 มิลลิเมตร และติดตัววัดความเครียดที่เหล็กเสริม (strain gauge) บริเวณกลางคาน 2 ตัว และในคานที่มีการเชื่อมต่อจะมีช่วงตรงกลางคานที่มีความกว้างของระยะการเชื่อมไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับระยะทาของเหล็กเสริม แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รายละเอียดของตัวอย่างคาน

3.4 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

3.4.1 วัสดุผสมคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้หล่อคานได้ทำการออกแบบให้มีกำลังรับแรงอัดที่ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีส่วนผสม และสัดส่วนดังนี้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.36 มวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด แสดงในตารางที่ 3.2 ปูนอนชริงค์ที่ใช้มีกำลังรับแรงอัดที่ 600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และในการผสมคอนกรีตได้ทำการหาคุณสมบัติของมวลรวม แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตของคานต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

วัสดุ	น้ำหนักต่อลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)
ปูนซีเมนต์	417
น้ำ	151
มวลรวมหยาบ	1,028
มวลรวมละเอียด	773

ตารางที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด

คุณสมบัติ	หน่วย	มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ
ความถ่วงจำเพาะที่สถานะอิ่มตัวผิวแห้ง	-	2.65	2.7
หน่วยน้ำหนัก	กิโลกรัม/เมตร ³	-	1,600
% การดูดซึม	%	0.7	1.0
ความชื้น	%	6.0	2.0
โมดูลัสความละเอียด	%	2.7	-

3.4.2 เหล็กเสริมในคอนกรีต

เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นวัสดุที่สำคัญเนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่เปราะ การเอาเหล็กเสริมมาช่วยจะทำให้คอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีความเหนียว และมีประสิทธิภาพในการรับแรงมากยิ่งขึ้นซึ่งเหล็กที่ผลิตมาจากโรงงานต่าง ๆ อาจมีคุณภาพที่แตกต่างกันจึงต้องตรวจสอบคุณภาพของเหล็กที่ใช้ให้เป็นไปตามมาตรฐาน มยผ 1103-52, มอก.20 และ มอก.24 ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงคุณสมบัติของเหล็กเสริม

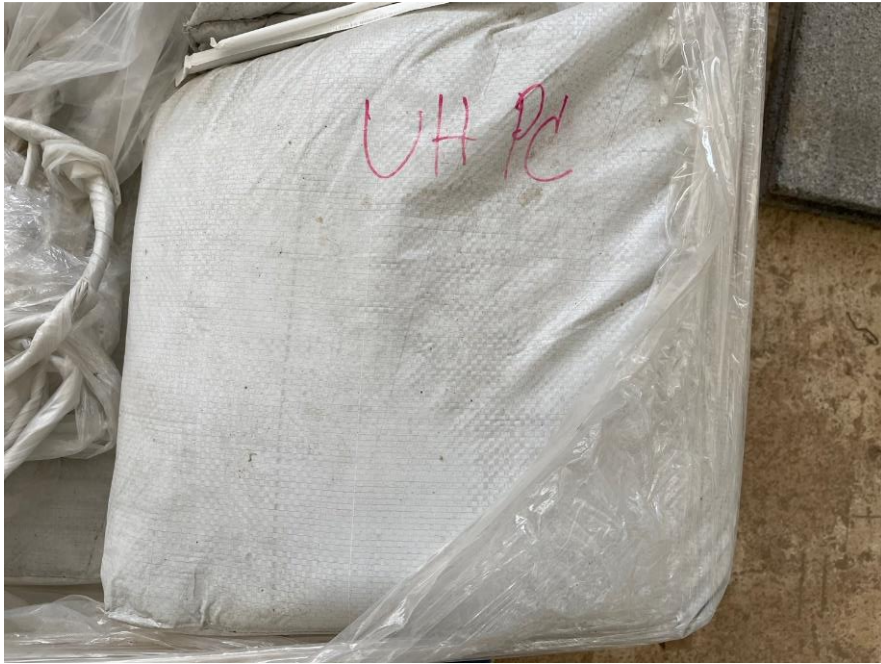
เหล็ก	กำลังคราก (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	กำลังประลัย (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
RB6	4,009	6,046
DB12	5,220	6,159

3.4.3 คอนกรีตสมรรถนะสูง

คอนกรีตสมรรถนะสูงผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนจาก บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด เนื่องจากคอนกรีตสมรรถนะสูงยังมีการใช้งานที่ยังไม่แพร่หลายมากนัก กำลังรับแรงของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ใช้อยู่ที่ 1,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง แสดงในตารางที่ 3.5 ลักษณะตัวอย่างส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงแสดงในรูปที่ 3.3 รูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สดงรายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

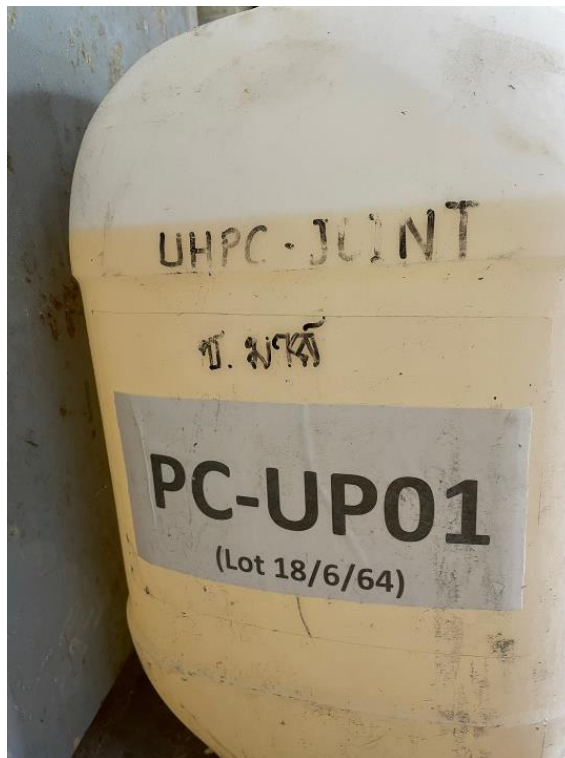
วัสดุ	น้ำหนักต่อลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)
ปูนซีเมนต์ผสมสารผสมเพิ่ม	2,150
น้ำ	237
เส้นใยเหล็ก (Fiber)	86
สารลดน้ำ (PCE)	27



รูปที่ 3.3 ปูนที่ใช้ผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง



รูปที่ 3.4 เส้นใยเหล็ก (Steel Fiber)



รูปที่ 3.5 สารลดน้ำ

3.5 การหล่อคานตัวอย่างและเชื่อมต่อคาน

3.5.1 การหล่อคานตัวอย่าง

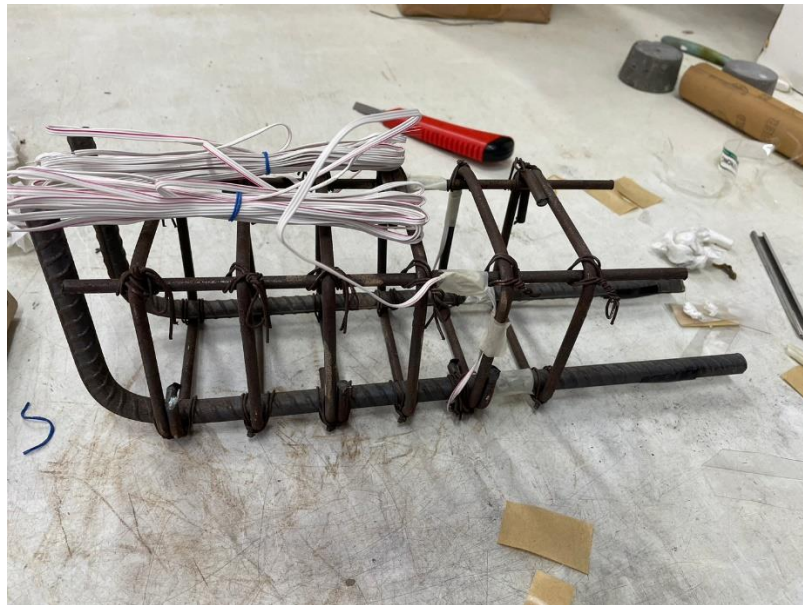
ในการหล่อคานตัวอย่างแบบหล่อคานมีทั้งหมด 4 แบบ จึงสามารถหล่อคานได้ครั้งละ 3 คานคือ สามารถหล่อคานได้ครั้งละ 1 แบบเพื่อให้แต่ละแบบมีกำลังของคอนกรีตที่เท่ากัน ขั้นตอนของการหล่อคานจึงมีดังนี้

- 1) ทำการเตรียมเหล็กเสริมโดยการผูกเหล็กตามขนาดคานแต่ละแบบ แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การผูกเหล็กเสริม

- 2) ติดตัววัดความเครียด (strain gauge) บริเวณกลางคาน 2 ตัว แสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การติดตั้งตัววัดความเครียด (strain gauge)

- 3) เตรียมแบบหล่อคอนกรีตโดยการประกอบแบบ และทาน้ำมัน แสดงในรูปที่ 3.8
 4) นำเหล็กที่ผูกเสริมใส่ในแบบ และจัดระยะหุ้มของคอนกรีต (covering) ให้พอดี



รูปที่ 3.8 การใส่เหล็กเสริมลงในแบบ

- 5) ในตัวอย่างที่มีการเชื่อมต่อกันช่วงกลางคานนำแผ่นโฟมมากันไว้เพื่อเว้นช่องว่างสำหรับเชื่อมต่อกาน แสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การใส่คานที่มีจุดเชื่อมต่อลงในแบบ

6) ผสมคอนกรีตตามสัดส่วนปริมาณที่เตรียมไว้ แสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การผสมคอนกรีต

7) การทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต (SLUMP TEST) แสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต

- 8) นำคอนกรีตไปใส่แบบที่เตรียมไว้ และทำการกระทุ้ง เคาะ เพื่อให้คอนกรีตไหลไปทั่วทั้งแบบป้องกันไม่ให้เกิดช่องว่างโพรงอากาศในคาน แสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การนำคอนกรีตใส่ลงในแบบหล่อ

- 9) เก็บตัวอย่างคอนกรีตขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง ทุกครั้งที่ทำการหล่อคานเพื่อนำไปทดสอบหาค่ารับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน

3.5.2 การเชื่อมต่อคานด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูง

เมื่อทำการหล่อคานเสร็จแล้วทิ้งไว้ 7 วันเพื่อให้กำลังการรับแรงของคานเพิ่มขึ้นให้เสมือนการหล่อคานสำเร็จรูปในโรงงานก่อนนำมาเชื่อมต่อ ขั้นตอนการเชื่อมต่อมีดังนี้

- 1) เมื่อคานคอนกรีตมีอายุครบ 7 วัน ทำการนำแผ่นโฟมที่กึ่งกลางออก และทำความสะอาดให้เรียบร้อย
- 2) เข้าแบบด้านข้าง และด้านล่างของจุดกึ่งกลางคานเพื่อเตรียมทำการเชื่อมต่อ แสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การประกอบแบบหล่อเพื่อเชื่อมต่อคาน

- 3) ทาน้ำยาเชื่อมประสานคอนกรีตที่ผิวด้านในคอนกรีตธรรมดาที่จะทำการเชื่อมต่อ แสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การทาน้ำยาเชื่อมประสานคอนกรีต

- 4) ผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงตามส่วนผสมที่กำหนดไว้
- 5) ทดสอบการไหลของคอนกรีตสมรรถนะสูง แสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การทดสอบการไหลของคอนกรีตสมรรถนะสูง (UHPC)

- 6) นำคอนกรีตสมรรถนะสูงใส่ในแบบที่จุดเชื่อมต่อกันตามความลึกที่กำหนดไว้
- 7) เก็บตัวอย่างคอนกรีตสมรรถนะสูงขนาด $10 \times 10 \times 10$ เซนติเมตร 3 ตัวอย่าง นำไปทดสอบที่ 3, 7, 14 และ 28 วัน แสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การเก็บตัวอย่างคอนกรีตสมรรถนะสูง

- 8) เมื่อคอนกรีตสมรรถนะสูงแข็งตัวทาน้ำยาเชื่อมประสานคอนกรีต และนำปูนนอนซริงมาเชื่อมในจุดที่เป็นช่องว่างที่เหลืออยู่ของคาน แสดงในรูปที่ 3.17

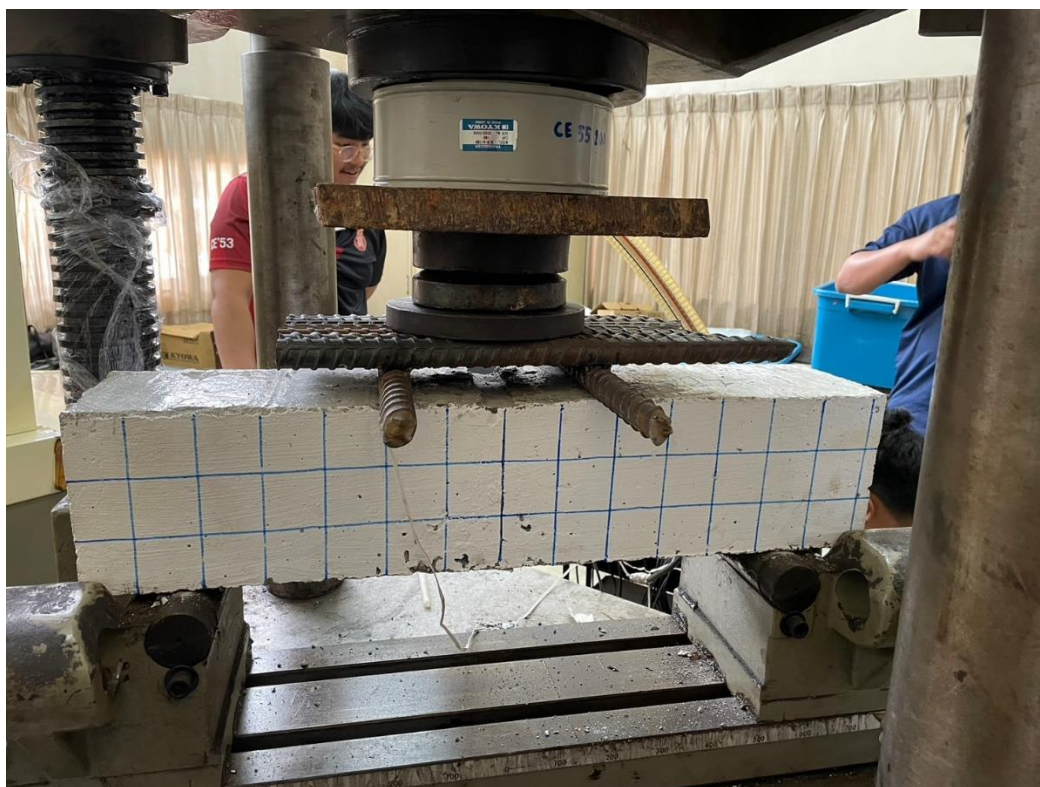


รูปที่ 3.17 การเทคอนกรีตสมรรถนะสูง และปูนนอนซริงเพื่อเชื่อมต่อคาน

3.6 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบคาน

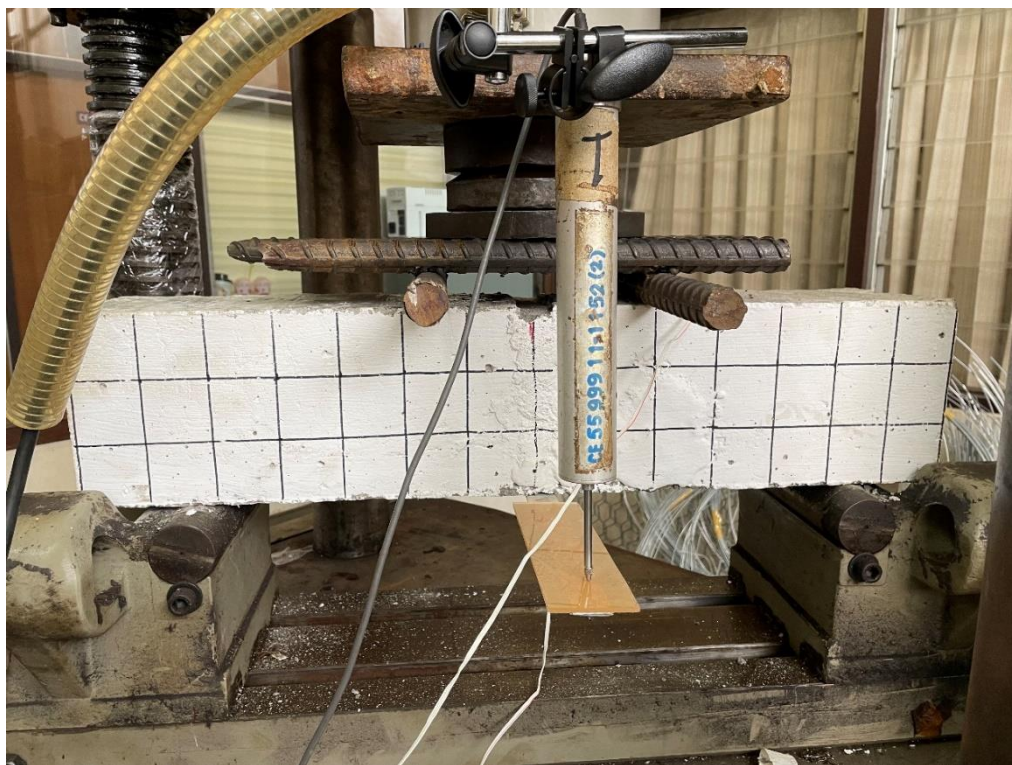
ก่อนการทดสอบคานจะต้องทำการทาสีคานด้วยสีขาว และตีตารางสีเหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5×5 เซนติเมตร เพื่อให้สามารถมองรอยแตกของคานในตอนทดสอบได้อย่างชัดเจน ทดสอบโดยการดัดแบบ 4 จุด (four-point bending test) ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์มีดังนี้

- 1) นำคานขึ้นบนแท่นทดสอบเตรียมระยะกคระหว่างจุดรองรับให้ได้ 54 เซนติเมตร และระยะตัวกระจายแรงด้านบนโดยแบ่งคานเป็น 3 ช่วง ช่วงละ 18 เซนติเมตร
- 2) นำตัวรองรับเพื่อกระจายแรงวางบนคาน และแผ่นเหล็กด้านบนเป็นตัวกระจายแรง ให้ได้ระยะตามที่กำหนดไว้ วางเครื่องวัดแรง (Load cell) ไว้ด้านบนสุด แสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การนำจุดรองรับการกระจายแรง และติดตั้งเครื่องวัดแรง (Load cell)

- 3) ติดตัววัดระยะการโก่ง (LVDT) ที่กึ่งกลางของคานเพื่อวัดระยะการโก่งตัวขณะทดสอบ แสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การติดตั้งการโก่งตัว (LVDT) บริเวณกึ่งกลางคาน

- 4) เตรียมเครื่องบันทึกค่าข้อมูล (Universal Recorder EDX-100) โดยต่อเครื่องวัดแรง (Load cell) ตัววัดการโก่งตัว (LVDT) และ ตัววัดความเครียดเหล็กเสริม (strain gauge) เพื่อเก็บบันทึกค่า แสดงในรูปที่ 3.20



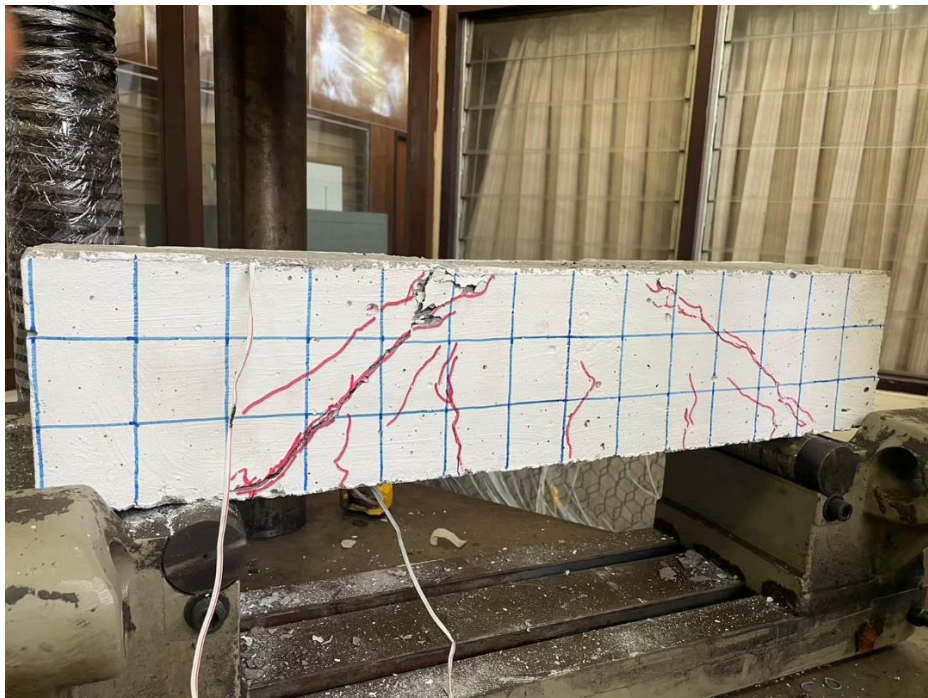
รูปที่ 3.20 การติดตั้ง และตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์ก่อนทดสอบ

- 5) เตรียมกล่องบันทึก VDO เพื่อดูการเริ่มต้นของรอยแตกของคาน
- 6) ให้แรงโดยไฮดรอลิกโหลด สม่่าเสมอจนคานวิบัติ
- 7) เมื่อคานเริ่มมีรอยร้าว นำปากกาสีแดงมาวาดตามรอยเพื่อให้สามารถมองเห็นรอยร้าวชัดเจนยิ่งขึ้น แสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ตัวอย่างคานเมื่อทำการทดสอบ และเกิดการวิบัติ

- 8) เมื่อตัวอย่างคานวิบัติถ่ายรูปทั้งสองด้านของตัวอย่างคานเพื่อเก็บข้อมูล แสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 เก็บข้อมูลรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง

บทที่ 4

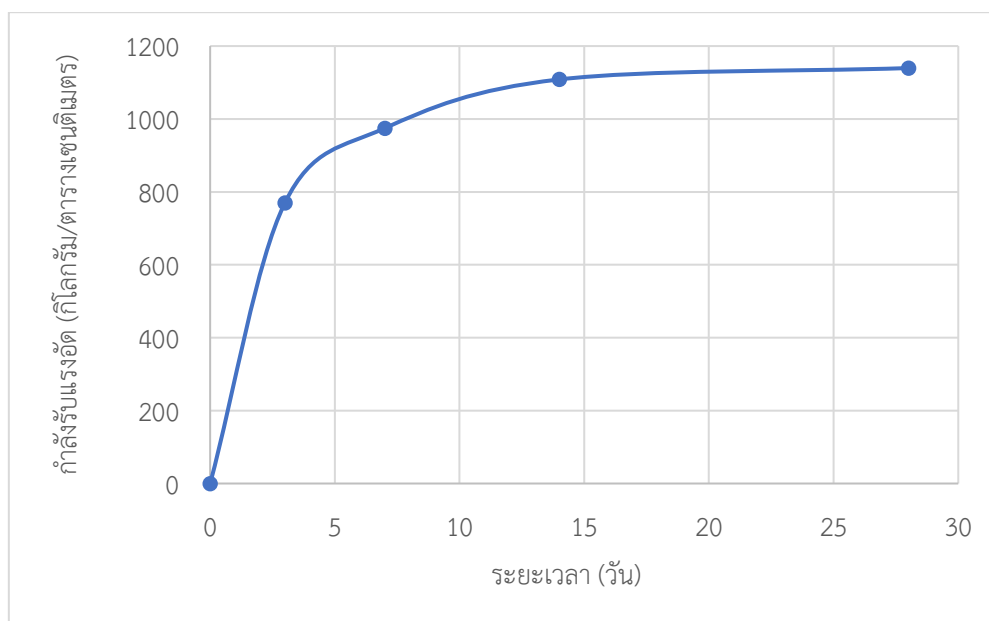
ผลการทดสอบคาน

4.1 ผลการทดสอบกำลังการรับแรงอัดของคอนกรีตและคอนกรีตสมรรถนะสูง

การเก็บตัวอย่างของคอนกรีต และคอนกรีตสมรรถนะสูง ที่ทำการหล่อทุกครั้งเพื่อนำมาทดสอบหากำลังต้านทานแรงอัด จะเป็นตัวที่บ่งบอกถึงกำลังการรับแรงของตัวอย่างคาน แสดงในตารางที่ 4.1 กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตจากตัวอย่างทั้งหมดเฉลี่ยแล้วมีกำลังรับแรงอยู่ที่ 387 ± 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสูงกว่ากำลังการรับแรงที่ออกแบบไว้ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเก็บตัวอย่างของคอนกรีตสมรรถนะสูงเพื่อดูการพัฒนากำลังของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ 3, 7, 14 และ 28 วัน แสดงในรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงกำลังการต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเฉลี่ย

ตัวอย่าง	สัญลักษณ์	กำลังต้านทานแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
1	B-0D-00	371	361	389	374
2	B-3D-50	410	384	384	392
3	B-3D-75	383	386	382	384
4	B-3D-100	391	381	383	385
5	B-6D-50	363	376	366	368
6	B-6D-75	418	397	410	408
7	B-6D-100	436	375	382	398
8	B-9D-50	406	417	429	417
9	B-9D-75	346	374	366	362
10	B-9D-100	405	367	381	384
เฉลี่ย					387



รูปที่ 4.1 แสดงการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโก่งตัวและแรงกับความเครียดของเหล็กเสริมในคาน

การรับน้ำหนักสูงสุดของแต่ละคานโดยคานที่ไม่มีการเชื่อมต่อรับแรงได้ 148.11 กิโลนิวตัน ซึ่งออกแบบไว้ให้สามารถรับแรงได้ 120 กิโลนิวตัน แสดงว่ากำลังการรับแรงของคอนกรีตเมื่อนำมาออกแบบแล้วมีความแข็งแรงมากกว่าที่ออกแบบไว้สามารถใช้ได้จริง ความเครียดในเหล็กเสริมของคานที่ไม่มีการเชื่อมต่อนี้ 2651.24 ไมโครเมตรต่อเมตร แสดงให้เห็นว่าคานตัวอย่างนี้มีการทำงานของเหล็กเสริมจนพ้นจุดครากของเหล็กเสริมไปแล้ว ระยะการโก่งตัวของคานเท่ากับ 1.158 มิลลิเมตร ระยะการโก่งน้อยเนื่องจากคอนกรีตมีกำลังรับแรงที่สูงจึงมีความเปราะมาก และในคานที่มีการเชื่อมต่อจะแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าคานที่มีระยะทาบเพิ่มขึ้น และความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงเพิ่มขึ้นจะมีกำลังการรับแรงที่เพิ่มขึ้น แต่ความเครียดในเหล็กเสริมจะไม่คงที่เนื่องจากกำลังการรับแรงประลัยของคานที่เชื่อมต่อนั้นน้อยมากทำให้ความเครียดในเหล็กเสริมน้อย และไม่คงที่เพราะเหล็กเสริมยังมีการทำงานที่ไม่เต็มกำลัง ในส่วนของการโก่งตัวจะเพิ่มขึ้นตามระยะทาบที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมแสดงให้เห็นใน ตารางที่ 4.2

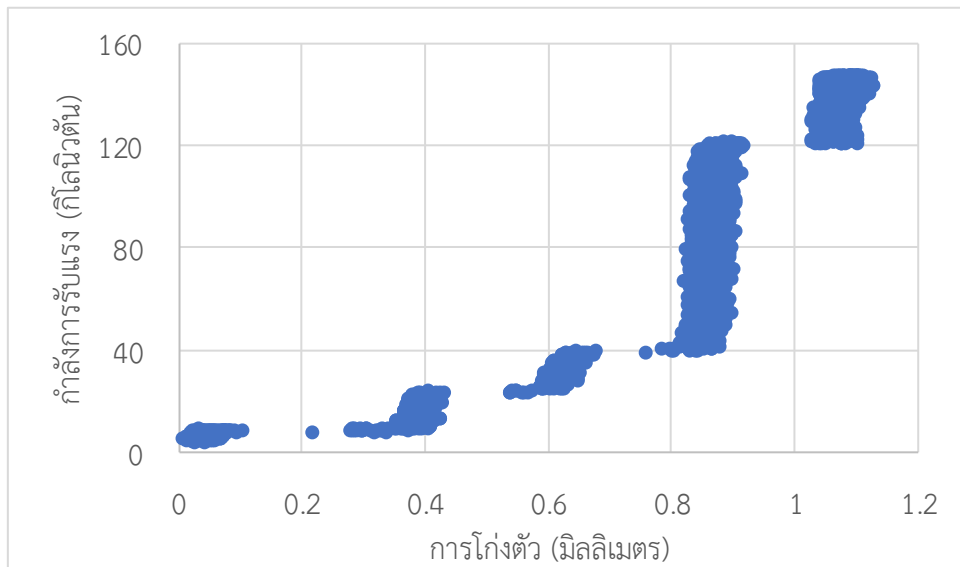
ตารางที่ 4.2 แสดงน้ำหนักประลัยเฉลี่ย ความเครียดในเหล็กเสริม และการโก่งตัวของตัวอย่างคาน

ตัวอย่าง	สัญลักษณ์ ตัวอย่าง	น้ำหนักประลัย (กิโลนิวตัน)	น้ำหนักประลัย เฉลี่ย (กิโลนิวตัน)	ความเครียดเหล็กเสริม (ไมโครเมตรต่อเมตร)	ความเครียดเหล็กเสริม เฉลี่ย (ไมโครเมตรต่อเมตร)	การโก่งตัว (มิลลิเมตร)	การโก่งตัวเฉลี่ย (มิลลิเมตร)
1	B-0D-00-1	147.92	148.11	2,639	2,651	1.100	1.158
	B-0D-00-2	146.02		2,615		1.216	
	B-0D-00-3	150.38		2,700		-	
2	B-3D-50-1	16.55	15.43	100	103	0.431	0.469
	B-3D-50-2	14.87		55*		0.506	
	B-3D-50-3	14.86		106		1.100*	
3	B-3D-75-1	28.29	25.75	460	432	0.697	0.675
	B-3D-75-2	22.81		405		0.781	
	B-3D-75-3	26.16		264*		0.547	
4	B-3D-100-1	27.39	26.80	1,001	776	0.859	0.648
	B-3D-100-2	26.05		627		0.734	
	B-3D-100-3	26.95		701		0.350	
5	B-6D-50-1	33.77	40.55	702*	1,692	0.525	0.681
	B-6D-50-2	45.62		1,475		0.838	
	B-6D-50-3	42.26		1,909		4.059*	
6	B-6D-75-1	44.28	57.62	1,176	1,011	1.322	1.264

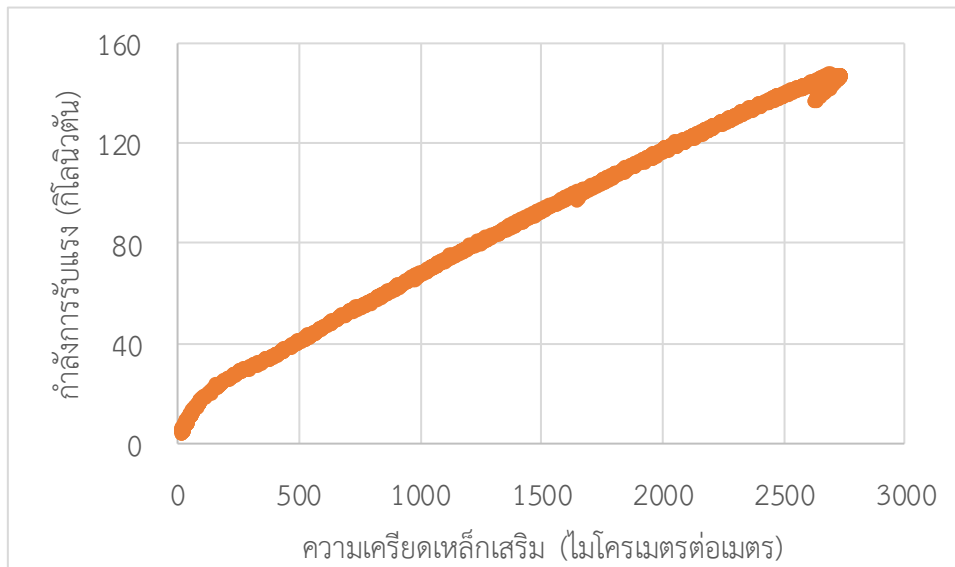
ตัวอย่าง	สัญลักษณ์ ตัวอย่าง	น้ำหนักประลัย (กิโลนิวตัน)	น้ำหนักประลัย เฉลี่ย (กิโลนิวตัน)	ความเครียดเหล็กเสริม (ไมโครเมตรต่อเมตร)	ความเครียดเหล็กเสริม เฉลี่ย (ไมโครเมตรต่อเมตร)	การโก่งตัว (มิลลิเมตร)	การโก่งตัวเฉลี่ย (มิลลิเมตร)
	B-6D-75-2	66.52		1,074		0.653	
	B-6D-75-3	62.05		784		1.816	
7	B-6D-100-1	61.05	65.29	1,911	1,986	1.159	1.128
	B-6D-100-2	82.96		2,060		1.284	
	B-6D-100-3	51.88		1,108*		0.941	
8	B-9D-50-1	47.07	55.68	558	716	0.859	1.102
	B-9D-50-2	59.03		792		1.344	
	B-9D-50-3	60.93		800		0.322*	
9	B-9D-75-1	67.42	71.18	969	964	0.847	1.245
	B-9D-75-2	73.01		1,038		0.300*	
	B-9D-75-3	73.12		884		1.644	
10	B-9D-100-1	83.85	85.05	845	931	0.325*	1.477
	B-9D-100-2	94.92		1,018		1.806	
	B-9D-100-3	76.36		364*		1.147	

หมายเหตุ * หมายถึง ไม่นำข้อมูลมาเฉลี่ย และ - หมายถึง ข้อมูลผิดพลาด

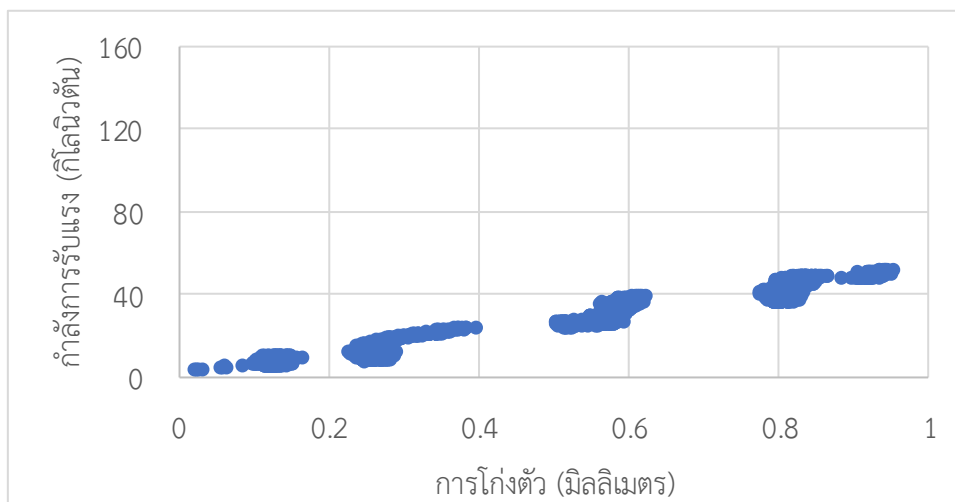
ในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 จะแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของคานที่ไม่มี การเชื่อมต่อเมื่อมีการให้แรงจนไปถึงจุดที่ใกล้การครากของเหล็กเสริมตัวอย่างคานจะมีค่าการโก่งตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ขึ้นเนื่องจากเหล็กเสริมยังไม่คราก จุดครากของเหล็กเสริมจะมีค่าความเครียดประมาณ 2,300 ไมโครเมตรต่อเมตร หลังจากผ่านจุดครากไปแล้วการโก่งตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และตัวอย่างคานก็วิบัติตามมา ในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 จะแสดงให้เห็นตัวอย่างคานที่มีการเชื่อมต่อ การโก่งตัวเมื่อเทียบกับแรงจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเป็นเส้นตรงจนคานวิบัติเนื่องจากความเครียดของเหล็กเสริมนั้นมีค่าน้อยยังไม่ถึงจุดครากของเหล็กเสริม ตัวอย่างผลการทดสอบทั้งหมด 30 ตัวอย่าง แสดงในภาคผนวก จ



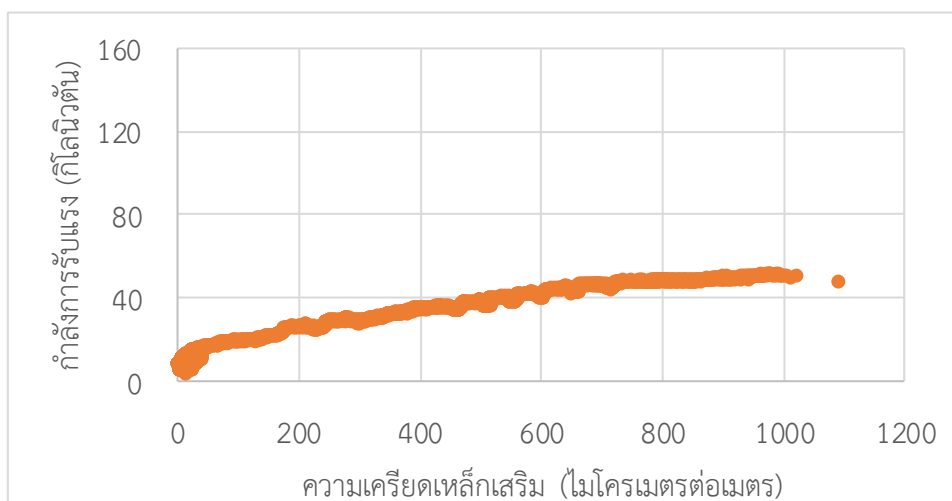
รูปที่ 4. 2 แสดงตัวอย่างกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-0D-00-1



รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างกำลังการรับแรง และความเครียดในเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-0D-00-1



รูปที่ 4.4 แสดงกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-6D-100-3



รูปที่ 4.5 แสดงกำลังการรับแรง และความเครียดในเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-6D-100-3

4.3 กำลังรับแรงต่อระยะทาบของเหล็กเสริมและความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง

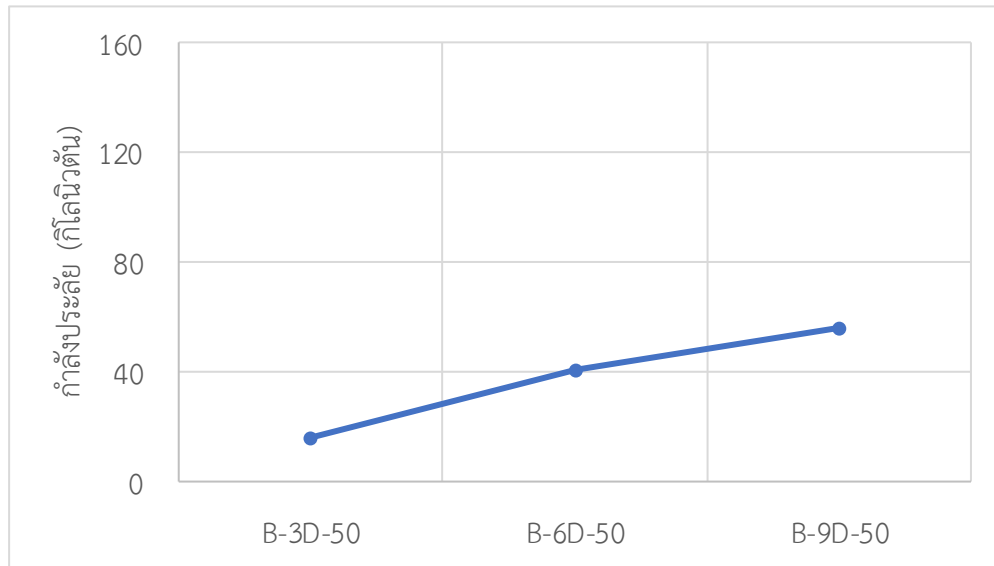
4.3.1 กำลังรับแรงต่อระยะทาบของเหล็กเสริม

ในรูปที่ 4.6 ความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง 50 มิลลิเมตร เมื่อทำการเพิ่มระยะทาบจะแสดงให้เห็นว่ากำลังการรับแรงประลัยของคานแปรผันตามระยะทาบคือ ระยะทาบเพิ่มขึ้น กำลังการรับแรงประลัยของคานก็เพิ่มขึ้นด้วย และการเพิ่มขึ้นของระยะทาบจาก 3 เท่าเป็น 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางกำลังการรับแรงประลัยของคานเพิ่มขึ้น 162.8 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มระยะทาบจาก 6 เท่าเป็น 9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางกำลังการรับแรงประลัยของคานเพิ่มขึ้น 37.3 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มของระยะทาบของเหล็กเสริมในช่วงแรงจะสามารถเพิ่มการรับแรงของคานได้มากกว่าการเพิ่มระยะทาบของเหล็กเสริมในช่วงหลัง

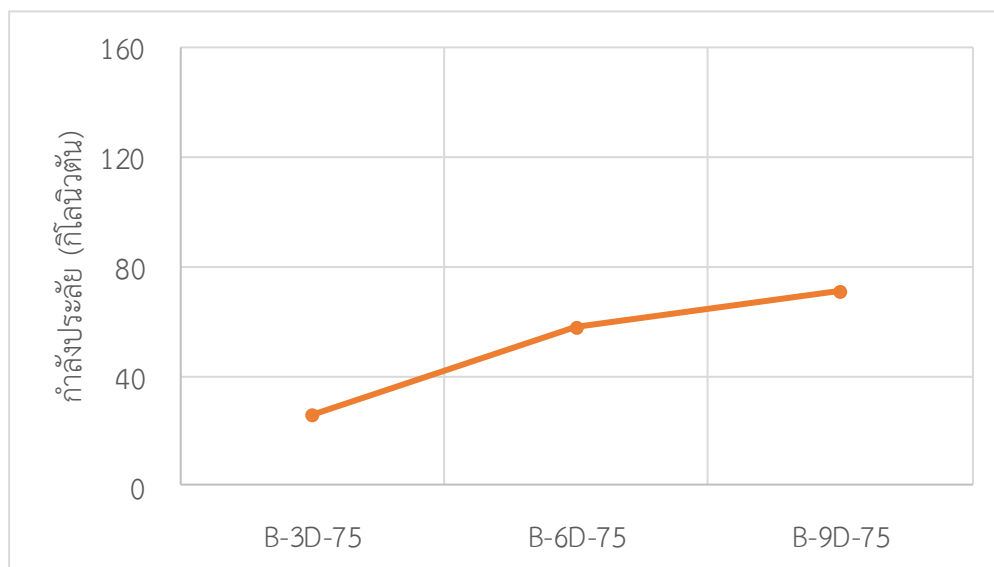
ในรูปที่ 4.7 ความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง 75 มิลลิเมตร เมื่อทำการเพิ่มระยะทาบจะแสดงให้เห็นว่ากำลังการรับแรงประลัยของคานแปรผันตามระยะทาบคือ ระยะทาบเพิ่มขึ้น กำลังการรับแรงประลัยของคานก็เพิ่มขึ้นด้วย และการเพิ่มขึ้นของระยะทาบจาก 3 เท่าเป็น 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางกำลังการรับแรงประลัยของคานเพิ่มขึ้น 123.7 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มระยะทาบจาก 6 เท่าเป็น 9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางกำลังการรับแรงประลัยของคานเพิ่มขึ้น 23.5 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มของระยะทาบของเหล็กเสริมในช่วงแรงจะสามารถเพิ่มการรับแรงของคานได้มากกว่าการเพิ่มระยะทาบของเหล็กเสริมในช่วงหลัง

ในรูปที่ 4.8 ความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง 100 มิลลิเมตร เมื่อทำการเพิ่มระยะทาบจะแสดงให้เห็นว่ากำลังการรับแรงประลัยของคานแปรผันตามระยะทาบคือ ระยะทาบเพิ่มขึ้น กำลังการรับแรงประลัยของคานก็เพิ่มขึ้นด้วย และการเพิ่มขึ้นของระยะทาบจาก 3 เท่าเป็น 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางกำลังการรับแรงประลัยของคานเพิ่มขึ้น 143.6 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มระยะ

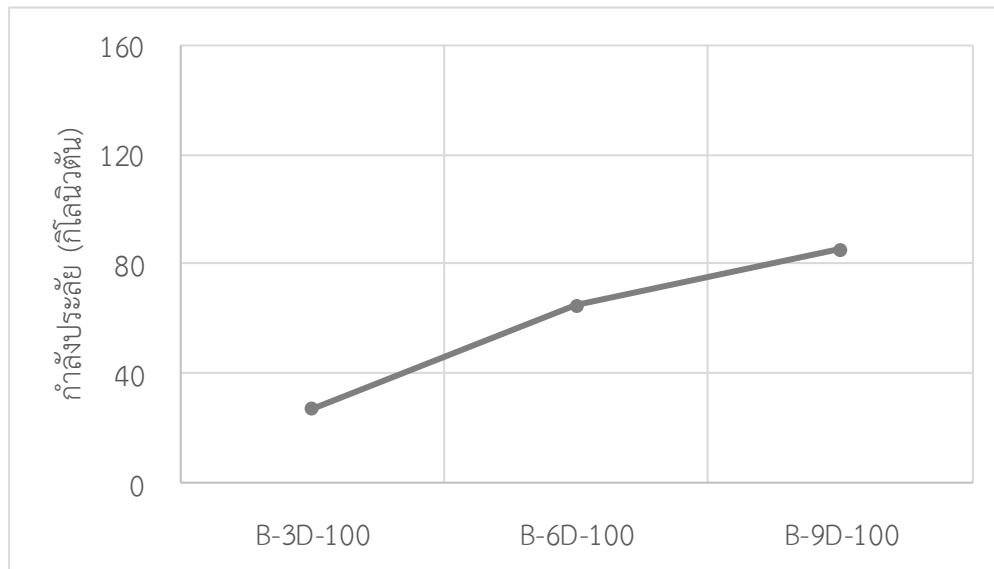
ทาบจาก 6 เท่าเป็น 9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางกำลังรับแรงประลัยของคานเพิ่มขึ้น 30.2 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มของระยะทาบของเหล็กเสริมในช่วงแรงจะสามารถเพิ่มการรับแรงของคานได้มากกว่าการเพิ่มระยะทาบของเหล็กเสริมในช่วงหลัง



รูปที่ 4.6 แสดงความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ 50 มิลลิเมตร

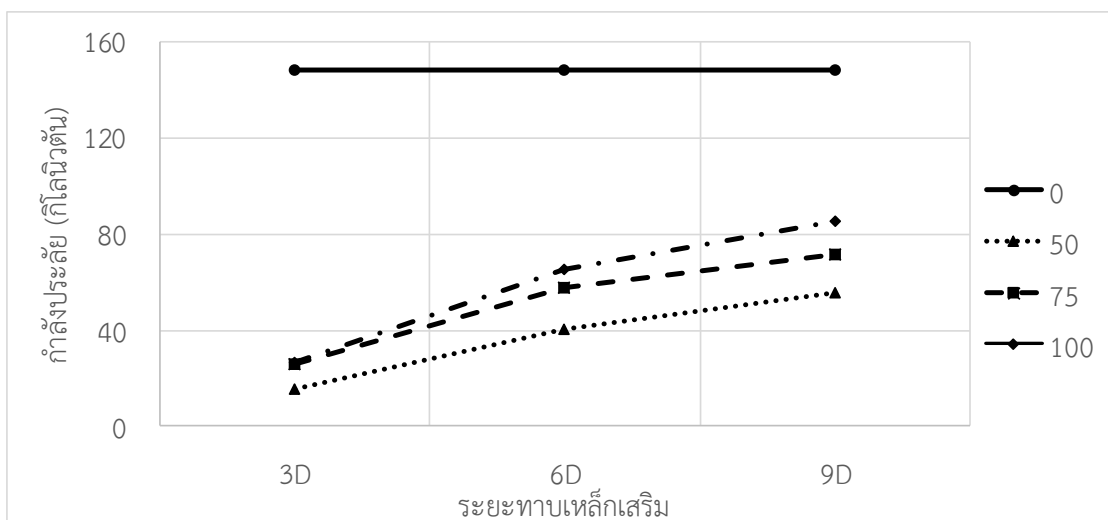


รูปที่ 4.7 แสดงความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ 75 มิลลิเมตร

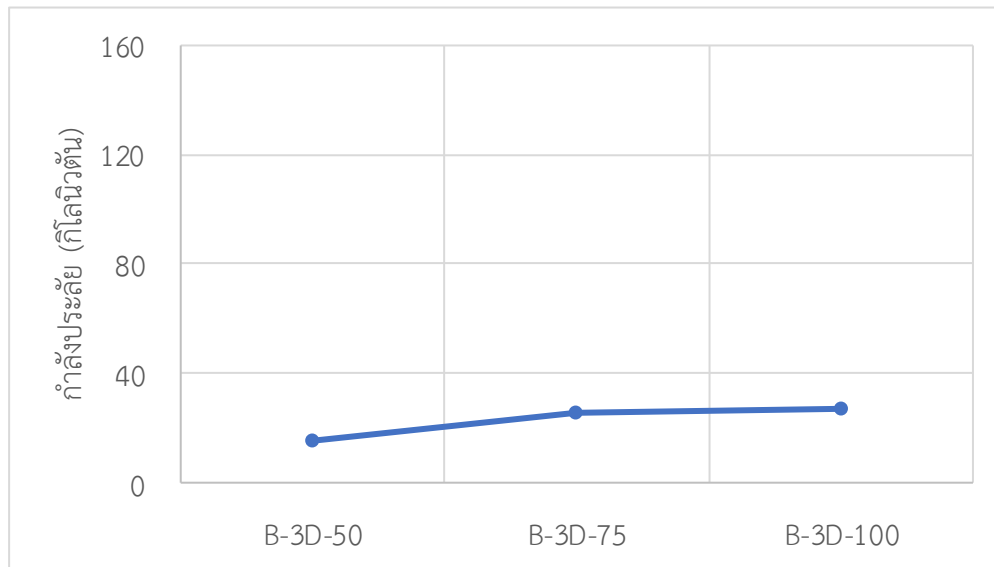


รูปที่ 4.8 แสดงความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ 100 มิลลิเมตร

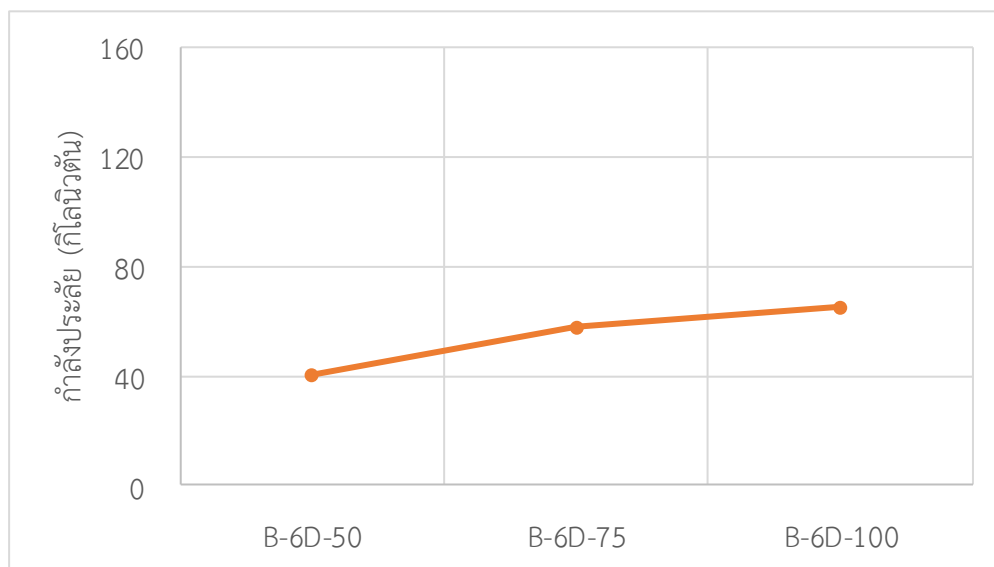
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงประลัยของคานตัวอย่างกับระยะทาบที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างทั้งหมดมาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่าที่ความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง 50 มิลลิเมตร กำลังรับแรงของคานจะเพิ่มขึ้นตามระยะทาบที่เพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของการรับแรงจะน้อยเมื่อเทียบกับความลึก 75 และ 100 มิลลิเมตร ส่วนความลึกที่ 75 มิลลิเมตร กำลังรับแรงของคานจะเพิ่มขึ้นตามระยะทาบที่เพิ่มขึ้น และในความลึกที่ 100 มิลลิเมตรกำลังรับแรงของคานจะเพิ่มขึ้นตามระยะทาบที่เพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังการรับแรงจะมากกว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับความลึก 50 และ 75 มิลลิเมตร



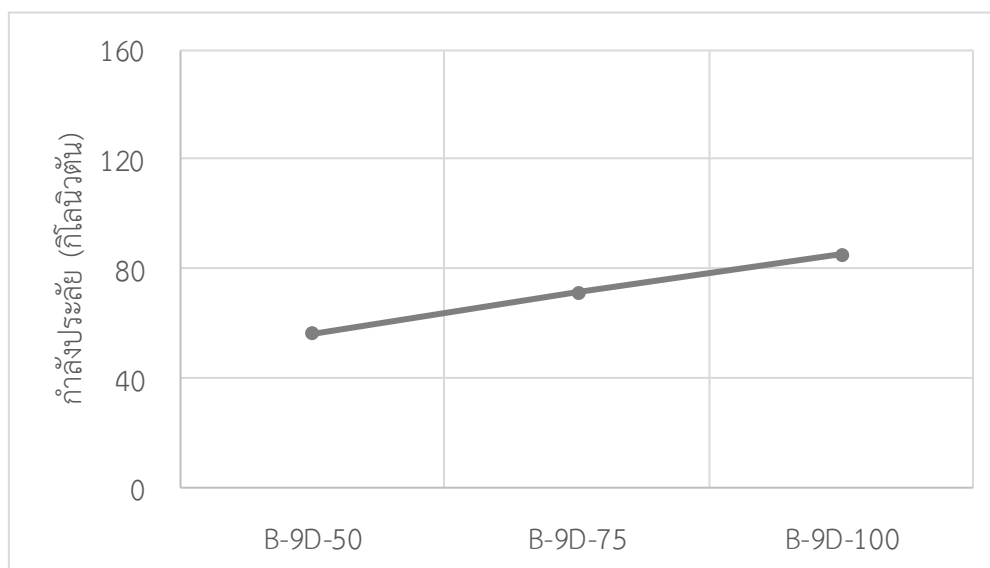
รูปที่ 4.9 แสดงกำลังรับแรงประลัย กับระยะทาบเหล็กเสริมของคานในแต่ละความลึกของ (UHPC)



รูปที่ 4.10 แสดงกำลังรับแรงประลัยของคานที่ระยะทาบ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม

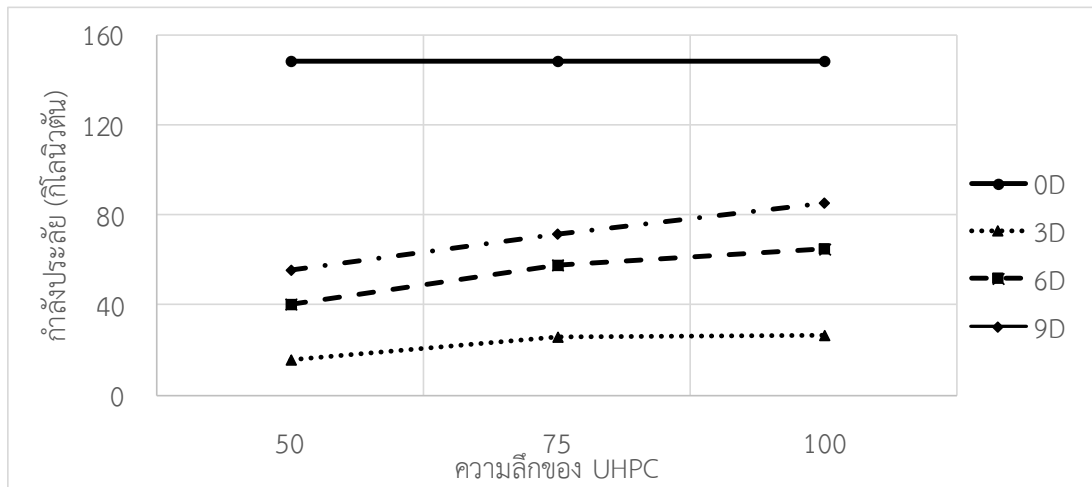


รูปที่ 4.11 แสดงกำลังรับแรงประลัยของคานที่ระยะทาบ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม



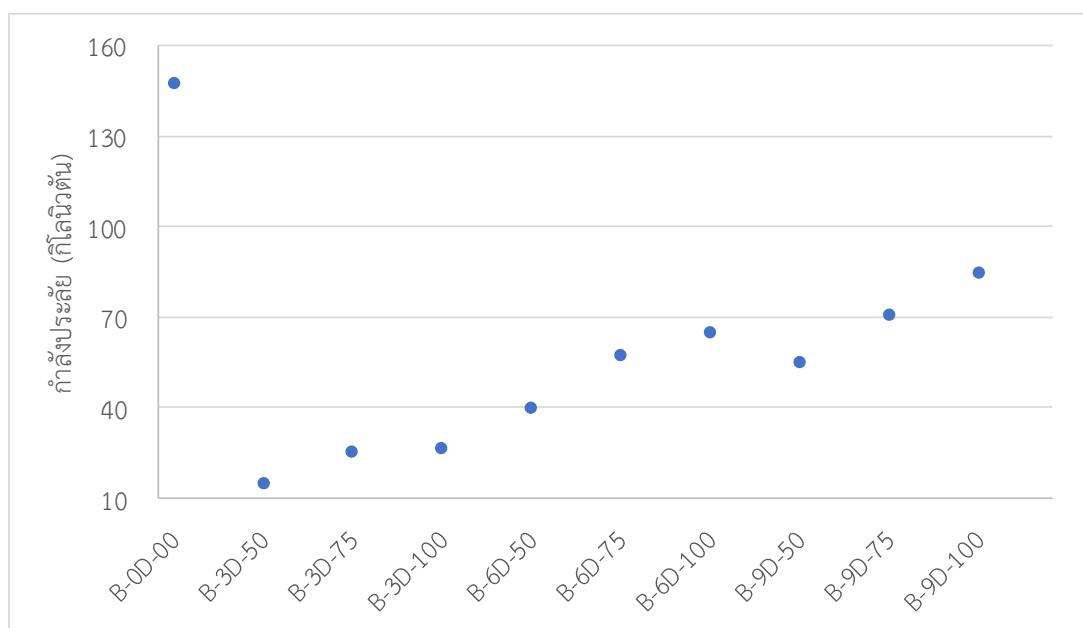
รูปที่ 4.12 แสดงกำลังรับแรงประลัยของคานที่ระยะทาบ 9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงประลัยของคานตัวอย่างกับความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง ตัวอย่างคานที่ระยะทาบ 3D กำลังการรับแรงจะเพิ่มขึ้นตามความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มความลึกจะสามารถเพิ่มการรับแรงขนาดของได้ไม่มากนักที่ระยะทาบ 6D กำลังการรับแรงจะเพิ่มขึ้นตามความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงในความลึกที่ 75 มิลลิเมตร เทียบกับ 50 มิลลิเมตร อัตราการรับแรงจะเพิ่มขึ้นมากกว่าที่ความลึก 100 มิลลิเมตร เทียบกับ 75 มิลลิเมตร และที่ระยะทาบ 9D กำลังการรับแรงจะเพิ่มขึ้นตามความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่เพิ่มขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงจะมากกว่าระยะทาบที่ 3D และ 6D ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 แสดงกำลังรับแรงประลัย กับความลึกของ (UHPC) ในแต่ละระยะทาของเหล็กเสริมในคาน

จากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงของคานตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามระยะการทาเหล็ก และความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง แต่ในตัวอย่าง B-9D-50 จะมีค่ากำลังประลัยน้อยกว่า B-6D-100 ทั้งที่มีระยะทามากกว่า เนื่องจากผลของความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงแสดงให้เห็นว่าระยะทาที่เพิ่มขึ้นแต่ความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงน้อยลงส่งผลให้กำลังรับแรงของคานตัวอย่างต่ำลงด้วย และกำลังรับแรงที่มากที่สุดของคานที่มีรอยเชื่อมคือ B-9D-100 ที่ 85.05 กิโลนิวตัน แต่กำลังรับแรงยังห่างจากคานที่ไม่ได้เชื่อมคือ B-0D-00 ที่ 148.11 กิโลนิวตัน อยู่ถึง 43 เปอร์เซ็นต์ แสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงกำลังรับแรงประลัยเฉลี่ยของตัวอย่างคานแต่ละแบบ

4.4 รอยแตกร้าวและลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง

ตัวอย่างคานที่ไม่มีรอยเชื่อมต่อไปจะมีรอยแตกร้าวเริ่มต้นบริเวณด้านล่างกึ่งกลางคาน และจะมีรอยแตกร้าวแนวตั้งด้านล่างของคานขนาดเล็ก ๆ จำนวนมาก มีรอยแตกร้าวที่เริ่มจากบริเวณจุดรองรับด้านล่างของคานแตกร้าวขึ้นมา และค่อย ๆ ทำมุมเฉียงประมาณ 45 องศา กับแกนของคานเข้าหาจุดกึ่งกลางคานทั้งสองด้าน แสดงให้เห็นว่าคานมีพฤติกรรมการรับแรงเฉือนจากรอยแตกที่ทำมุมเฉียง และมีพฤติกรรมการรับแรงดัดเห็นได้จากรอยแตกร้าวในแนวตั้งบริเวณกึ่งกลางคาน



ระยะทาบที่ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม ที่ความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง 50 มิลลิเมตร รอยแตกร้าวจะเริ่มต้นจากด้านล่างคานบริเวณกึ่งกลางที่จุดเชื่อมต่อกับลักษณะเป็นรอยเดี่ยวขนาดใหญ่ แสดงให้เห็นว่าคานวิบัติด้วยการดัดที่จุดเชื่อมต่อ ที่ความลึกคอนกรีตสมรรถนะสูง 75 มิลลิเมตร รอยแตกร้าวจะเริ่มต้นจากด้านล่างคานบริเวณกึ่งกลางที่จุดเชื่อมต่อ มีรอยแตกร้าวขนาดเล็กด้านข้างจุดเชื่อมต่อ และในคอนกรีตสมรรถนะสูง แสดงให้เห็นว่าคานวิบัติด้วยการดัดที่จุดเชื่อมต่อ ที่ความลึกคอนกรีตสมรรถนะสูง 100 มิลลิเมตร รอยแตกร้าวจะเริ่มต้นจากด้านล่างคานบริเวณกึ่งกลางที่จุดเชื่อมต่อ มีรอยแตกร้าวขนาดเล็กด้านข้างจุดเชื่อมต่อ และในคอนกรีตสมรรถนะสูง แสดงให้เห็นว่าคานวิบัติด้วยการดัดที่จุดเชื่อมต่อ

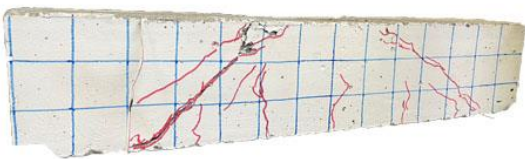

ระยะทาบที่ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม ที่ความลึกคอนกรีตสมรรถนะสูง 50 มิลลิเมตร มีรอยร้าวแตกเริ่มต้นจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อ และมีรอยแตกร้าวลักษณะแบกชั้นกันระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูง กับปูนนอกรีต แสดงให้เห็นว่าคานวิบัติด้วยการดัดที่จุดเชื่อมต่อ ที่ความลึกคอนกรีตสมรรถนะสูง 75 มิลลิเมตร มีรอยร้าวแตกเริ่มต้นจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตกับคอนกรีตสมรรถนะสูง และมีรอยแตกร้าวลักษณะแบกชั้นกันระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูง กับปูนนอกรีต มีรอยแตกร้าวในคานคอนกรีตด้านนอกตรงขึ้นมา และค่อย ๆ เฉียง แสดงให้เห็นว่าคานวิบัติด้วยการดัดที่จุดเชื่อมต่อ และคานคอนกรีตมีการรับแรงดัดเห็นได้จากรอยแตกแนวตั้ง ที่ความลึกคอนกรีตสมรรถนะสูง 100 มิลลิเมตร รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูงกับคานคอนกรีต ยังมีรอยแตกร้าวที่คานคอนกรีตจากด้านล่างแนวตั้งเล็กน้อย และมีรอยแตกร้าวในบริเวณการเชื่อมต่อที่คอนกรีตสมรรถนะสูง แสดงให้เห็นว่าคานวิบัติด้วยการดัดที่จุดเชื่อมต่อ และคานคอนกรีตมีการรับแรงดัดเห็นได้จากรอยแตกแนวตั้ง

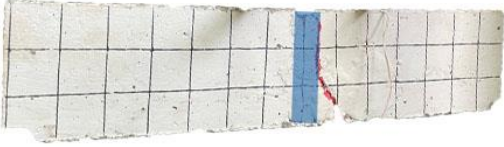
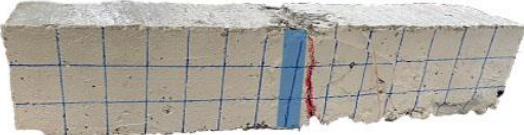

ระยะทาบที่ 9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก ที่ความลึกคอนกรีตสมรรถนะสูง 50 มิลลิเมตร รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูงกับคานคอนกรีต และมีรอยแตกร้าวในบริเวณคอนกรีตสมรรถนะสูง ลักษณะแนวอนที่แบ่งระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูง กับปูนนอกรีต แสดงให้เห็นว่าคานวิบัติด้วยการดัดที่จุดเชื่อมต่อ และจุดเชื่อมต่อมีการรับแรงดัดเพิ่มขึ้น ที่ความลึกคอนกรีตสมรรถนะสูง 75 มิลลิเมตร รอยแตกร้าวเริ่ม

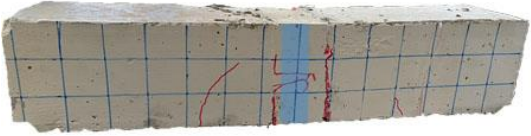


จากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อระหว่างคานกรีตสมรรถนะสูงกับคานคอนกรีต จะมีรอยแตกร้าวมากในบริเวณนี้ และมีรอยแตกร้าวอื่น ๆ บริเวณคานคอนกรีตเริ่มแตกจากบริเวณจุดรองรับคานด้านล่าง และค่อย ๆ ขึ้นไปทำมุมเฉียงประมาณ 45 องศา แสดงให้เห็นว่าคานวิบัติด้วยการตัดที่จุดเชื่อมต่อ และคานคอนกรีตมีการรับแรงเฉือนเห็นได้จากรอยแตกร้าวในแนวเฉียง ที่ความลึกคานกรีตสมรรถนะสูง 100 มิลลิเมตร รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อระหว่างคานกรีตสมรรถนะสูงกับคานคอนกรีต และมีรอยแตกแนวตั้งจำนวนมากบริเวณด้านล่างคานที่ไม่มีจุดเชื่อมต่อ รอบแตกจะมีลักษณะเริ่มแตกจากด้านล่างตรงขึ้นมาเป็นแนวเฉียงเข้าหาบริเวณกึ่งกลางคาน แสดงให้เห็นว่าคานวิบัติด้วยการตัดที่จุดเชื่อมต่อ และคานคอนกรีตมีการรับแรงเฉือนเห็นได้จากรอยแตกร้าวในแนวเฉียง และรับแรงดัดเห็นได้จากรอยแตกในแนวตั้ง



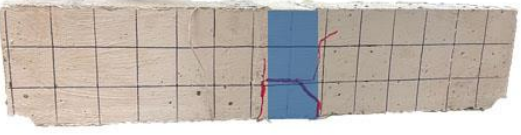
ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดลักษณะรอยแตกร้าวของคานทั้งหมด 10 แบบ จำนวน 30 ตัวอย่าง

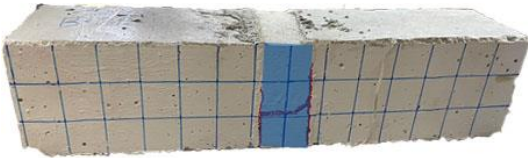
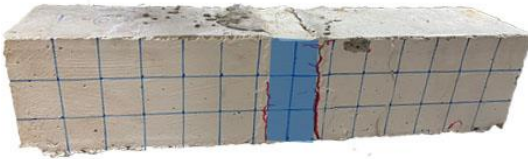

ตัวอย่าง	สัญลักษณ์	ลักษณะรอยแตกร้าว	หมายเหตุ
1	B-0D-00-1		รอยแตกร้าวเริ่มต้นจากบริเวณด้านล่างกึ่งกลางคาน และด้านล่างของคานบริเวณจุดรองรับ จะมีรอยแตกร้าวเล็ก ๆ จำนวนทำมุม 45 องศาเมื่อรอยแตกนั้นยาวขึ้นไป
2	B-0D-00-2		รอยแตกร้าวเริ่มต้นจากบริเวณด้านล่างกึ่งกลางคาน และด้านล่างของคานบริเวณจุดรองรับ จะมีรอยแตกร้าวเล็ก ๆ จำนวนทำมุม 45 องศาเมื่อ


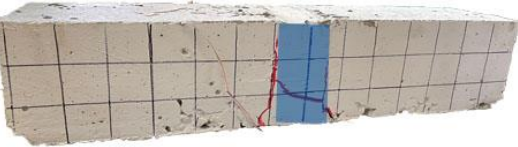
ตัวอย่าง	สัญลักษณ์	ลักษณะรอยแตกร้าว	หมายเหตุ
			รอยแตกร้าวนั้นยาวขึ้นไป
3	B-0D-00-3		รอยแตกร้าวเริ่มต้นจากบริเวณด้านล่างกึ่งกลางคาน และด้านล่างของคาน บริเวณจุดรองรับ จะมีรอยแตกร้าวเล็ก ๆ จำนวนมากทำมุม 45 องศาเมื่อรอยแตกร้าวนั้นยาวขึ้นไป
4	B-3D-50-1		รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างคานกับคอนกรีตสมรรถนะสูง รอยแตกร้าวมีจำนวนน้อย มีความยาวและขนาดใหญ่มี
5	B-3D-50-2		รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างบริเวณจุด

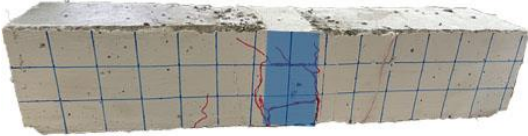
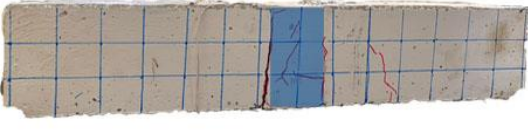
ตัวอย่าง	สัญลักษณ์	ลักษณะรอยแตกร้าว	หมายเหตุ
			<p>เชื่อมต่อระหว่างคานกับคอนกรีตสมรรถนะสูง รอยแตกร้าวมีจำนวนน้อย มีความยาวและขนาดใหญ่มี</p>
6	B-3D-50-3		<p>รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างคานกับคอนกรีตสมรรถนะสูง รอยแตกร้าวมีจำนวนน้อย มีความยาวและขนาดใหญ่มี</p>
7	B-3D-75-1		<p>รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างคานบริเวณกึ่งกลางที่รอยเชื่อมต่อกานมีรอยแตกจำนวน 2-3 รอย</p>

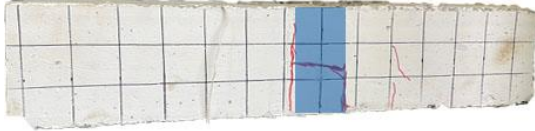
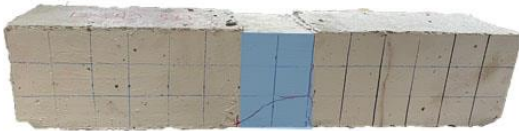

ตัวอย่าง	สัญลักษณ์	ลักษณะรอยแตกร้าว	หมายเหตุ
8	B-3D-75-2		<p>มีรอยแตกแตกร้าว เริ่มจากด้านล่างคาน บริเวณกึ่งกลางที่ รอยเชื่อมต่อกาน และมีรอยแตกร้าว เพิ่มขึ้นในบริเวณ คอนกรีตถัดมาจาก กึ่งกลางคานเพิ่มขึ้น</p>
9	B-3D-75-3		<p>รอยแตกร้าวเริ่มจาก ด้านล่างคานบริเวณ กึ่งกลางที่รอย เชื่อมต่อกานมีรอย แตกจำนวน 2-3 รอย และมีรอย แตกร้าวเพิ่มใน บริเวณคอนกรีต สมรรถนะสูง</p>
10	B-3D-100-1		<p>มีรอยแตกแตกร้าว เริ่มจากด้านล่างคาน บริเวณกึ่งกลางที่ รอยเชื่อมต่อกาน และมีรอยแตกร้าว เพิ่มขึ้นในบริเวณ จุดเชื่อมต่อยแตก เกิดขึ้นในคอนกรีต สมรรถนะสูง</p>
11	B-3D-100-2		<p>มีรอยแตกร้าวเริ่ม จากบริเวณด้านล่าง</p>


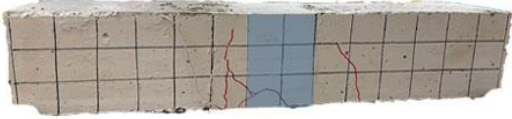
ตัวอย่าง	สัญลักษณ์	ลักษณะรอยแตกร้าว	หมายเหตุ
			<p>กึ่งกลางคาน ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูงกับคานคอนกรีต จำนวน 2-3 รอย</p>
12	B-3D-100-3		<p>มีรอยแตกร้าวเริ่มจากบริเวณด้านล่าง กึ่งกลางคาน ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูงกับคานคอนกรีต จำนวน 2-3 รอย</p>
13	B-6D-50-1		<p>มีรอยแตกร้าวเริ่มต้นจากด้านล่าง บริเวณกึ่งกลางคาน ที่จุดเชื่อมต่อ และมีรอยแตกร้าวลักษณะแบกชั้นกันระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูง กับปูนนอนซิ่ง</p>
14	B-6D-50-2		<p>มีรอยแตกร้าวเริ่มต้นจากด้านล่าง บริเวณกึ่งกลางคาน</p>

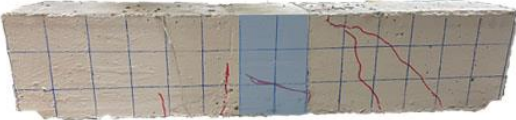

ตัวอย่าง	สัญลักษณ์	ลักษณะรอยแตกร้าว	หมายเหตุ
			<p>ที่จุดเชื่อมต่อ และมีรอยแตกร้าวลักษณะแบกชั้นกันระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูง กับปูนนอนชรั้ง</p>
15	B-6D-50-3		<p>มีรอยแตกร้าวเริ่มต้นจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตกับคอนกรีตสมรรถนะสูงรอยแตกมีลักษณะตรงยาวมีการกระจายของรอยแตกเล็กน้อย</p>
16	B-6D-75-1		<p>มีรอยแตกร้าวเริ่มต้นจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตกับคอนกรีตสมรรถนะสูง รอยแตกร้าวมีการกระจายตัวเป็นรอยเล็ก ๆ และมีรอยแตกร้าวลักษณะแบกชั้นกันระหว่างคอนกรีต</p>

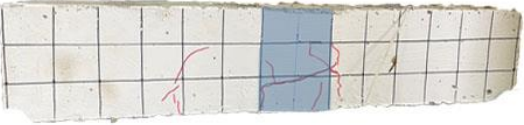

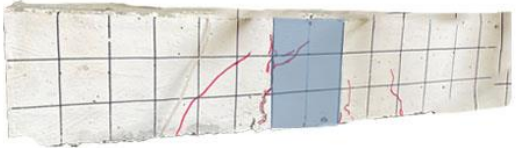
ตัวอย่าง	สัญลักษณ์	ลักษณะรอยแตกร้าว	หมายเหตุ
			สมรรถนะสูง กับปูน นอนชรั้ง
17	B-6D-75-2		มีรอยแตกร้าว เริ่มต้นจากด้านล่าง บริเวณกึ่งกลางคาน ที่จุดเชื่อมต่อ ระหว่างคอนกรีตกับ คอนกรีตสมรรถนะ สูง และมีรอย แตกร้าวลักษณะ แบกชั้นกันระหว่าง คอนกรีตสมรรถนะ สูง กับปูนนอนชรั้ง มีรอยแตกร้าวใน คานคอนกรีตด้าน นอกตรงขึ้นมา และ ค่อย ๆ เฉียง
18	B-6D-75-3		มีรอยแตกร้าว เริ่มต้นจากด้านล่าง บริเวณกึ่งกลางคาน ที่จุดเชื่อมต่อ ระหว่างคอนกรีต สมรรถนะสูงกับคาน คอนกรีต และมีรอย แตกร้าวลักษณะ แบกชั้นกันระหว่าง คอนกรีตสมรรถนะ สูง กับปูนนอนชรั้ง แบบเฉียง

ตัวอย่าง	สัญลักษณ์	ลักษณะรอยแตกร้าว	หมายเหตุ
19	B-6D-100-1		<p>รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูงกับคานคอนกรีต ยังมีรอยแตกร้าวทวนคอนกรีตจากด้านล่างด้วยเล็กน้อย และมีรอยแตกร้าวในบริเวณการเชื่อมต่อที่คอนกรีตสมรรถนะสูง</p>
20	B-6D-100-2		<p>รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูงกับคานคอนกรีต ยังมีรอยแตกร้าวที่คานคอนกรีตจากด้านล่างด้วยเล็กน้อย และมีรอยแตกร้าวในบริเวณการเชื่อมต่อที่คอนกรีตสมรรถนะสูง</p>
21	B-6D-100-3		<p>รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างบริเวณ</p>

ตัวอย่าง	สัญลักษณ์	ลักษณะรอยแตกร้าว	หมายเหตุ
			<p>กึ่งกลางคานที่จุด เชื่อมต่อระหว่าง คอนกรีตสมรรถนะ สูงกับคานคอนกรีต และมีรอยแตกร้าว ในแนวนอนที่ คอนกรีตสมรรถนะ สูง ยังมีรอยแตกร้าว เล็ก ๆ บริเวณคาน คอนกรีตสมรรถนะ สูงจากด้านล่างคาน</p>
22	B-9D-50-1		<p>รอยแตกร้าวเริ่มจาก ด้านล่างบริเวณ กึ่งกลางคานที่จุด เชื่อมต่อระหว่าง คอนกรีตสมรรถนะ สูงกับคานคอนกรีต และมีรอยแตกร้าว ในบริเวณคอนกรีต สมรรถนะสูง ลักษณะแนวเฉียง</p>
23	B-9D-50-2		<p>รอยแตกร้าวเริ่มจาก ด้านล่างบริเวณ กึ่งกลางคานที่จุด เชื่อมต่อระหว่าง คอนกรีตสมรรถนะ สูงกับคานคอนกรีต และมีรอยแตกร้าว ในบริเวณคอนกรีต สมรรถนะสูง</p>

ตัวอย่าง	สัญลักษณ์	ลักษณะรอยแตกร้าว	หมายเหตุ
			ลักษณะแนวนอนที่แบ่งระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูง กับปูนนอชรั้ง
24	B-9D-50-3		รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูงกับคานคอนกรีต และมีรอยแตกร้าวในบริเวณคอนกรีตสมรรถนะสูง ลักษณะแนวนอนที่แบ่งระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูง กับปูนนอชรั้ง
25	B-9D-75-1		รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูงกับคานคอนกรีต และมีรอยแตกร้าวอื่น ๆ บริเวณคานคอนกรีต
26	B-9D-75-2		รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อระหว่าง

ตัวอย่าง	สัญลักษณ์	ลักษณะรอยแตกร้าว	หมายเหตุ
			<p>คอนกรีตสมรรถนะสูงกับคานคอนกรีต และมีรอยแตกร้าวอื่น ๆ บริเวณคานคอนกรีตเริ่มแตกจากบริเวณจุดรองรับคานด้านล่าง และค่อย ๆ ขึ้นไป ทำมุมเฉียงประมาณ 45 องศา</p>
27	B-9D-75-3		<p>รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูงกับคานคอนกรีต จะมีรอยแตกร้าวมากในบริเวณนี้ และมีรอยแตกร้าวอื่น ๆ บริเวณคานคอนกรีตเริ่มแตกจากบริเวณจุดรองรับคานด้านล่าง และค่อย ๆ ขึ้นไป ทำมุมเฉียงประมาณ 45 องศา</p>
28	B-9D-100-1		<p>รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อระหว่าง</p>

ตัวอย่าง	สัญลักษณ์	ลักษณะรอยแตกร้าว	หมายเหตุ
			<p>คอนกรีตสมรรถนะสูงกับคานคอนกรีตจะมีรอยแตกร้าวมากในบริเวณนี้ และมีรอยแตกร้าวที่คานคอนกรีตบริเวณห่างออกมาจากจุดเชื่อมต่อรอยแตกร้าวจะเริ่มแตกจากด้านล่างคานตรงขึ้นไป</p>
29	B-9D-100-2		<p>รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูงกับคานคอนกรีต และรอยแตกร้าวจะเป็นแนวเฉียงขึ้นที่ที่จุดเชื่อมต่อด้านบน</p>
30	B-9D-100-3		<p>รอยแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานที่จุดเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูงกับคานคอนกรีต และมีรอยแตกจำนวนมากบริเวณด้านล่างคานที่ไม่มีจุดเชื่อมต่อ รอบ</p>

ตัวอย่าง	สัญลักษณ์	ลักษณะรอยแตกร้าว	หมายเหตุ
			แตกจะมีลักษณะ เริ่มแตกจาก ด้านล่างตรงขึ้นมา เป็นแนวเฉียงเข้าหา บริเวณกึ่งกลางคาน

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเชื่อมต่อกันด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบการทดสอบคือ ระยะทาบที่ 3 เท่า 6 เท่า และ 9 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม และความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงในบริเวณจุดเชื่อมต่อความลึกที่ใช้คือ 5.0 เซนติเมตร 7.5 เซนติเมตร และ 10.0 เซนติเมตร

กำลังการรับแรงอัดของคอนกรีตมีผลต่อกำลังการรับแรงของคานซึ่งกำลังการต้านทานแรงอัดของคอนกรีตได้ออกแบบไว้ที่ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดสอบลูกบาศก์กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 380 ± 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่ากำลังที่ออกแบบไว้ ทำให้การรับแรงของคานสามารถรับแรงได้เพิ่มมากขึ้นจากการออกแบบไว้ที่ 120 กิโลนิวตัน เป็น 148.11 กิโลนิวตัน แสดงให้เห็นว่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตมีความสำคัญมากในการออกแบบโครงสร้าง และได้ทำการศึกษาการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ 3 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าการพัฒนากำลังของคอนกรีตสมรรถนะสูง (UHPC) ที่ 3 ถึง 7 วัน กำลังต้านทานแรงอัดจะมีการพัฒนาเพิ่มอย่างมาก และจะพัฒนาช้าลงเมื่ออายุได้ 14 วัน และที่ 28 วันกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 1,100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงจะส่งผลต่อจุดเชื่อมต่อ

การรับแรงของคานที่ไม่มีการเชื่อมต่อกำลังรับแรงสูงสุดเฉลี่ยคือ 148.11 กิโลนิวตัน มีระยะโก่งตัวเฉลี่ย 1.158 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตส่งผลต่อระยะการโก่งตัวเนื่องจากคานที่มีกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่สูงคอนกรีตจะมีความเปราะทำให้ระยะการโก่งตัวของคานน้อยลงไปด้วย และความเครียดในเหล็กเสริมจะมีความสัมพันธ์กับระยะการโก่งตัวของคานคือ เมื่อความเครียดในเหล็กเสริมเข้าใกล้จุดครากระยะการโก่งตัวของคานจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลง จุดครากของเหล็กเสริมอยู่ที่ประมาณ 2,300 ไมโครเมตรต่อเมตร และเมื่อผ่านจุดครากของเหล็กเสริมไปแล้วการโก่งตัวของคานก็จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่เพิ่มขึ้น จนไปถึงจุดที่คานวิบัติ ความเครียดในเหล็กเสริมจะมีค่าเท่ากับ 2,651.24 ไมโครเมตรต่อเมตร ในคานที่มีการเชื่อมต่อที่ระยะทาบ 3 เท่า และ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมระยะการโก่งตัวจะน้อยมากเมื่อเทียบกับคานที่ไม่มีการเชื่อมต่อเนื่องจากลักษณะการวิบัติของคานที่จะวิบัติที่จุดเชื่อมต่อ และความเครียดของเหล็กเสริมที่ระยะทาบ 3 เท่า และ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมมีค่าน้อยไม่ถึงจุดครากของเหล็กเสริม เนื่องจากเหล็กเสริมยังไม่รับแรงมากนักสังเกตได้จากรอยแตกร้าวที่คอนกรีต ในระยะทาบ

ที่ 9 ความเครียดของเหล็กเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ระยะการโก่งตัวของคานเพิ่มขึ้นมาก แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระยะทาบเหล็กเสริม และความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงสามารถเพิ่มการรับแรง ระยะการโก่งตัวของคาน และความเครียดของเหล็กเสริมได้

การเพิ่มระยะทาบของเหล็กเสริมในตอนแรกที่ระยะเริ่มต้นคือ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมเพิ่มไปยัง 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมอัตราการเพิ่มขึ้นของการรับแรงของคานเพิ่มขึ้นสูงมาก และเมื่อเพิ่มระยะทาบของเหล็กเสริมไปที่ 9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม อัตราการเพิ่มขึ้นของการรับแรงของคานนั้นลดลง แสดงให้เห็นว่าในขั้นแรกเมื่อเราเพิ่มระยะทาบที่น้อย ๆ อัตราการเพิ่มขึ้นของการรับแรงคานจะเพิ่มขึ้นมาก และค่อย ๆ ลดลงตามระยะทาบที่เพิ่มขึ้น นั่นคือเมื่อเราเพิ่มระยะทาบที่มากพอแล้วคานของเราจะสามารถรับแรงได้เทียบเท่ากับคานที่ไม่มีการทาบเหล็กเสริม ในส่วนของการเพิ่มความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงในช่วงแรกที่มีการเพิ่มความลึก 50 มิลลิเมตร ไปยังความลึก 75 มิลลิเมตรกำลังการรับแรงของคานเพิ่มขึ้นมาก และเมื่อเพิ่มความลึกไปที่ 100 มิลลิเมตรกำลังการรับแรงของคานเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับในตอนแรก แสดงให้เห็นว่าเมื่อเราเพิ่มความลึกไปเรื่อย ๆ จนเข้าใกล้ความลึกทั้งหมดของคานอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังการรับแรงของคานก็จะเพิ่มขึ้นอย่างน้อยลง

รอยแตกร้าวของคานตัวอย่างจะแสดงพฤติกรรมในการรับแรงของคาน ในระยะแรกที่มีการเชื่อมต่อกันด้วยระยะทาบเหล็กเสริม และความลึกคอนกรีตสมรรถนะสูงที่น้อยพฤติกรรมการรับแรงของคานจะเป็นการวิบัติบริเวณกลางคาน และลักษณะของรอยแตกจะมีรอยแตกร้าวน้อยในแนวตั้งบริเวณกลางคานเนื่องจากจุดที่อ่อนแอที่สุดของคานคือ จุดเชื่อมต่อทำให้ตัวคานในจุดอื่นยังไม่เกิดหน่วยแรง หรือเกิดขึ้นน้อยมาก แต่เมื่อเพิ่มระยะทาบ และความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง ลักษณะรอยแตกร้าวจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามระยะทาบ และความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงรอยแตกร้าวจะเกิดบริเวณข้าง ๆ จุดเชื่อมต่อที่เป็นคานคอนกรีตจะมีรอยแตกร้าวในแนวตั้งเล็ก ๆ แต่การวิบัติก็จะเกิดขึ้นในบริเวณจุดเชื่อมต่อดั้งเดิมเนื่องจากความแข็งแรงของจุดนี้ยังไม่เพียงพอ ต่อไปเมื่อเพิ่มระยะทาบ และความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงขึ้นไปอีกรอยแตกร้าวที่เพิ่มขึ้นมาคือ รอยแตกบริเวณจุดรองรับด้านล่างของคานทั้งสองด้านรอยแตกจะมีลักษณะเป็นแนวเฉียงประมาณ 45 องศา รอยแตกในลักษณะนี้คือ พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคาน และมีรอยแตกในแนวตั้งบริเวณใกล้จุดเชื่อมต่อเป็นพฤติกรรมการรับแรงดัด แต่การวิบัติของคานก็จะเกิดที่บริเวณจุดเชื่อมต่อเหมือนเดิม เพราะระยะทาบยังไม่เพียงพอที่จะทำให้จุดเชื่อมต่อนี้แข็งแรง ในตัวอย่างคานที่ไม่มีการเชื่อมต่อก็จะมีรอยแตกบริเวณจุดรองรับเป็นแนวเฉียงประมาณ 45 องศาเข้าหาจุดกึ่งกลางคานจำนวนมาก และรอยร้าวในแนวตั้งบริเวณกลางคานจำนวนมาก แสดงให้เห็นว่าคานมีพฤติกรรมการรับแรงดัด และการรับ

แรงเฉือนแบบผสมกัน แต่คานจะวิบัติโดยการรับแรงดัดสามารถดูได้จากความเครียดในเหล็กเสริมที่
พันธจุดครากของเหล็กไปแล้ว และเกิดการวิบัติของคานตัวอย่าง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยควรเพิ่มตัวแปรที่ใช้ เช่น เพิ่มระยะทาบให้มากกว่านี้เพื่อให้คานตัวอย่างที่
เชื่อมต่อสามารถรับแรงได้เทียบเท่าคานที่ไม่มีการเชื่อมต่อ และเพิ่มตัวแปรที่จุดเชื่อมต่อโดยใช้
คอนกรีตสมรรถนะสูงทั้งหมดเพื่อให้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับกรณีลดการใช้คอนกรีตสมรรถนะสูง
ได้ และยังทำให้เห็นพฤติกรรมในจุดเชื่อมต่อของคอนกรีตสมรรถนะสูงได้ชัดเจนมากขึ้น

เพิ่มความลึกของคาน เนื่องจากคานที่มีความลึกมากกว่าความกว้างจะแสดง
พฤติกรรมการรับแรงได้ใกล้เคียง หรือเสมือนคานตัวอย่างจริงได้มากกว่า

นำไปศึกษาเพิ่มเติมโดยออกแบบโมเดลการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษา
ออกแบบการใช้เหล็กเสริมที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป หรือคานที่มีความยาว และความลึกที่แตกต่าง
กันไป

บรรณานุกรม

- ไกรวุฒิ ตันติสุขารมย์, ธนวัฒน์ โชคสว่างเนตร, ปิยะพลสีหาบุตร และ เรืองรุชดี ซีระโรจน์. (2012). การใช้ประโยชน์ของเถ้าก้นเตาบดละเอียดในคอนกรีตสมรรถนะสูง. *Engineering Journal of Research and Development*, 23(1), 40-47.
- จุฑามิ พฤกษ์. (2011). การพัฒนาคอนกรีตสมรรถนะสูงมากเพื่อการซ่อมแซมพื้นผิวถนนคอนกรีตโดยวิธีเททับหน้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐวัตร เหมือนเหลา, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, และ ชัยจาตุร พิทักษ์กุล. (2022). ผลกระทบของเส้นใยเหล็กต่อสมบัติเชิงกล และการคืบของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด. การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 27, 27, STR21-1.
- เรืองเดช ไทยเรือง. (2016). การศึกษารอยแตกร้าวของคอนกรีตโครงสร้าง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Abadel A.A., Galal M., Kohail M. and Alharbi Y. R. (2021). Bond behavior between concrete and steel rebars for stressed elements. *Ain Shams Engineering Journal*, 12.2 pp. 1231-1239.
- Elsayed, M., Badawy, S., Tayeh, B. A., Elymany, M., Salem, M. and ElGawady, M. (2022, September). Shear behaviour of ultra-high performance concrete beams with openings. In *Structures* (Vol. 43, pp. 546-558). Elsevier.
- Eric J., and Saatcioglu M. (2019). Bond-slip modelling of reinforced concrete lap splices subjected to low and high strain rates. *Engineering Structures* 195, pp. 568-578.
- Fabien L., Massicotte B., and Charron J. P. (2015). Bond strength of tension lap splice specimens in UHPFRC. *Construction and Building Materials*, 93, pp. 84-94.
- Fabien L., Massicotte B., and Charron J.P. (2016). Experimental investigation of bond stress distribution and bond strength in unconfined UHPFRC lap splices under direct tension. *Cement and Concrete Composites*, 74, pp. 26-38.
- Islam M.M.U. (2021). Investigation of tensile creep for Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) for the long-term. *Construction and Building Materials*, 305, pp.124752.

- Konstantinos T. and Pantazopoulou S.J. (2021). Bond behavior of high-performance fiber reinforced concrete (HPFRC) under direct tension pullout. *Engineering Structures*, 243, pp. 112701.
- Ma F., Deng M., Ma Y., Lü H., Yang Y. and Sun H. (2020). Study on the lap-splice behavior of post-yield deformed steel bars in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 262, pp. 120611.
- Ma, F., Deng, M., Ma, Y., Lü, H., Yang, Y. and Sun, H. (2021). Experimental study on interior precast concrete beam–column connections with lap-spliced steel bars in field-cast RPC. *Engineering Structures*, 228, 111481.
- Mészöly, T. and Randl, N. (2018). Shear behavior of fiber-reinforced ultra-high performance concrete beams. *Engineering Structures*, 168, 119-127.
- Mousa I. M. (2015). Flexural behaviour and ductility of high strength concrete (HSC) beams with tension lap splice. *Alexandria Engineering Journal*, 54.3, pp. 551-563.
- Prem, P. R. and Murthy, A. R. (2017). Acoustic emission monitoring of reinforced concrete beams subjected to four-point-bending. *Applied Acoustics*, 117, 28-38.
- Qi J., Liu J., Wang J., Cheng Z. and Ma Z.J. (2021). Bond strength of reinforcing bars in ultra-high performance concrete: Experimental study and fiber–matrix discrete model. *Engineering Structures*, 248, pp. 113290.
- Rave-Arango J.F., Blandón C.A., Restrepo J.I. and Carmona F. (2018). Seismic performance of precast concrete column-to-column lap-splice connections. *Engineering structures*, 172, pp. 687-699.
- Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z. and Fang, Z. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*, 101, 741-751.
- Špak, M., Kozlovská, M., Struková, Z. and Bašková, R. (2016). Comparison of conventional and advanced concrete technologies in terms of construction efficiency. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016.

- Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C. and Pu, X. (2012). Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials. *Cement and concrete composites*, 34(4), 538-544.
- Yang, I. H., Joh, C. and Kim, B. S. (2010). Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending. *Engineering structures*, 32(11), 3478-3487.
- Yin, Y., Qiao Y., and Hu S. (2019). Four-point bending tests for the fracture properties of concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 211, pp. 371-381.
- Yoo, D. Y. and Yoon, Y. S. (2015). Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers. *Engineering Structures*, 102, 409-423.
- Zhu, Y., Zhang, Y., Hussein, H. H. and Chen, G. (2020). Flexural strengthening of reinforced concrete beams or slabs using ultra-high performance concrete (UHPC): A state of the art review. *Engineering Structures*, 205, 110035.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบคุณสมบัติเหล็กเสริม

Report Date	8/2/2566	Test Date	8/2/2566	
Test Mode	Single	Test Type	Tensile	
Speed	15mm/min	Shape	Rod	
No of Batches	30	Qty/Batch	3	
Name	YP(%FS)_Force	YS1_Force	YS2_Force	Max_Force
Parameters	0.1%	0.2%	0.2%	Calc. at Entire Areas
Unit	kgf	kgf	kgf	kgf
DB 12_1	6,123	6,246	6,246	7,584
DB 12_2	6,117	6,029	6,029	6,874
DB 12_3	5,442	5,418	5,418	6,831

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

ตัวอย่าง	พื้นที่ (ตาราง เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ความ หนาแน่น (กิโลกรัม ต่อลูกบาศก์ เมตร)	แรงสูงสุด (กิโลกรัม)	กำลังต้านทาน แรงอัด (กิโลกรัมต่อ ตาราง เซนติเมตร)
B-0D-00	231	3,581	8.77	2,450	85,728	371
	231	3,558	8.63	2,426	83,461	361
	226	3,488	8.81	2,526	87,996	388
B-3D-50	232	3,534	8.77	2,482	95,254	409
	234	3,581	8.6	2,410	89,811	383
	234	3,581	8.81	2,460	89,811	383
B-3D-75	231	3,488	8.17	2,341	88,450	382
	228	3,442	5.04	2,335	87,996	385
	226	3,397	8.07	2,375	86,636	382
B-3D-100	238	3,675	8.72	2,373	93,440	391
	237	3,580	8.26	2,308	90,264	380
	229	3,442	8.33	2,420	86,636	377
B-6D-50	237	3,652	8.60	2,354	86,182	363
	234	3,581	8.56	2,391	87,996	375
	235	3,628	8.43	2,324	86,182	365
B-6D-75	235	3,604	8.64	2,397	98,429	417
	235	3,628	8.70	2,399	93,440	396

ตัวอย่าง	พื้นที่ (ตาราง เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ความ หนาแน่น (กิโลกรัม ต่อลูกบาศก์ เมตร)	แรงสูงสุด (กิโลกรัม)	กำลังต้านทาน แรงอัด (กิโลกรัมต่อ ตาราง เซนติเมตร)
	232	3,534	8.64	2,444	95,254	409
B-6D-100	231	3,465	8.74	2,522	100,697	435
	235	3,604	8.62	2,393	88,450	375
	234	3,558	8.68	2,440	89,357	381
B-9D-50	232	3,534	8.75	2,475	94,347	405
	232	3,511	8.71	2,481	97,068	417
	235	3,604	8.66	2,403	101,151	429
B-9D-75	238	3,699	8.68	2,346	82,553	345
	234	3,534	8.57	2,424	87,543	373
	234	3,534	8.52	2,411	85,728	366
B-9D-100	238	3,652	8.54	2,338	96,615	404
	237	3,652	8.66	2,373	87,089	367
	240	3,699	8.69	2,351	91,625	381

ภาคผนวก ค
ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง

อายุ (วัน)	ลำดับ	พื้นที่ (ตาราง เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ความ หนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์ เมตร)	แรงสูงสุด (กิโลกรัม)	กำลังต้านทาน แรงอัด (กิโลกรัมต่อ ตาราง เซนติเมตร)
3	1.	103	1,009	2.47	2,446	86,182	836
	2.	105	1,071	2.49	2,323	77,110	733
	3.	104	1,050	2.51	2,388	58,513	562
	4.	105	1,061	2.47	2,329	80,285	764
	5.	104	1,050	2.43	2,318	75,296	723
	6.	103	1,009	2.48	2,457	95,254	924
	7.	105	1,050	2.58	2,409	72,121	686
	8.	104	1,061	2.58	2,432	86,636	832
7	1.	104	1,061	2.56	2,412	78,017	749
	2.	104	1,061	2.65	2,497	103,419	994
	3.	104	1,061	2.53	2,384	89,461	802
	4.	103	1,040	2.50	2,402	66,224	642
	5.	106	1,060	2.51	2,366	98,883	932
	6.	106	1,039	2.47	2,375	79,832	752
	7.	106	1,061	2.59	2,440	120,655	1,137
	8.	104	1,009	2.51	2,485	104,326	1,002
	9.	105	1,019	2.50	2,453	100,243	954

อายุ (วัน)	ลำดับ	พื้นที่ (ตาราง เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ความ หนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์ เมตร)	แรงสูงสุด (กิโลกรัม)	กำลังต้านทาน แรงอัด (กิโลกรัมต่อ ตาราง เซนติเมตร)
	10.	106	1,060	2.58	2,434	109,315	1,030
	11.	106	1,071	2.55	2,381	109,769	1,034
14	1.	104	1,050	2.63	2,502	116,119	1,116
	2.	102	1,020	2.51	2,460	108,862	1,067
	3.	103	1,061	2.59	2,441	109,769	1,065
	4.	102	1,030	2.57	2,498	117,026	1,147
	5.	96	979	2.54	2,597	87,996	916
	6.	101	969	2.43	2,512	102,058	1,010
	7.	105	1,061	2.66	2,508	128,366	1,221
28	1.	103	1,061	2.55	2,403	97,975	951
	2.	106	1,071	2.61	2,435	135,624	1,278
	3.	104	1,071	2.49	2,332	108,862	1,046
	4.	98	1,009	2.34	2,322	112,037	1,131
	5.	102	1,060	2.50	2,359	116,119	1,138
	6.	98	1,009	2.48	2,462	110,676	1,118
	7.	101	1,059	2.54	2,396	117,026	1,148
	8.	102	1,050	2.51	2,390	112,490	1,102

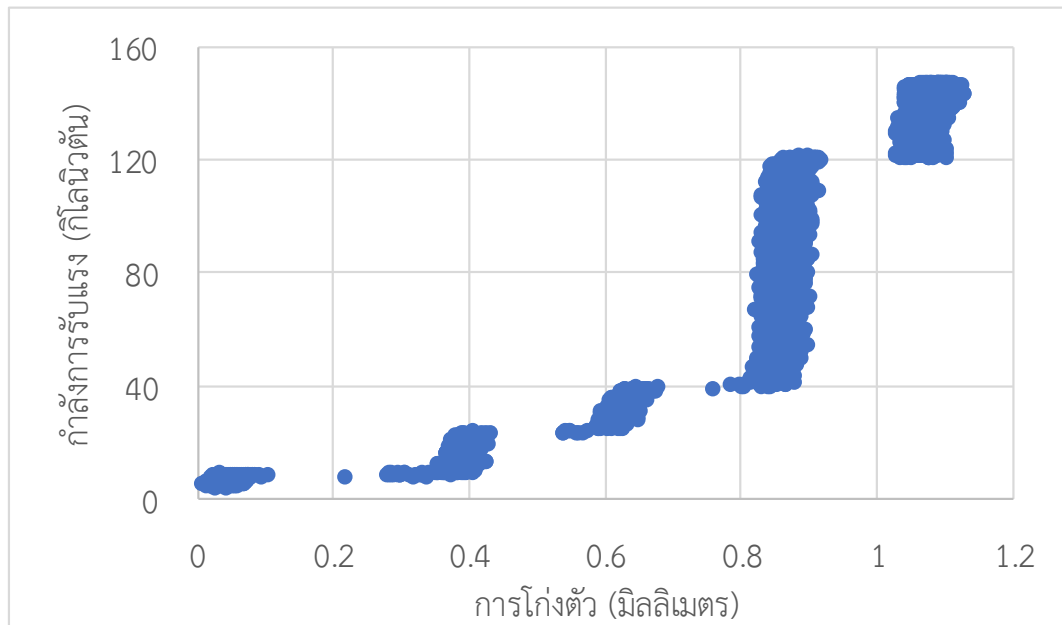
อายุ (วัน)	ลำดับ	พื้นที่ (ตาราง เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ความ หนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์ เมตร)	แรงสูงสุด (กิโลกรัม)	กำลังต้านทาน แรงอัด (กิโลกรัมต่อ ตาราง เซนติเมตร)
	9.	103	1,061	2.47	2,332	123,377	1,197
	10.	105	1,029	2.53	2,458	128,820	1,226
	11.	102	999	2.51	2,520	109,769	1,076

ภาคผนวก ง
ผลการทดสอบการไหลของคอนกรีตสมรรถนะสูง

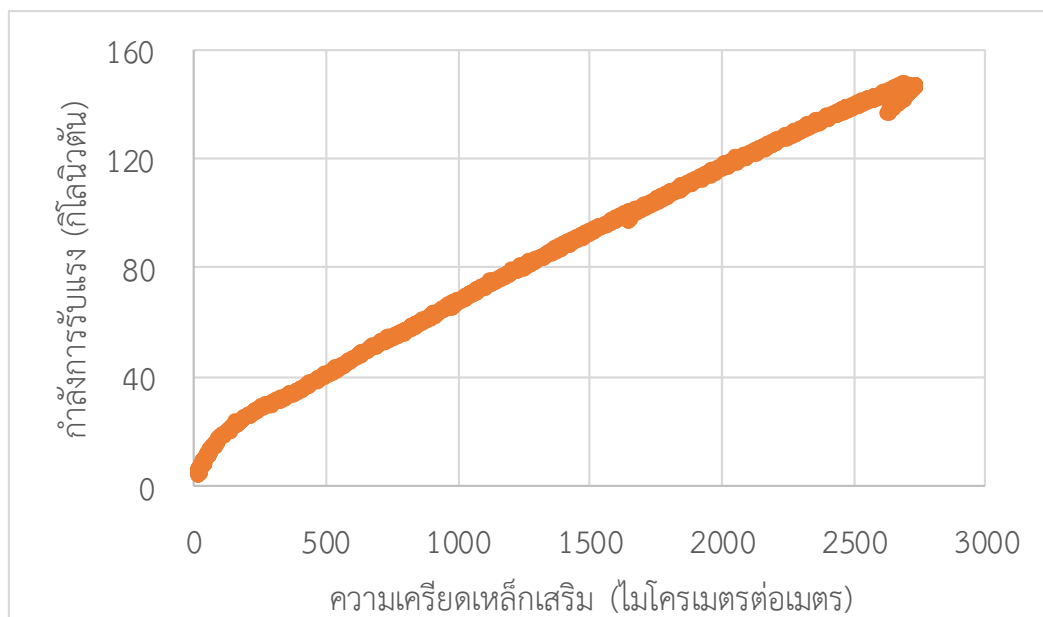
ลำดับ	ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลางการไหล (มิลลิเมตร)
1.	B-0D-00	-
2.	B-3D-50	1,030
3.	B-3D-75	1,000
4.	B-3D-100	1,000
5.	B-6D-50	880
6.	B-6D-75	880
7.	B-6D-100	900
8.	B-9D-50	900
9.	B-9D-75	920
10.	B-9D-100	920

ภาคผนวก จ

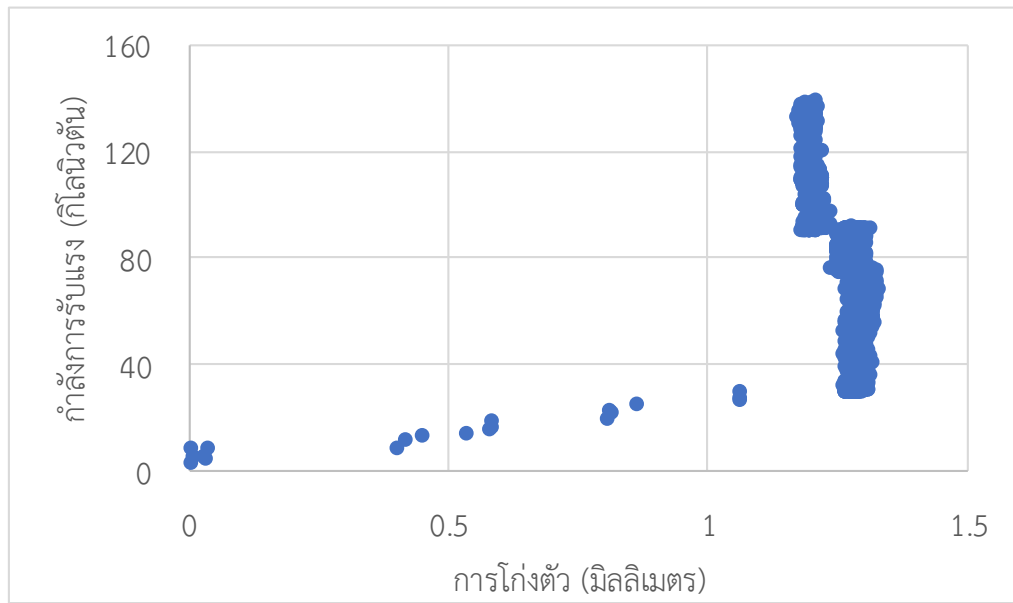
แสดงผลการทดสอบการรับแรง การโก่งตัว และความเครียดของเหล็กเสริมในคาน



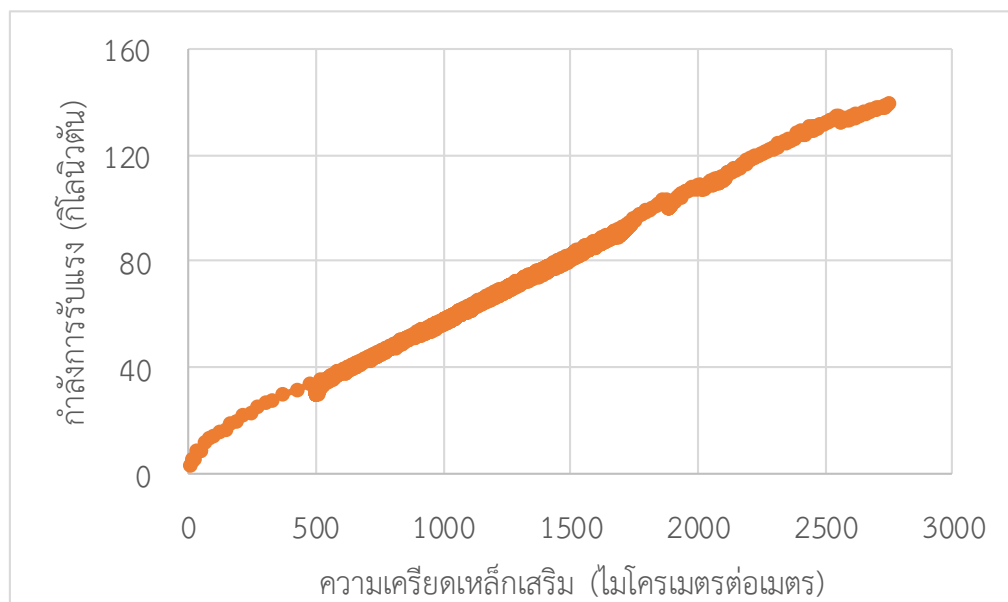
รูปที่ จ.1 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-0D-00-1



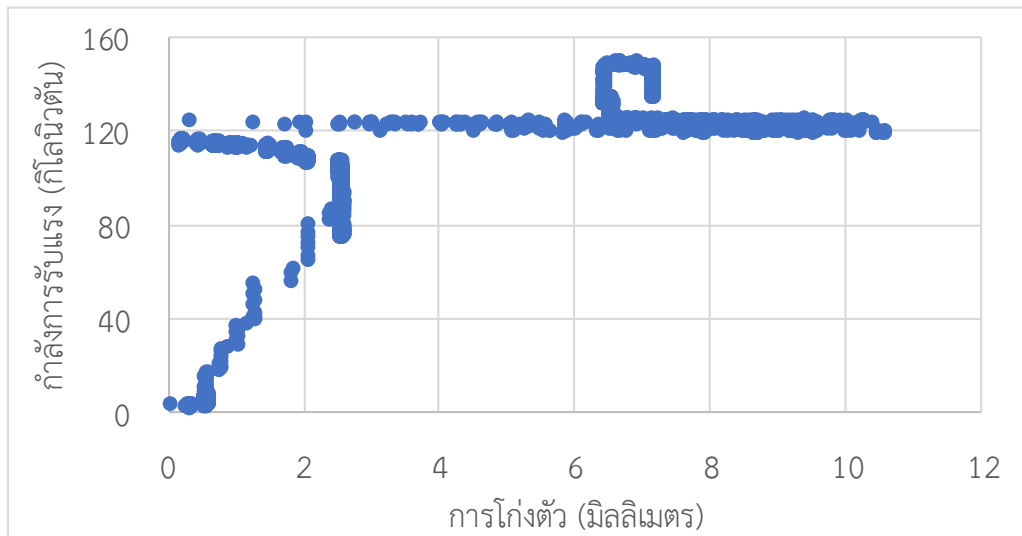
รูปที่ จ.2 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-0D-00-1



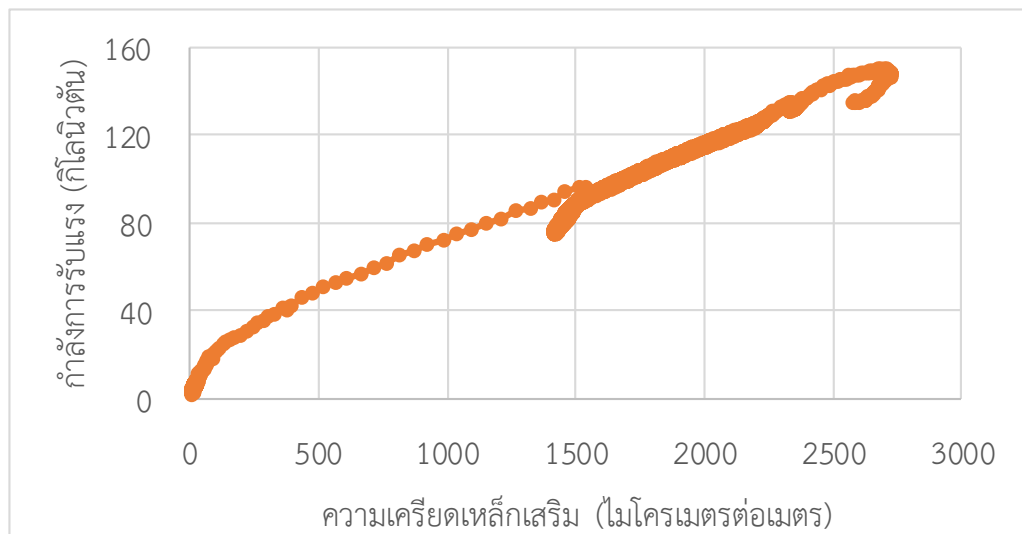
รูปที่ จ.3 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-0D-00-2



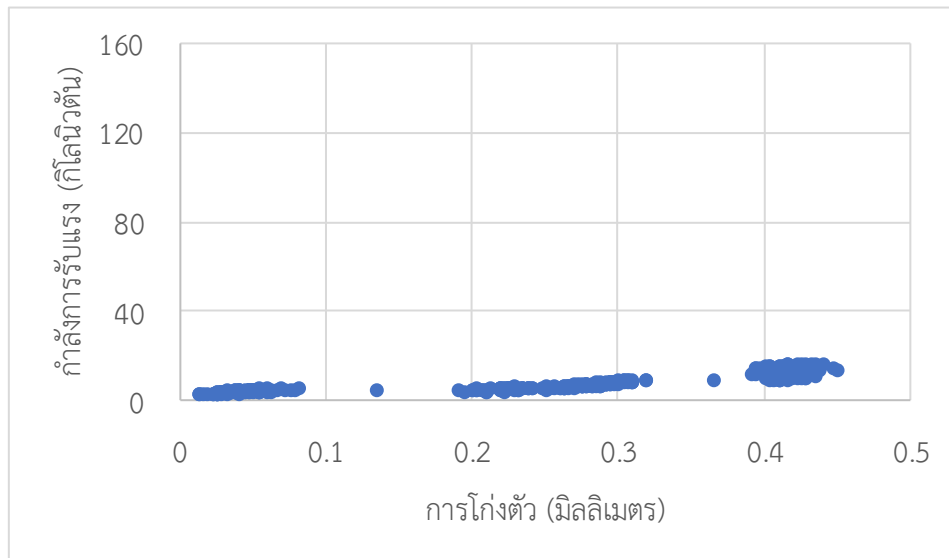
รูปที่ จ.4 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-0D-00-2



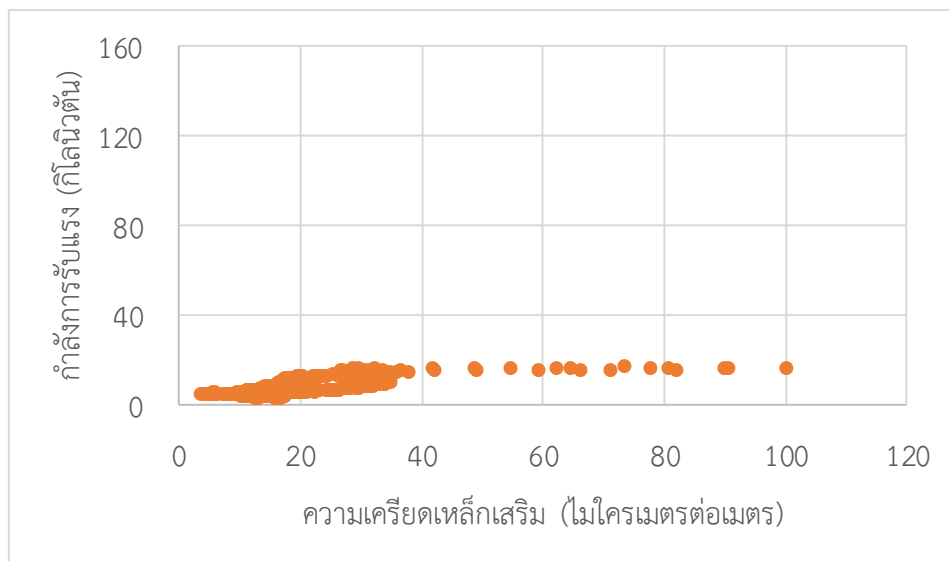
รูปที่ จ.5 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-0D-00-3



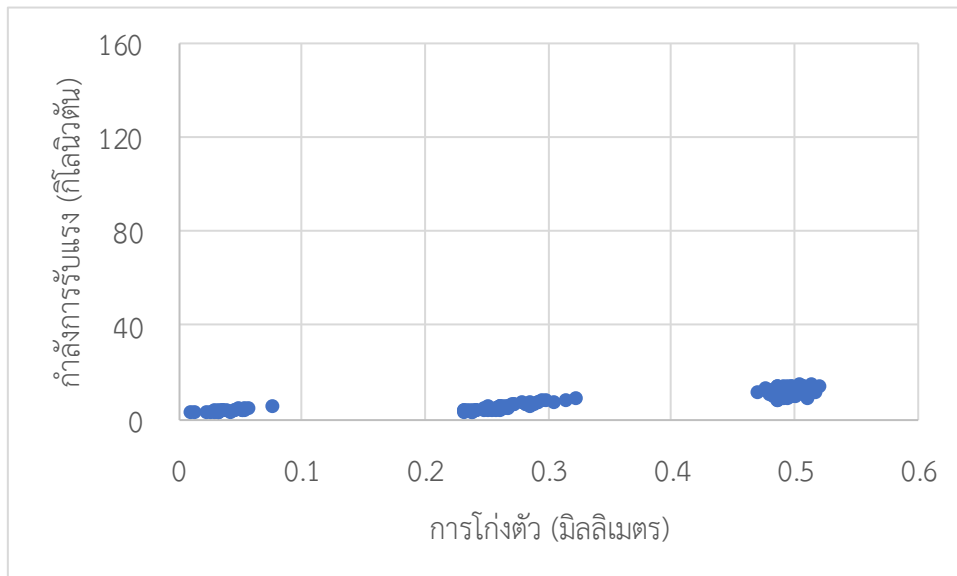
รูปที่ จ.6 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-0D-00-3



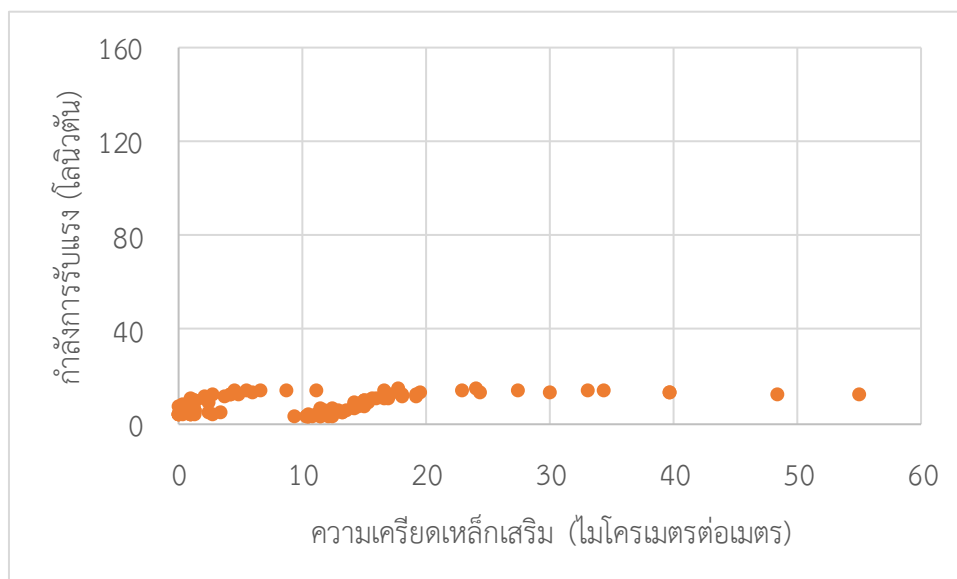
รูปที่ จ.7 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-3D-50-1



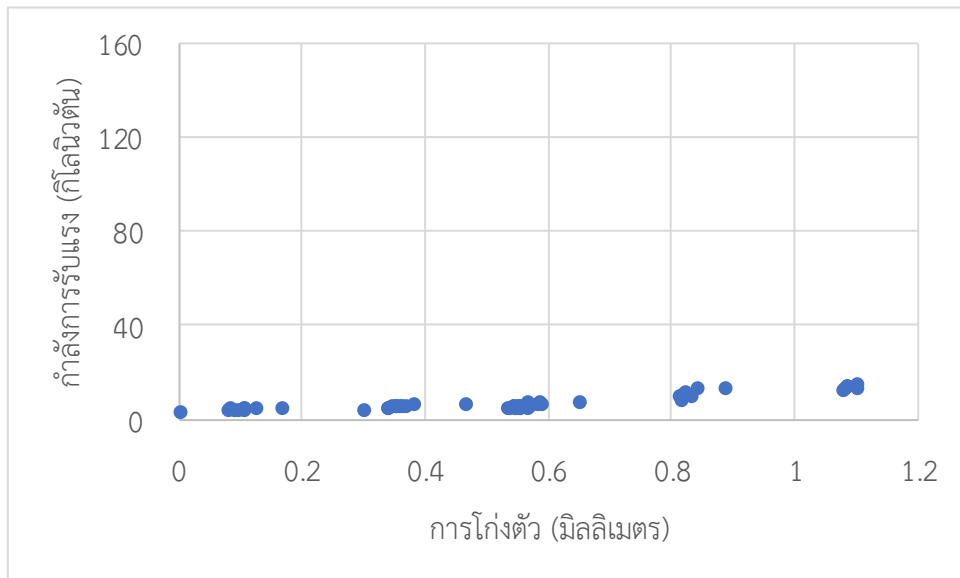
รูปที่ จ.8 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-3D-50-1



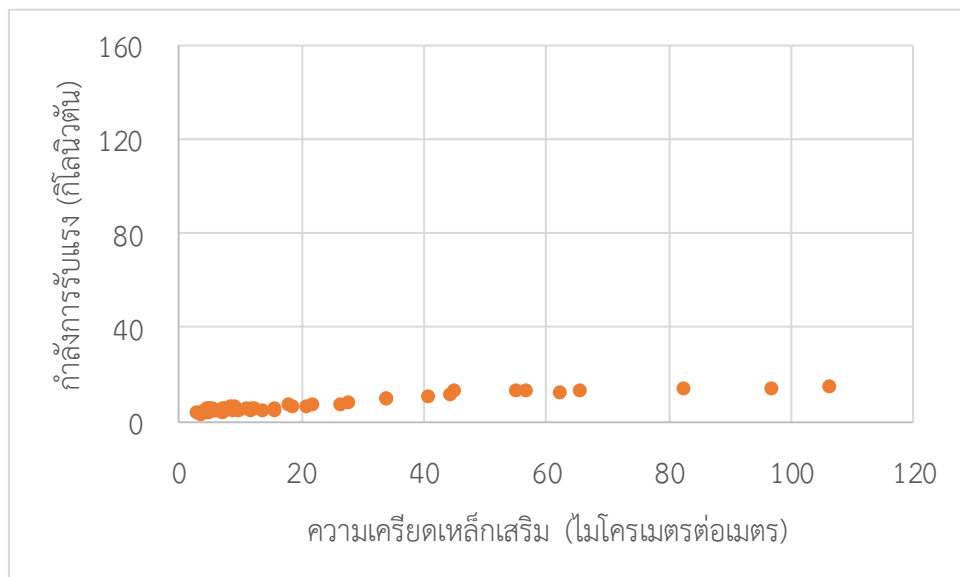
รูปที่ จ.9 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-3D-50-2



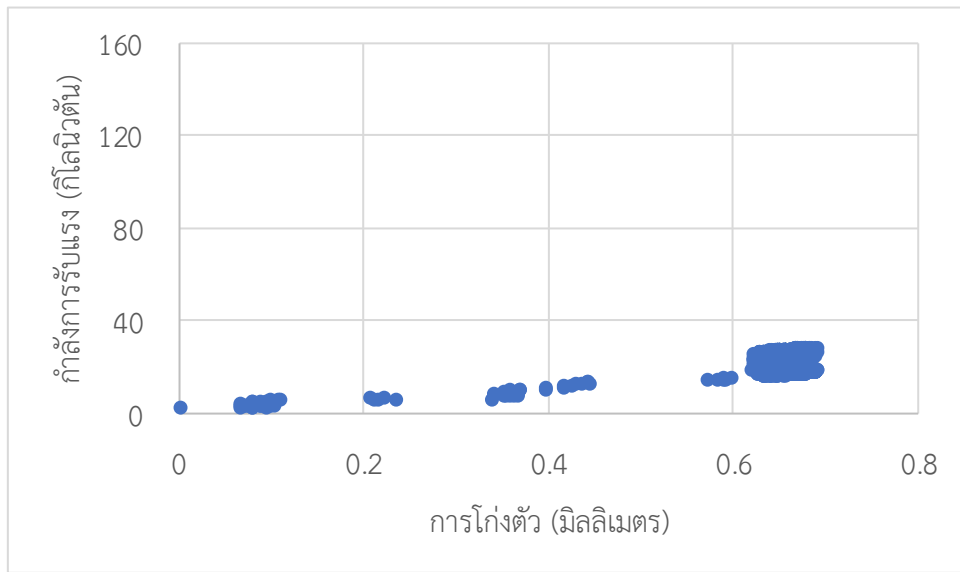
รูปที่ จ.10 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-3D-50-2



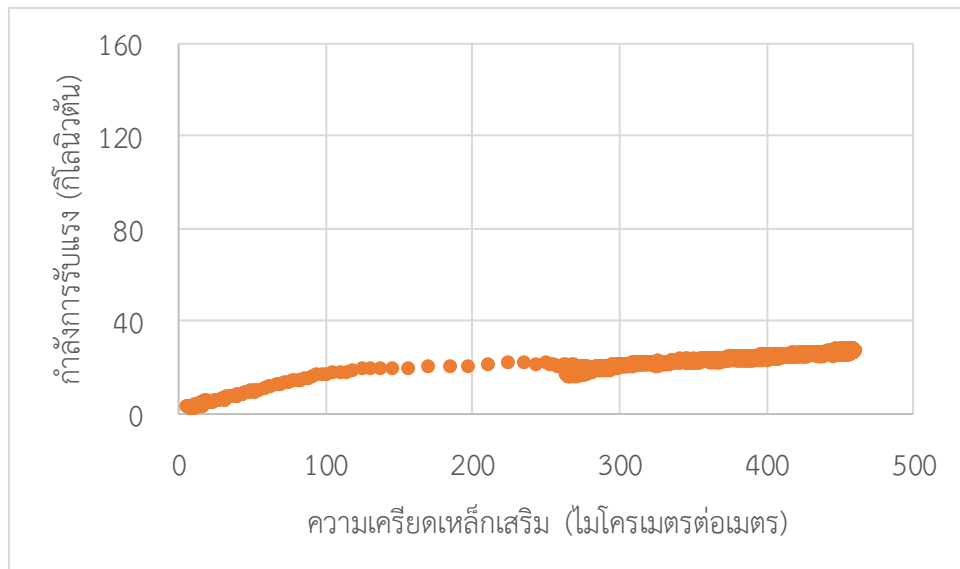
รูปที่ จ.11 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-3D-50-3



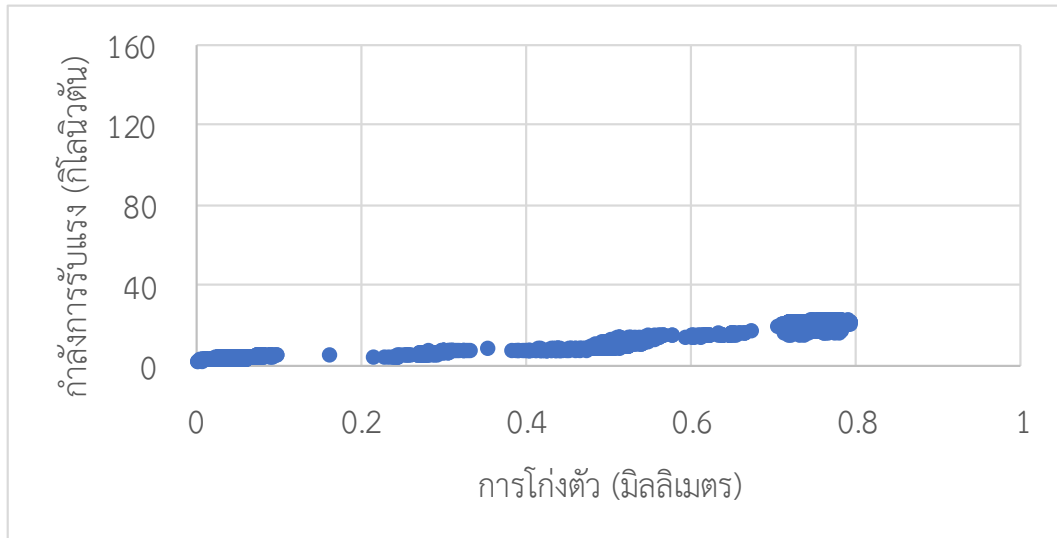
รูปที่ จ.12 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-3D-50-3



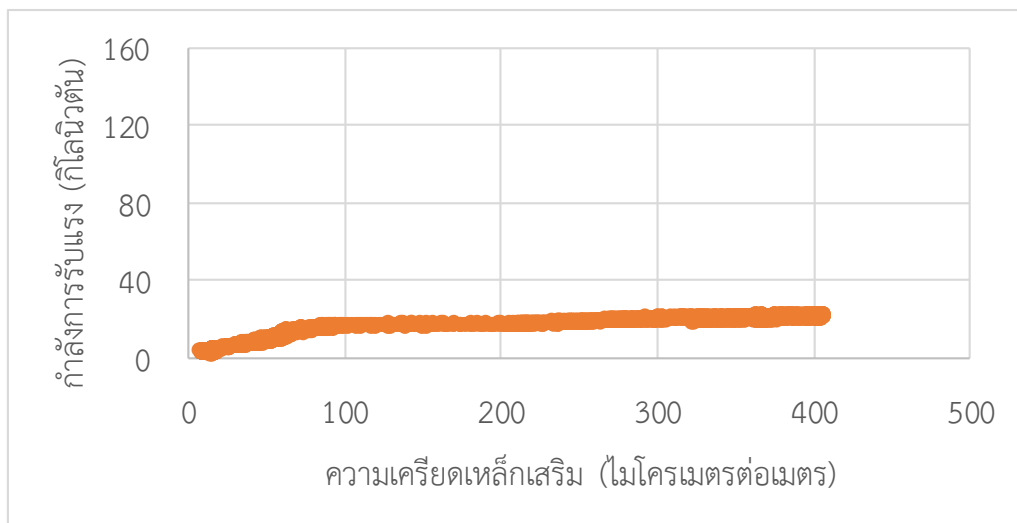
รูปที่ จ.13 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-3D-75-1



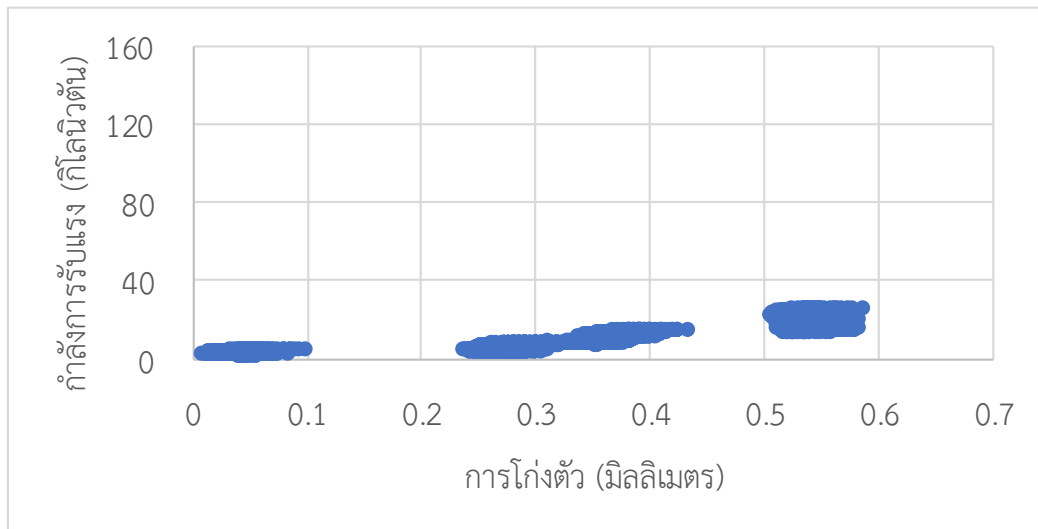
รูปที่ จ.14 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-3D-75-1



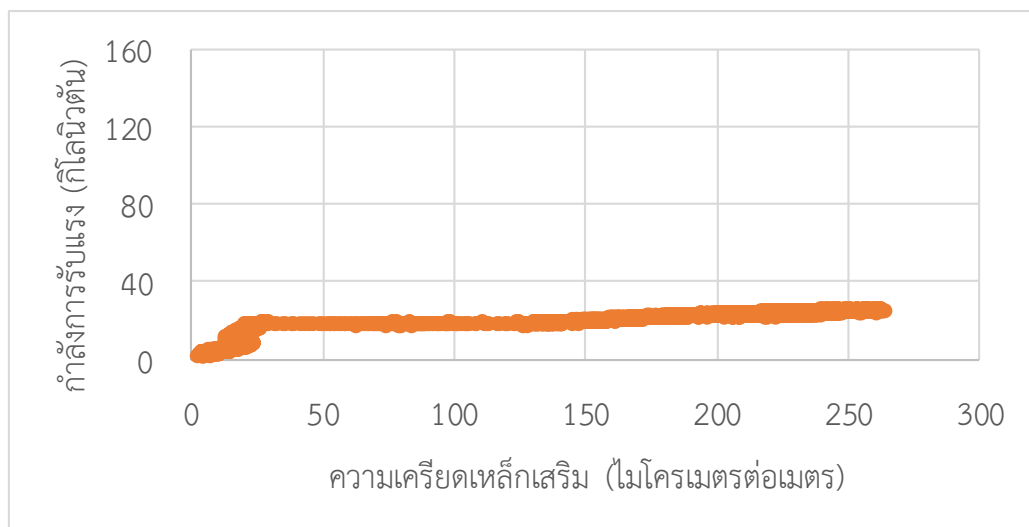
รูปที่ จ.15 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-3D-75-2



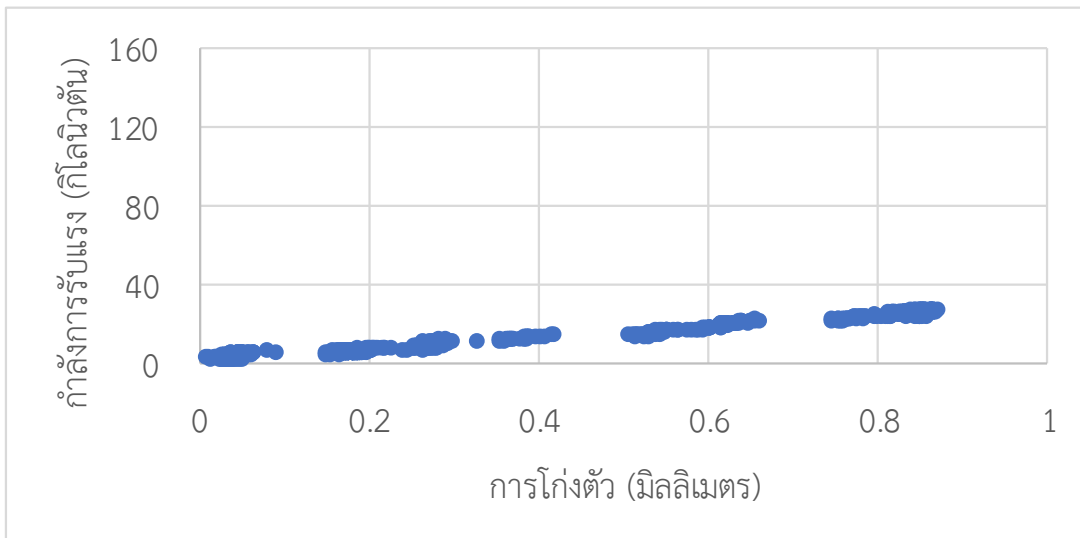
รูปที่ จ.16 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-3D-75-2



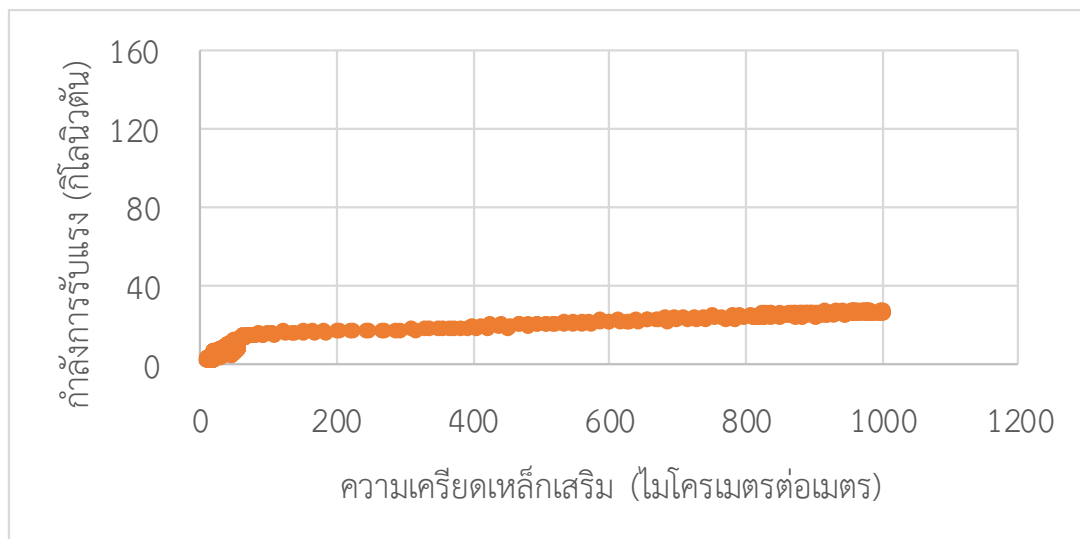
รูปที่ จ.17 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-3D-75-3



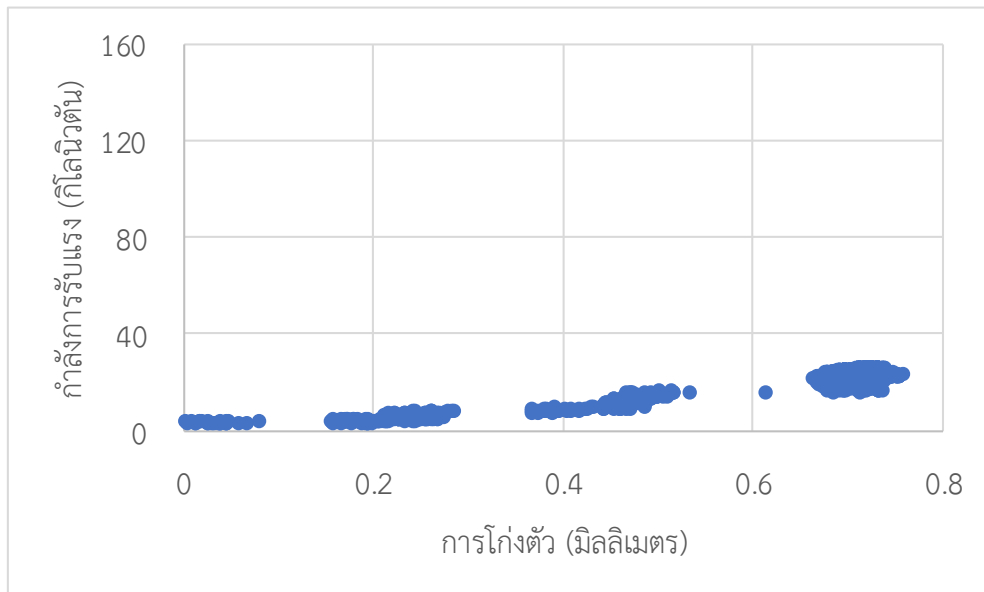
รูปที่ จ.18 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-3D-75-3



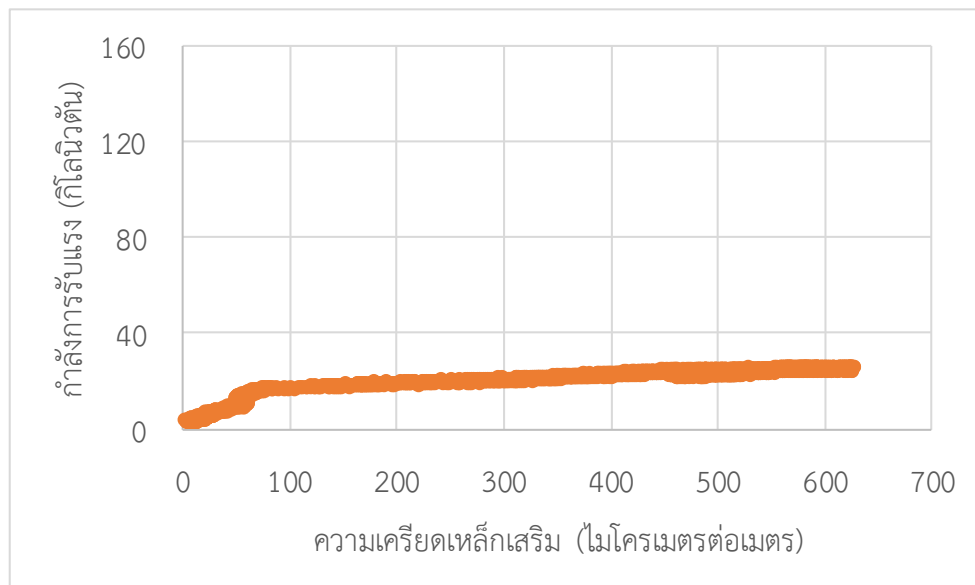
รูปที่ จ.19 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-3D-100-1



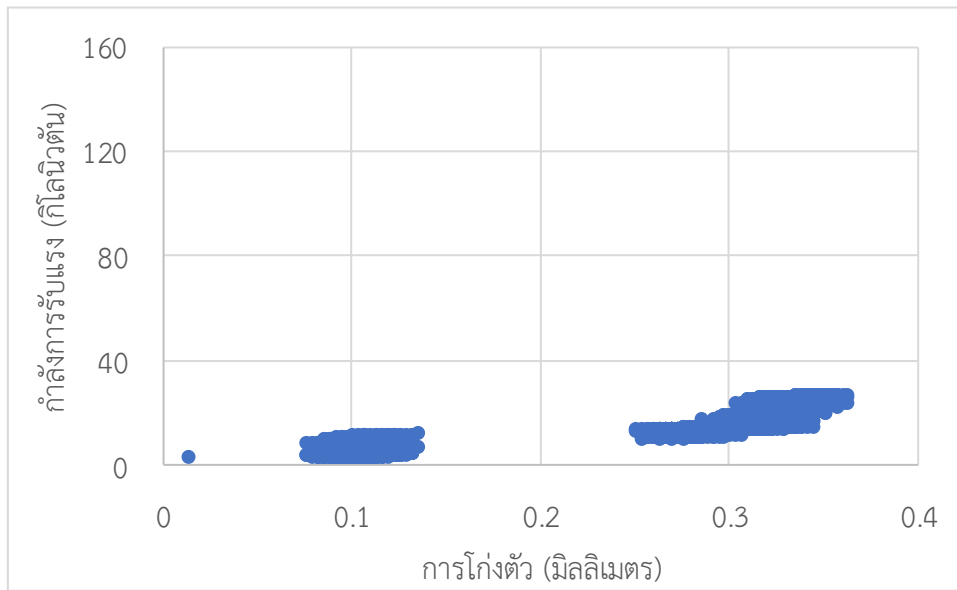
รูปที่ จ.20 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-3D-100-1



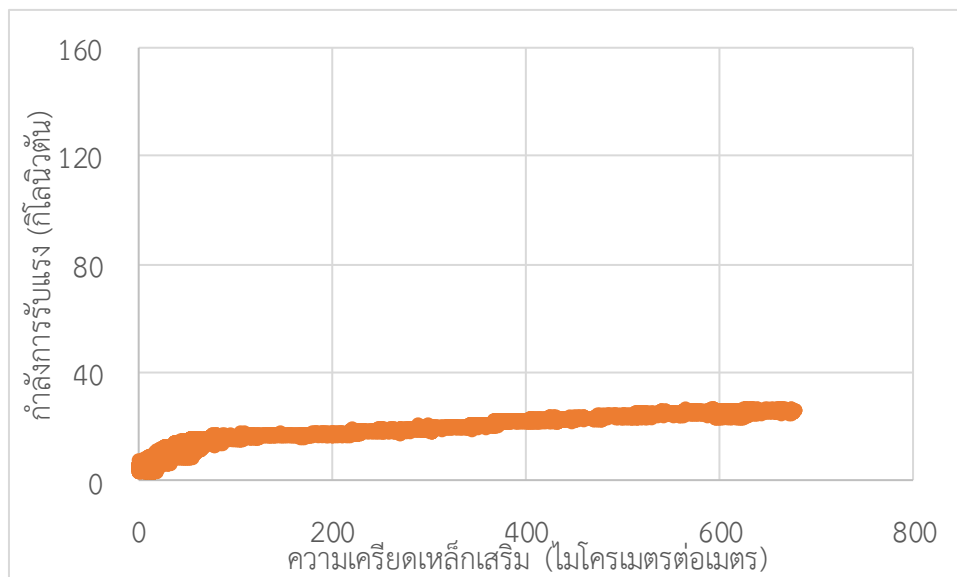
รูปที่ จ.21 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-3D-100-2



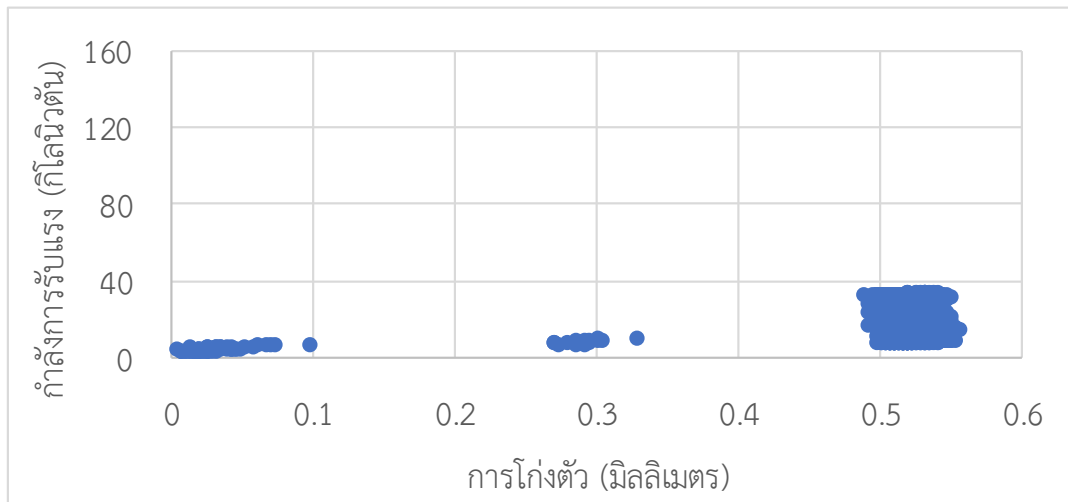
รูปที่ จ.22 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-3D-100-2



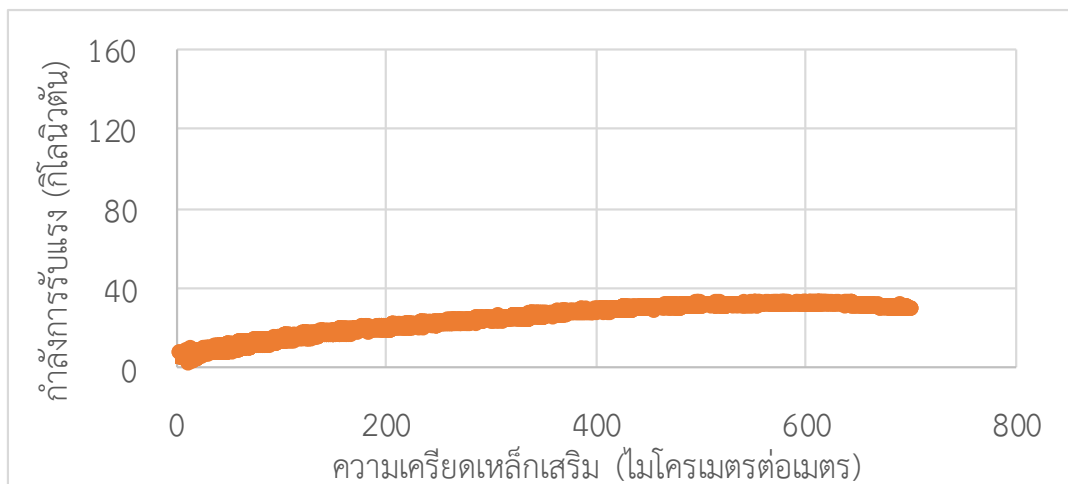
รูปที่ จ.23 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-3D-100-3



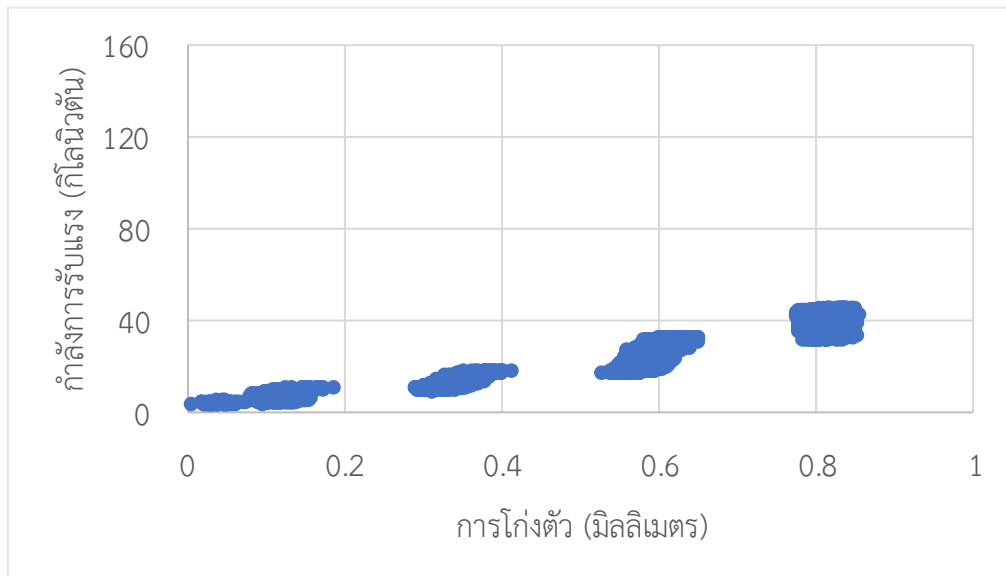
รูปที่ จ.24 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-3D-100-3



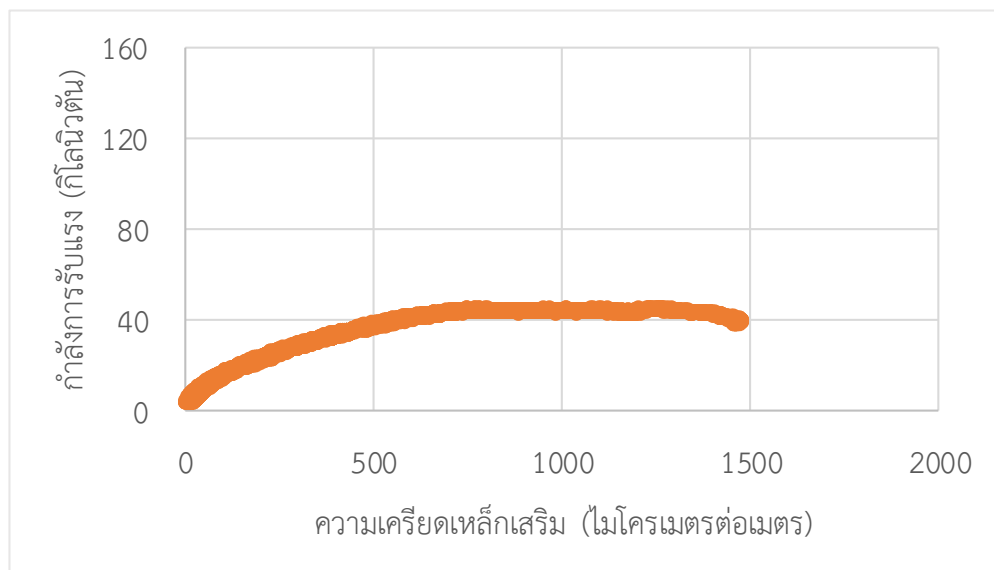
รูปที่ จ.25 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-6D-50-1



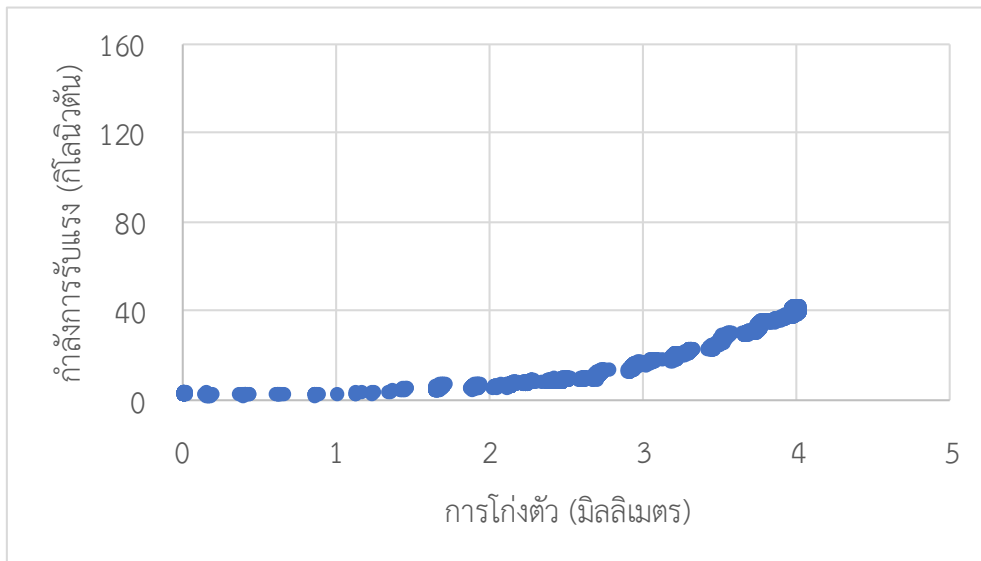
รูปที่ จ.26 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-6D-50-1



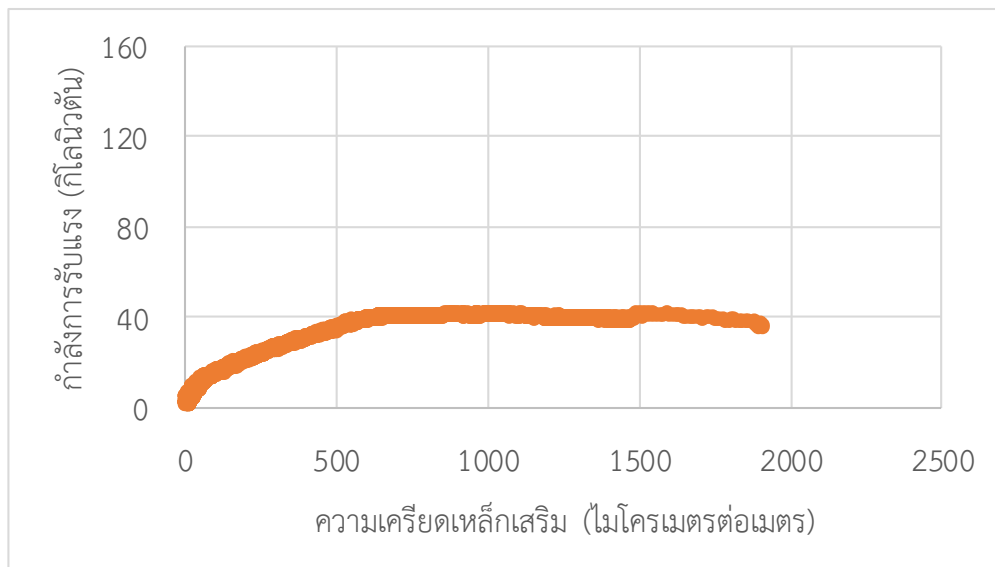
รูปที่ จ.27 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-6D-50-2



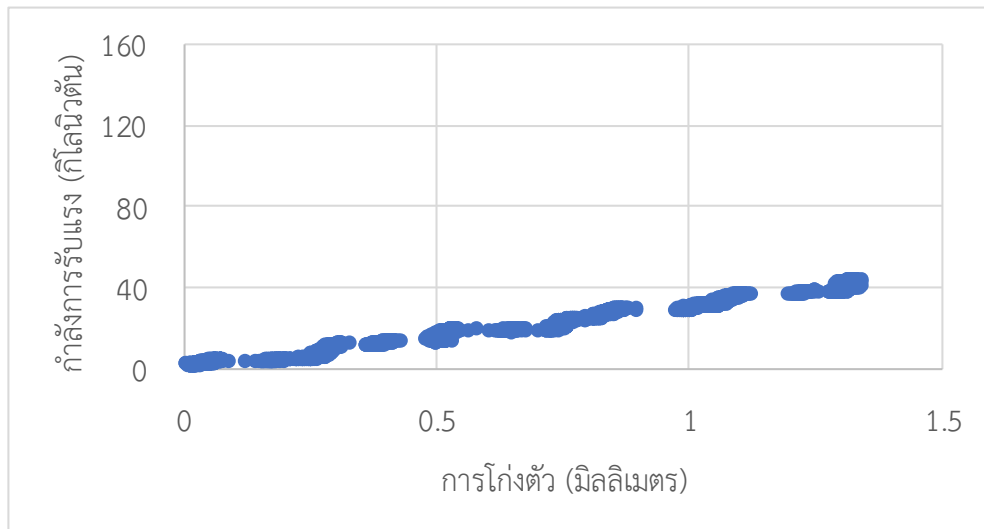
รูปที่ จ.28 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-6D-50-2



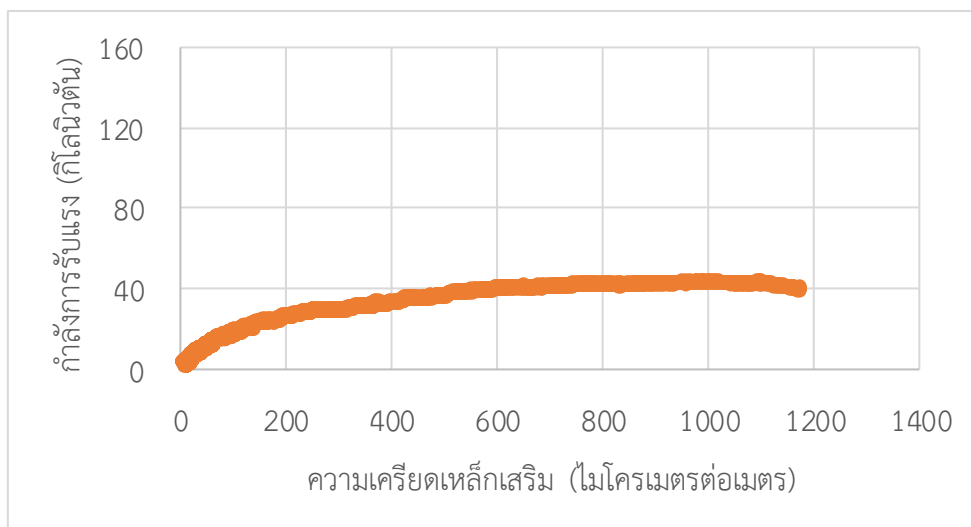
รูปที่ จ.29 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-6D-50-3



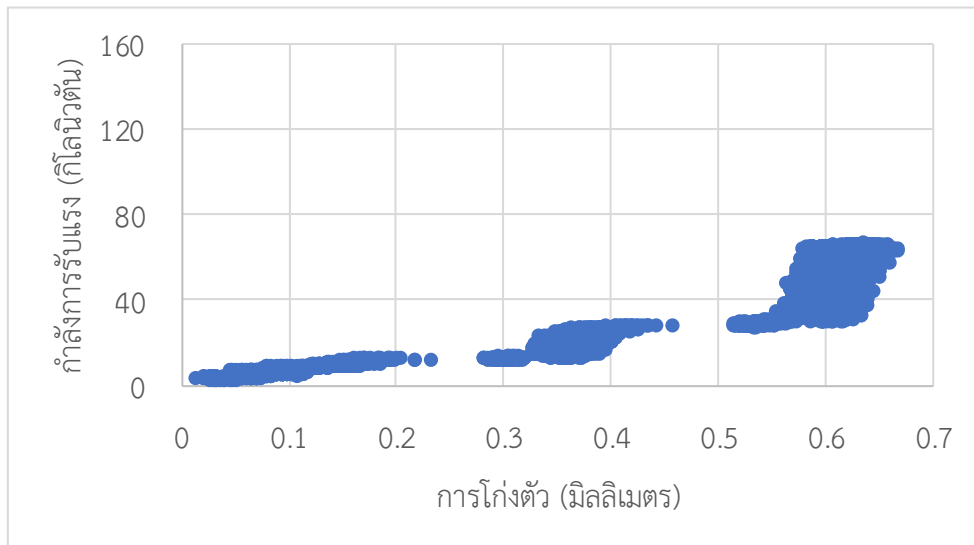
รูปที่ จ.30 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-6D-50-3



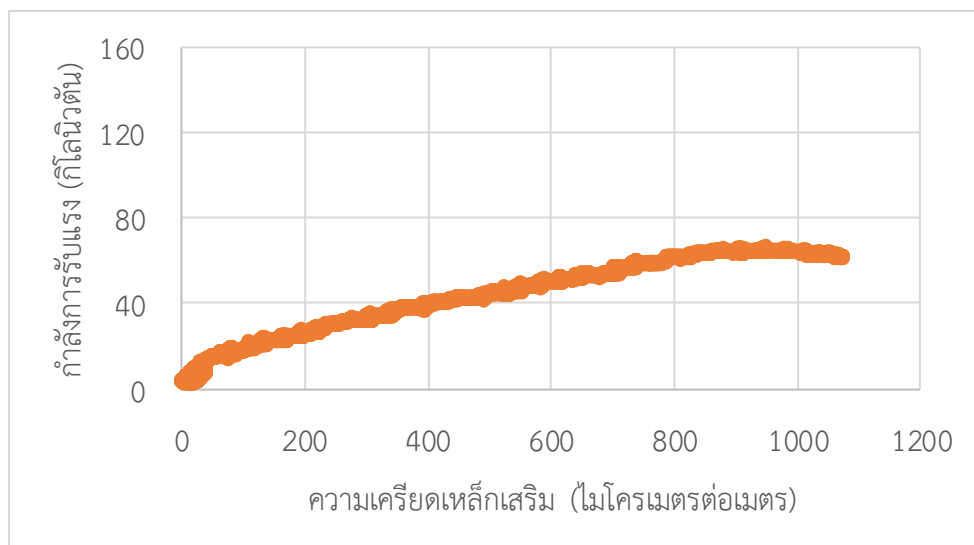
รูปที่ จ.31 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-6D-75-1



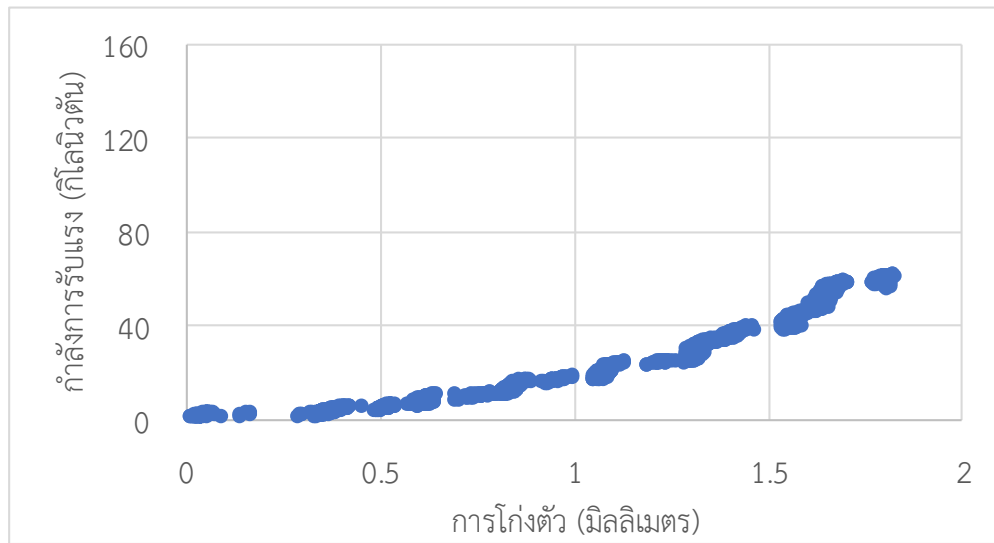
รูปที่ จ.32 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-6D-75-1



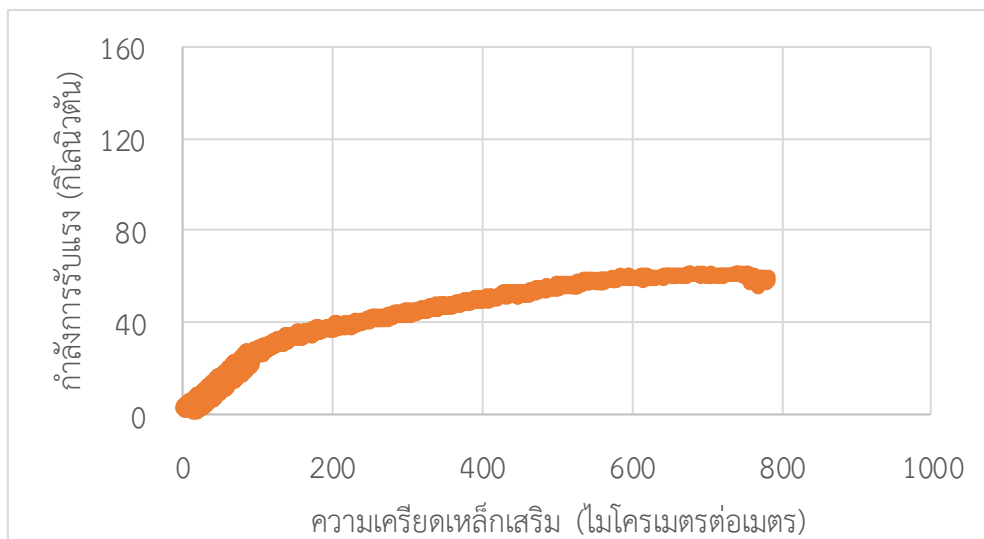
รูปที่ จ.33 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-6D-75-2



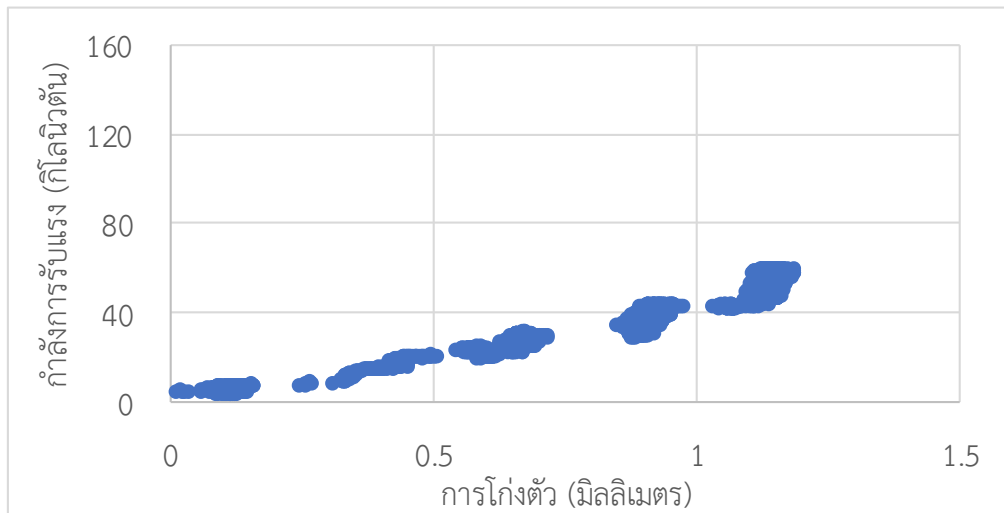
รูปที่ จ.34 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-6D-75-2



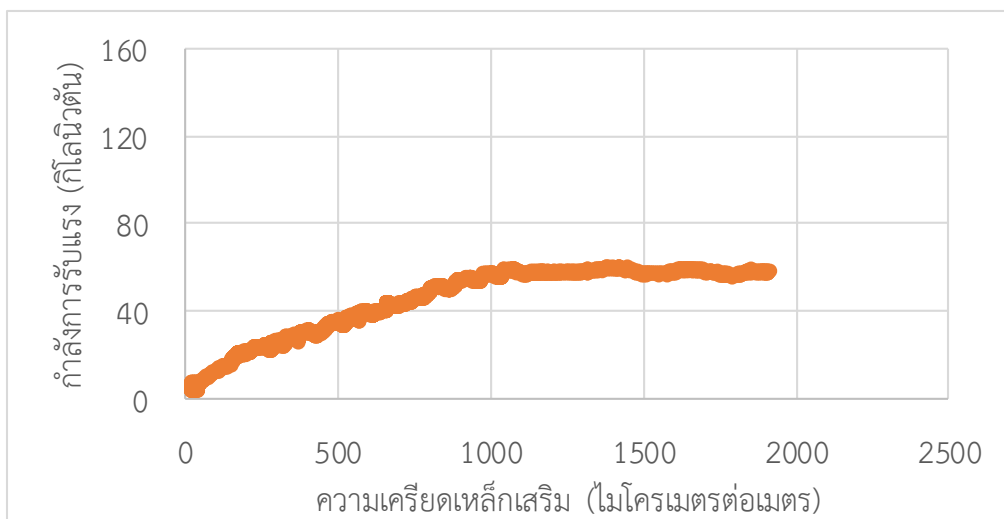
รูปที่ จ.35 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-6D-75-3



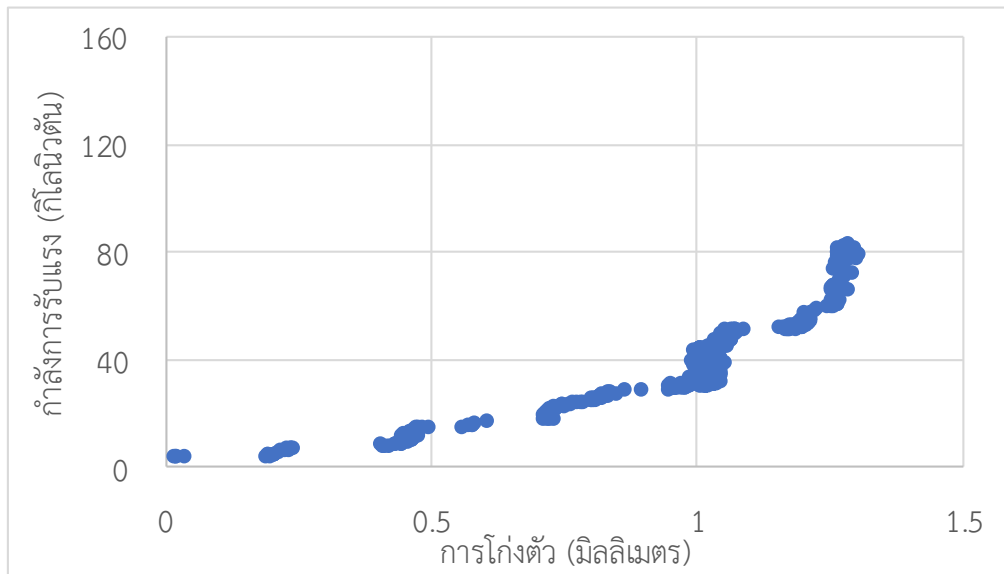
รูปที่ จ.36 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-6D-75-3



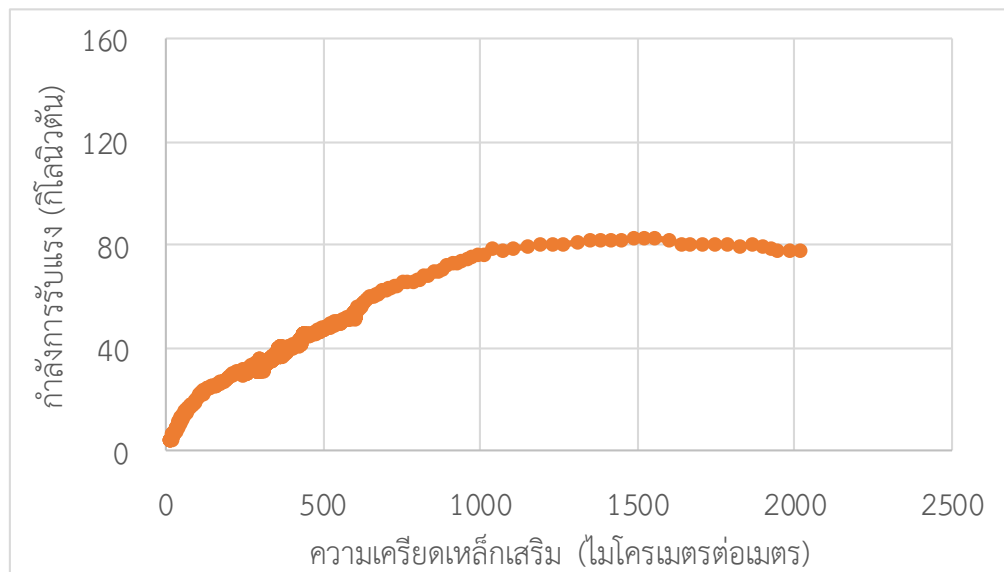
รูปที่ จ.37 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-6D-100-1



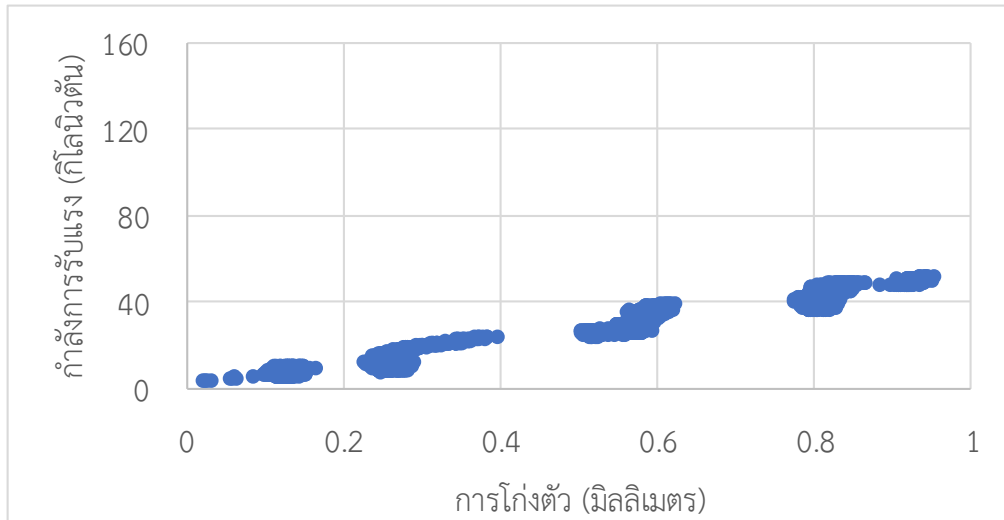
รูปที่ จ.38 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-6D-100-1



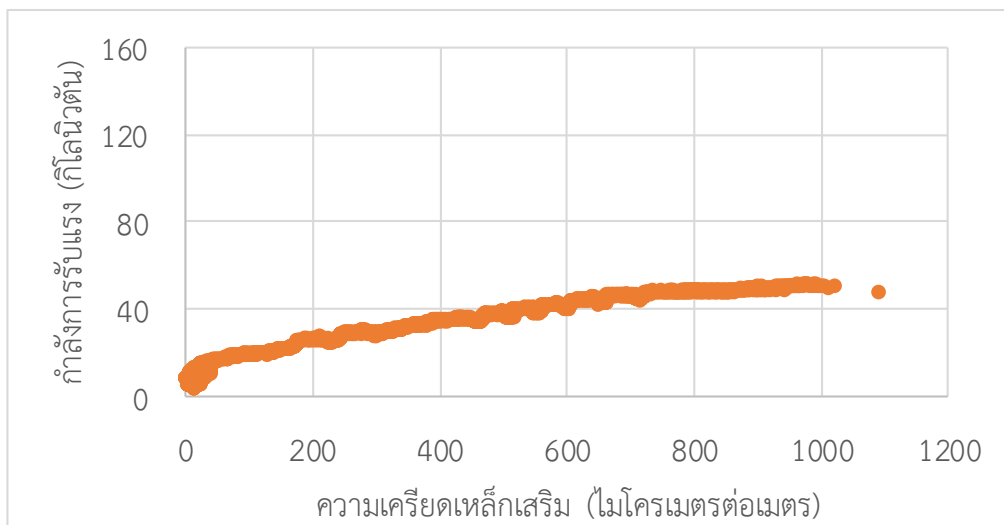
รูปที่ จ.39 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-6D-100-2



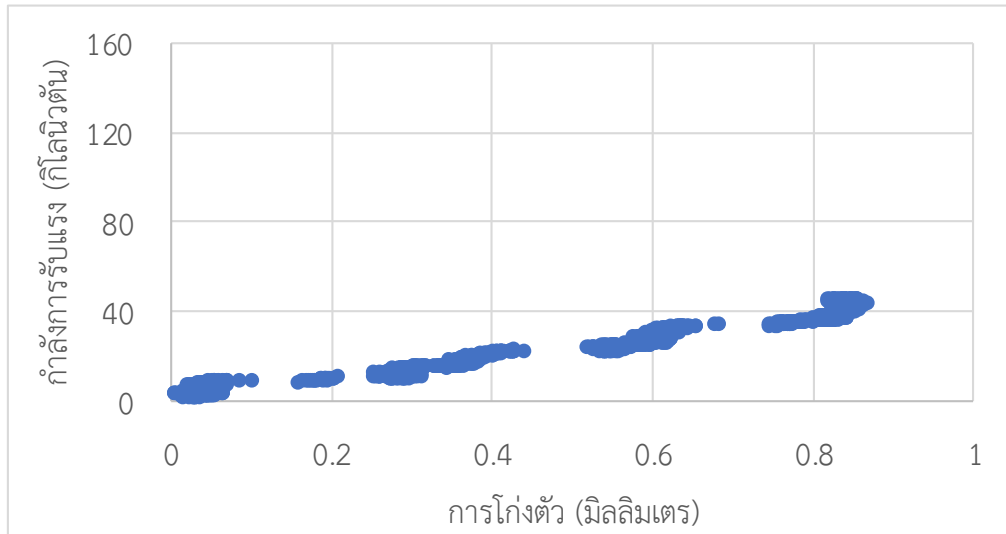
รูปที่ จ.40 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-6D-100-2



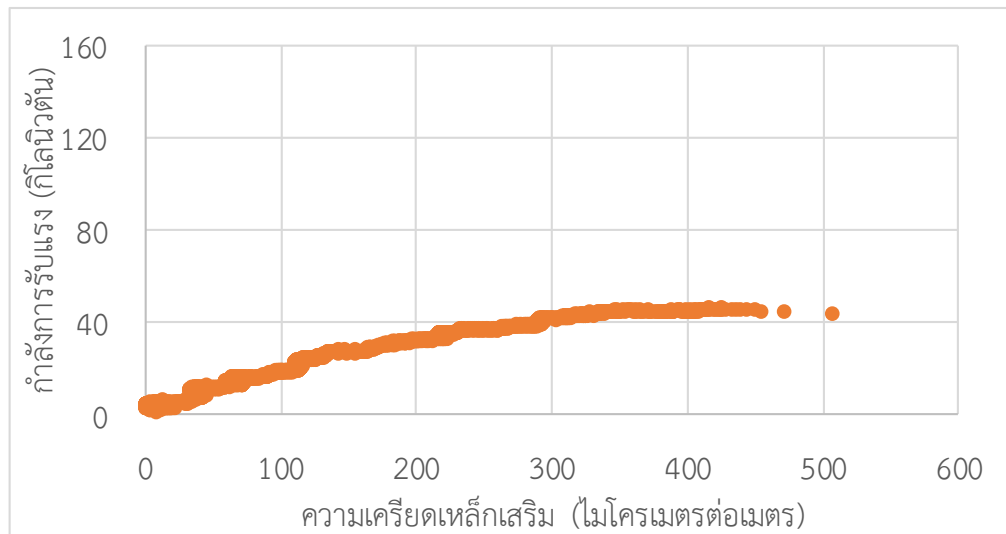
รูปที่ จ.41 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-6D-100-3



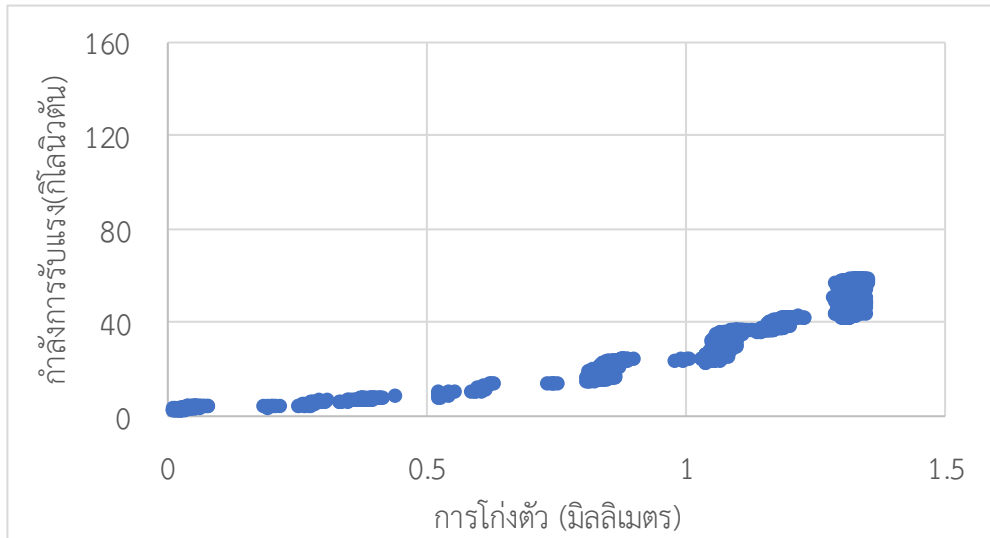
รูปที่ จ.42 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-6D-100-3



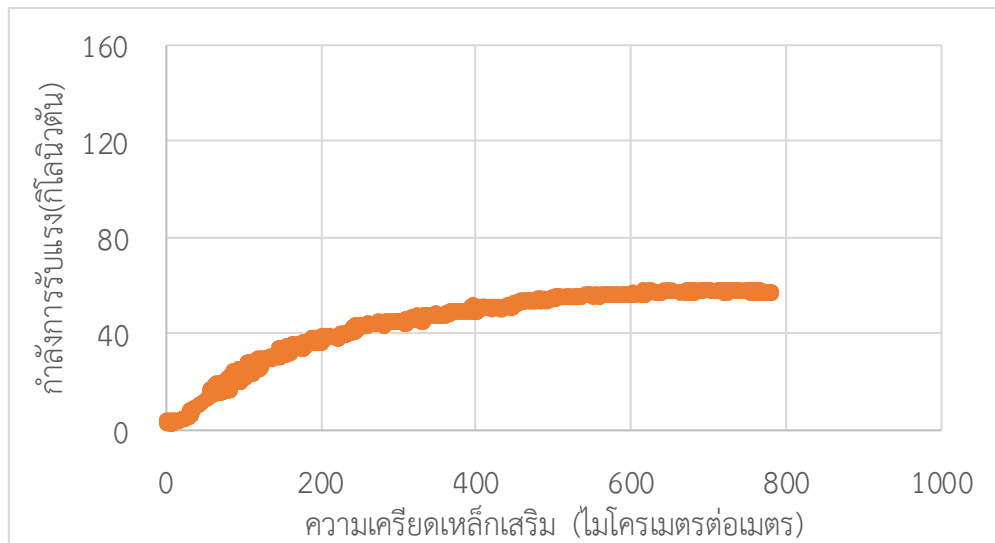
รูปที่ จ.43 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-9D-50-1



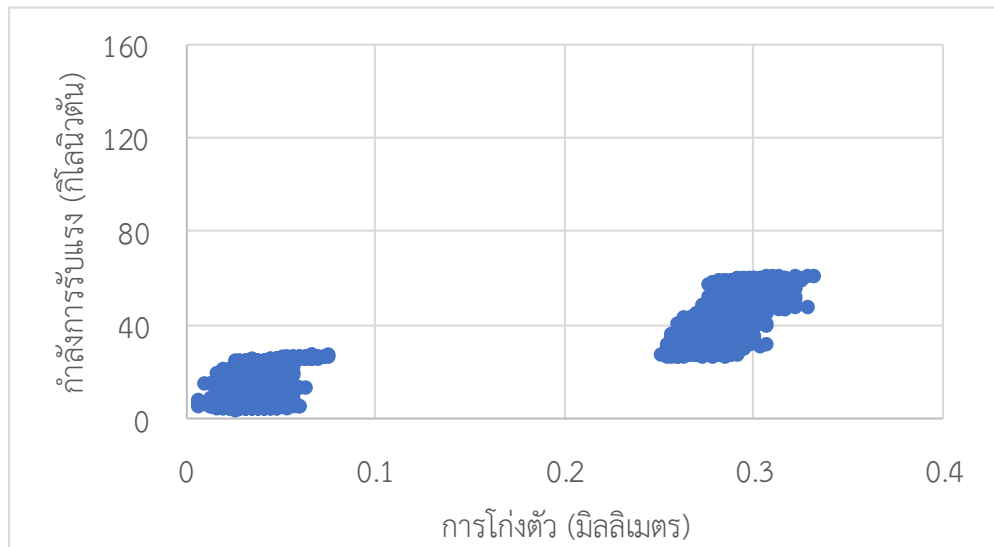
รูปที่ จ.44 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-9D-50-1



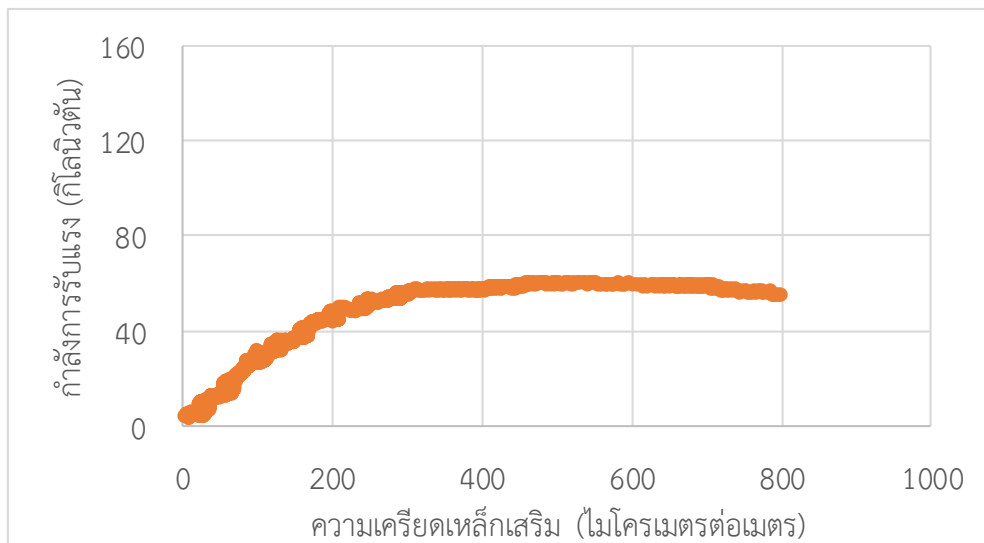
รูปที่ จ.45 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-9D-50-2



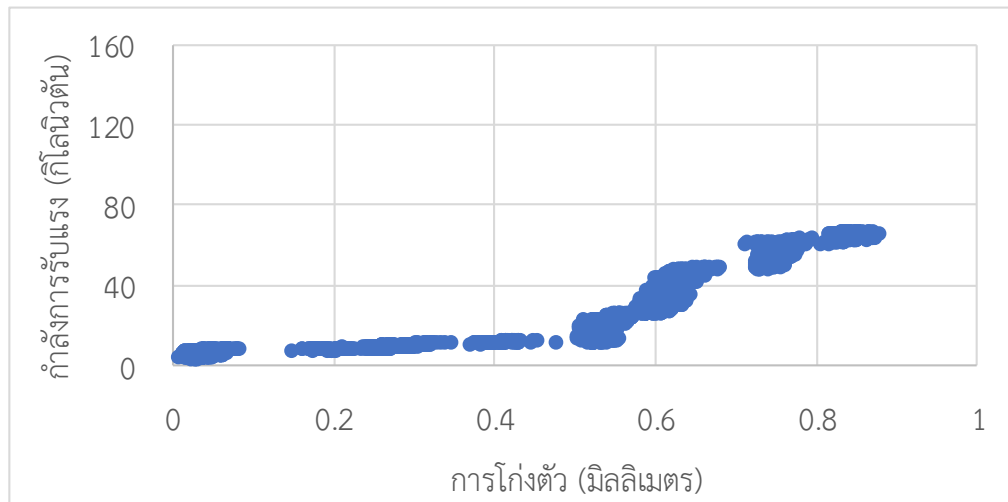
รูปที่ จ.46 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-9D-50-2



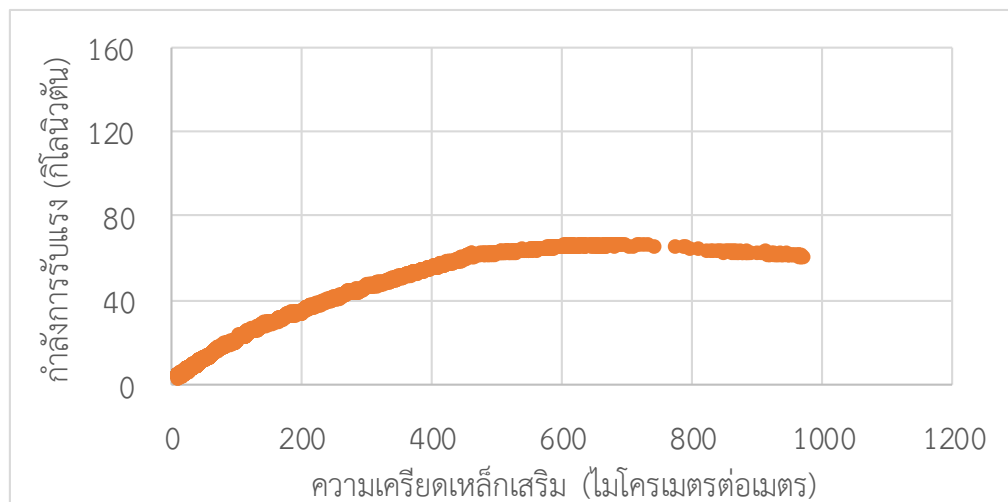
รูปที่ จ.47 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-9D-50-3



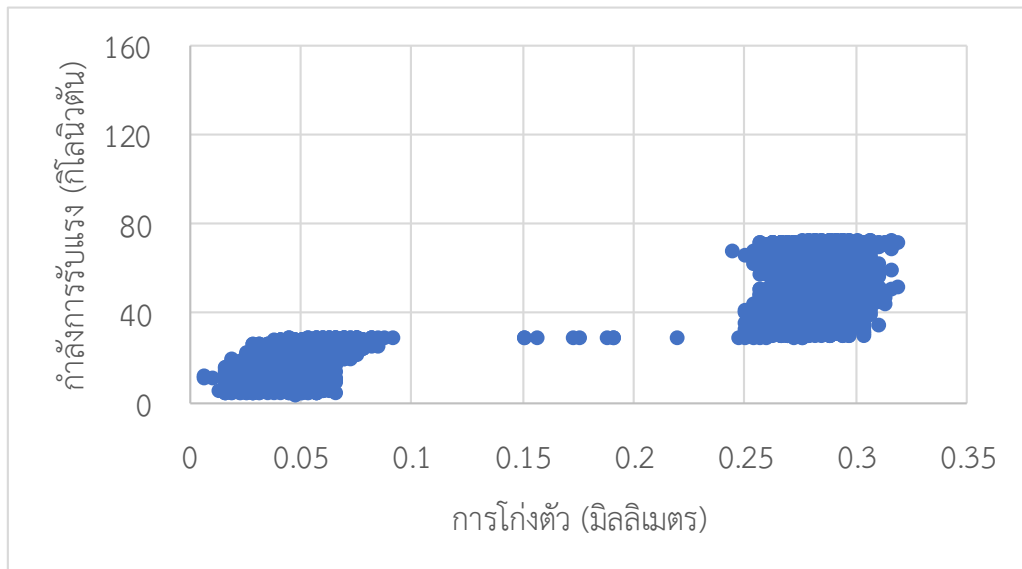
รูปที่ จ.48 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-9D-50-3



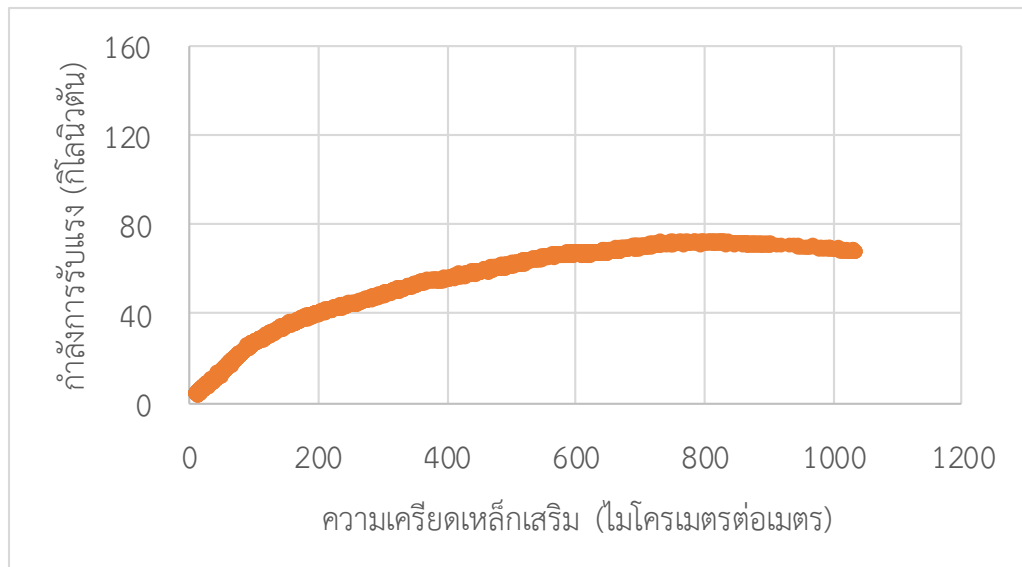
รูปที่ จ.49 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-9D-75-1



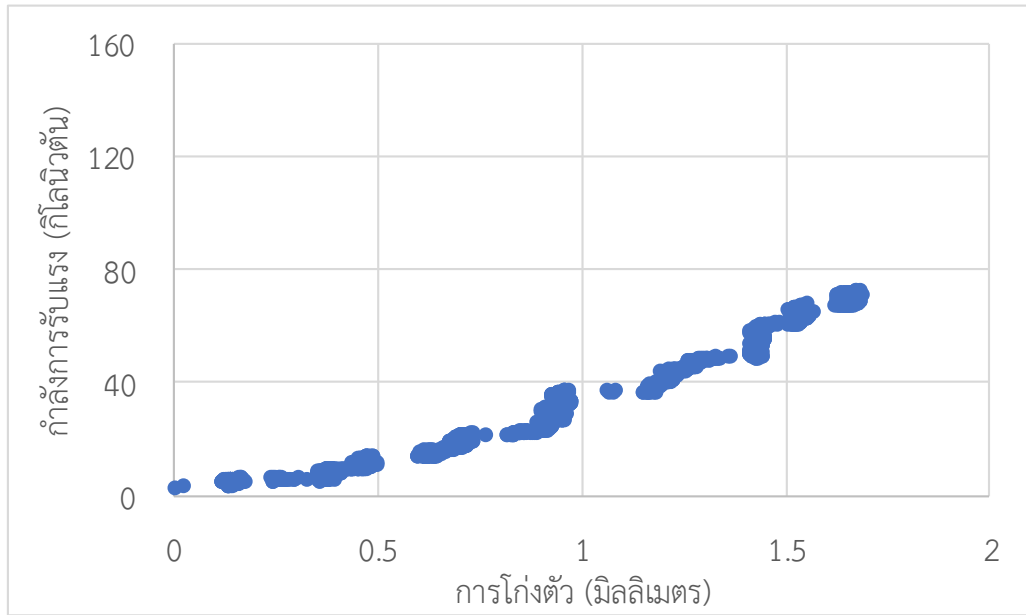
รูปที่ จ.50 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-9D-75-1



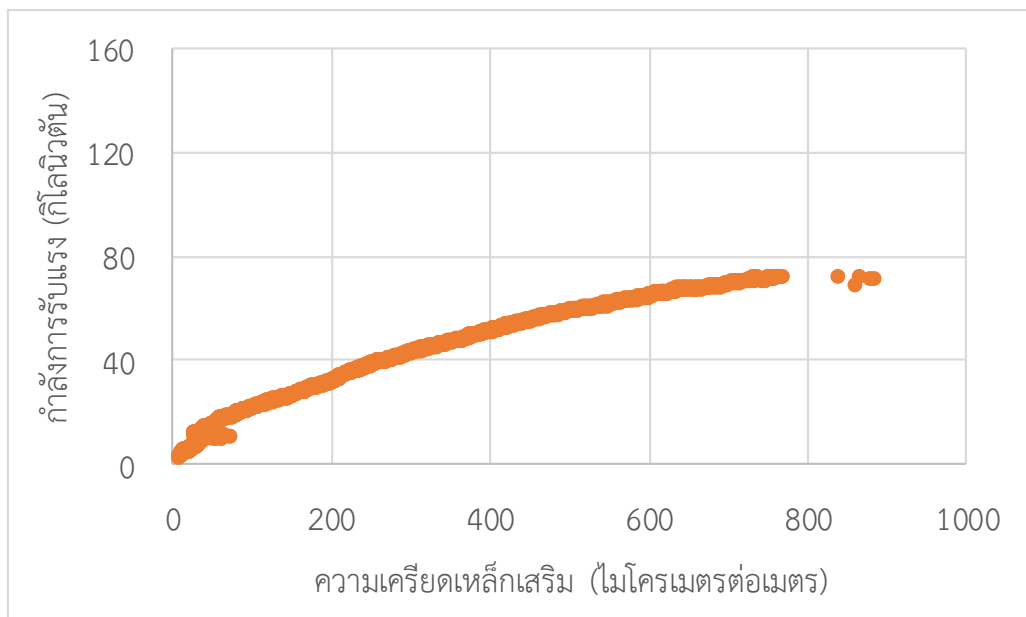
รูปที่ จ.51 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-9D-75-2



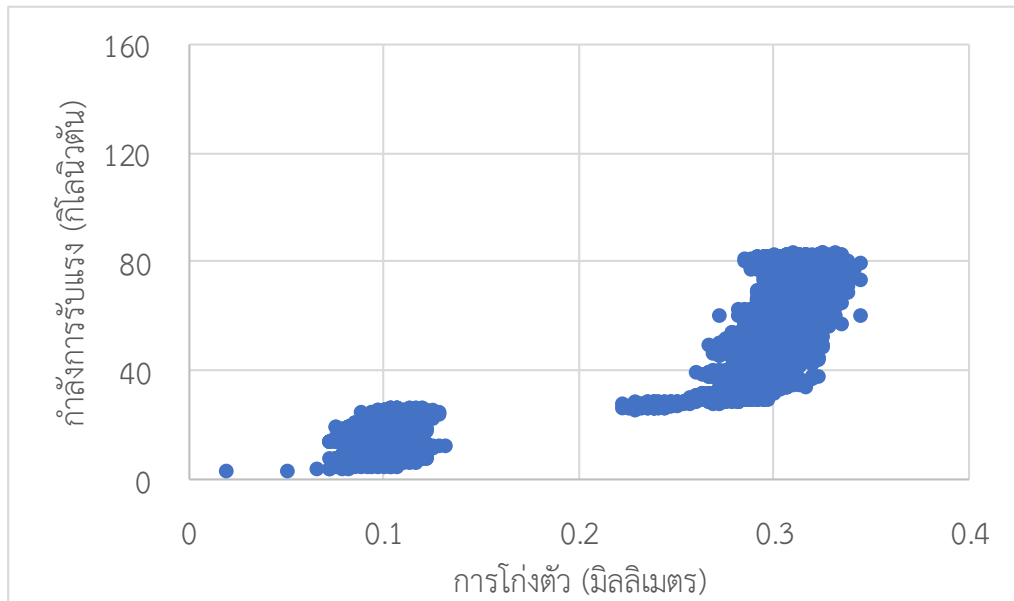
รูปที่ จ.52 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-9D-75-2



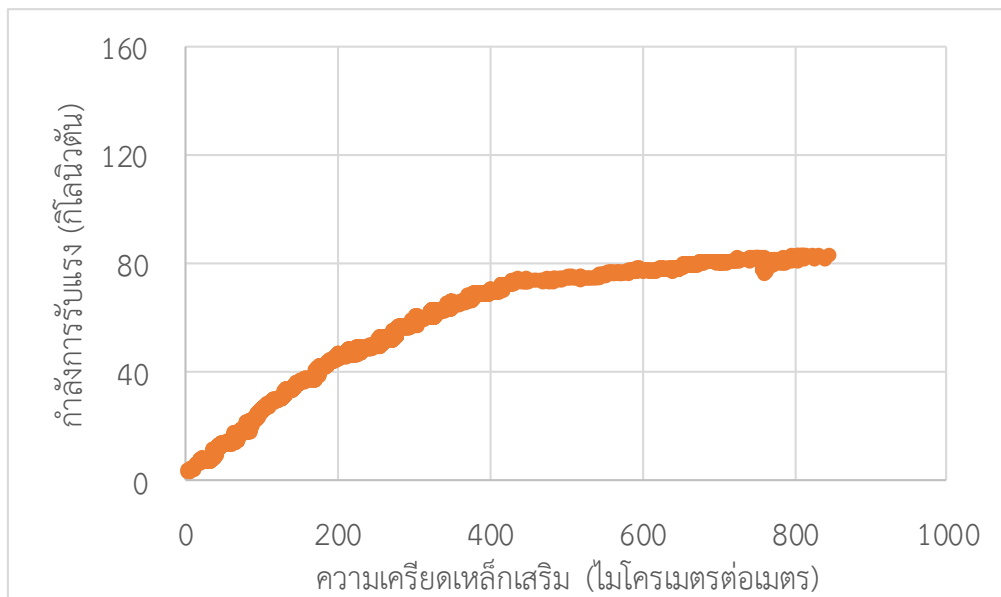
รูปที่ จ.53 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-9D-75-3



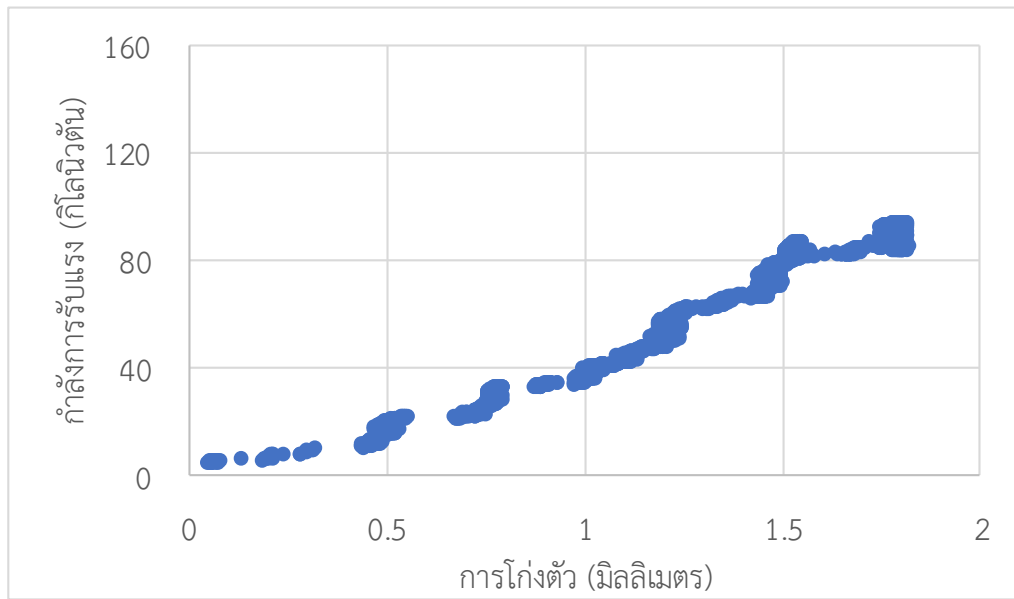
รูปที่ จ.54 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-9D-75-3



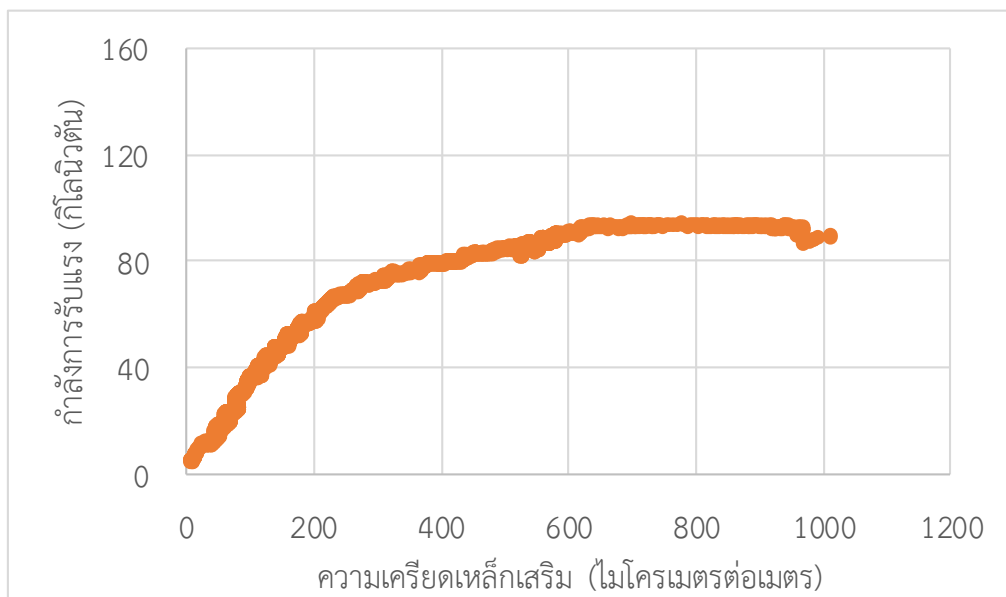
รูปที่ จ.55 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-9D-100-1



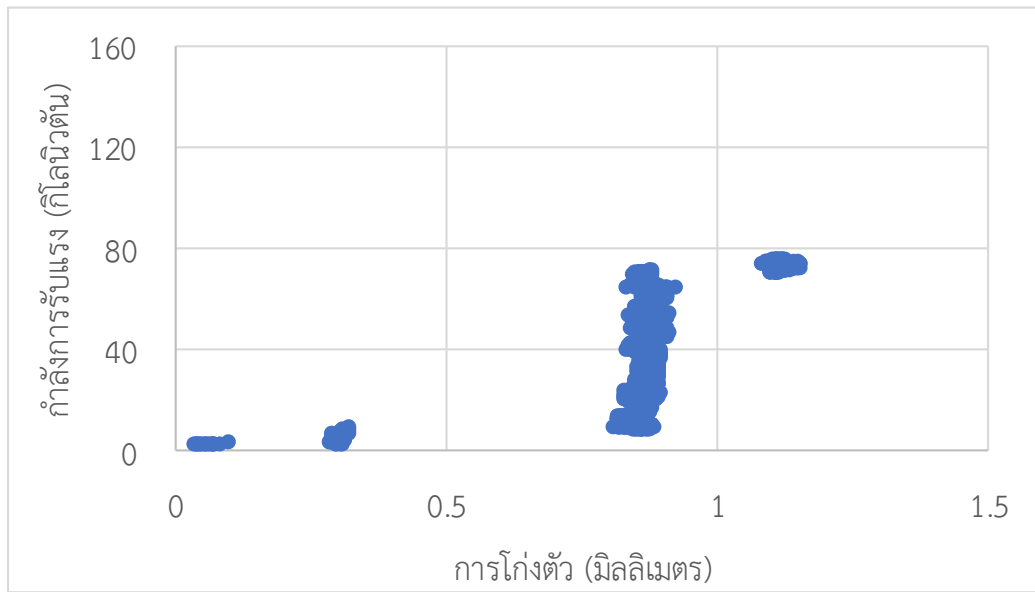
รูปที่ จ.56 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-9D-100-1



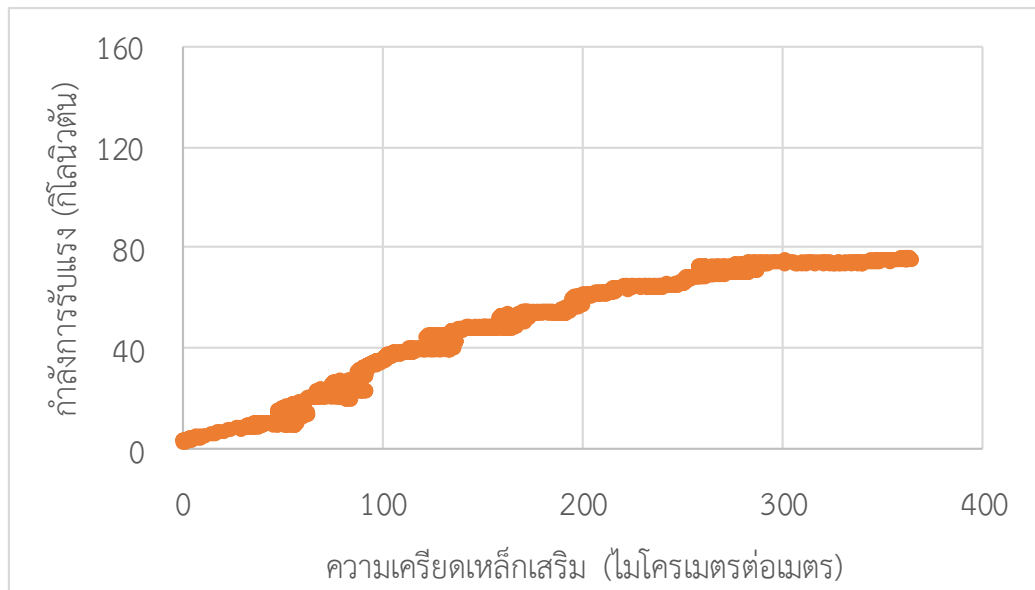
รูปที่ จ.57 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-9D-100-2



รูปที่ จ.58 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-9D-100-2



รูปที่ จ.59 แสดงผลกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-9D-100-3



รูปที่ จ.60 แสดงผลกำลังการรับแรง และความเครียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-9D-100-3

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายนฤสรณ์ ศรีสวัสดิ์
รหัสประจำตัวนักศึกษา 6410120036
วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. (วิศวกรรมโยธา)	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์	2563

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

นฤสรณ์ ศรีสวัสดิ์, ชิตพล เรืองกุล, ณัฐนันท์ โชติพัฒน์กิจ และ วิชัยรัตน์ แก้วเจือ. (2566). พฤติกรรมรอยต่อของคานต่อคานด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 28, ภูเก็ต, 24-26 พฤษภาคม 2566, หน้า STR53-1 - STR53-6.

พฤติกรรมรอยต่อของคานต่อคานด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูง Behavior on Ultra-High Performance Concrete Beam-to-Beam Connection

นฤสรณ์ ศรีสวัสดิ์* ชิตพล เรืองกุล ณัฐนันท์ โชติพัฒน์กิจ และ วิชัยรัตน์ แก้วเจือ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.สงขลา

*Corresponding author; E-mail address: 6410120036@email.psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เชื่อมต่อด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูงและปูนแบบไม่หดตัว โดยทำการทดสอบแรงดัดแบบ 4 จุด มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะของการเชื่อมต่อในการถ่ายเทแรงในคานและสังเกตการณ์บริเวณวิกฤตของรอยเชื่อมต่อ ตัวอย่างคานที่ใช้ทดสอบมีความยาว 700 มิลลิเมตร หน้าตัดคาน 150 มิลลิเมตร และลึก 150 มิลลิเมตร โดยพิจารณาขนาดของตัวอย่างคานจากแบบคอนกรีต และขนาดของเครื่องทดสอบ ออกแบบคอนกรีตกำลังอัดรูปทรงกระบอกมาตรฐานบ่มด้วยอากาศที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ใช้เหล็กข้ออ้อยรับแรงดึงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ SD40 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ คือ ระยะทาบของเหล็กเสริมและอัตราส่วนความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงกับปูนแบบไม่หดตัว ในช่วงกลางคานที่มีการเชื่อมต่อใช้ระยะทาบของเหล็กที่ 3.6 และ 9 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม ความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงจะมี 3 ระดับคือ 50 มิลลิเมตร 75 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร ของความลึกคาน โดยทำการหล่อตัวอย่างทั้งหมด 30 ตัวอย่าง และทดสอบภายใต้ตัวแปรที่กำหนดแบบละ 3 ตัวอย่าง ทำการบันทึกรูปแบบการวิบัติการแตกร้าว และการตอบสนองของแรง แล้วทำการอภิปรายผลการทดสอบภายใต้พารามิเตอร์การทดสอบที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาจะทาบและความลึกที่รับแรงได้มากที่สุดคือ 85.05 กิโลนิวตัน ในระยะทาบที่ 9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม ความลึก 100 มิลลิเมตร แต่ความแข็งแรงยังน้อยกว่าคานที่ไม่มีการเชื่อมต่อคือ 148.11 กิโลนิวตัน อยู่ที่ 43 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: คอนกรีตสมรรถนะสูง, การทดสอบแรงดัดแบบสี่จุด, เหล็กข้ออ้อย, ระยะทาบเหล็ก, ปูนแบบไม่หดตัว

Abstract

This article presents behavior of reinforced concrete beam using four-point bending test which the beam-to-beam is connected with ultra-high performance concrete (UHPC) and non-shrink concrete. The objective of the study is to evaluate the performance of the connection in transferring the force at the beam and to observe the effect the connection on critical area. The specimen has a dimension of length 700 mm x width 150 mm x height 150 mm. The dimension of the specimens is chosen considering the size of the concrete form and the loading frame. The design compressive cylinder strength chosen is 320 ksc at 28 days air curing. Deformed steel bars with nominal diameter of d_b is equal to 12 mm of SD40 grade are used as

tension member. Test parameters are bar overlapping length and ration of UHPC with depth of beam. The middle-span connection consisting of the overlapping lengths of $3d_b$, $6d_b$ and $9d_b$. Three different UHPC thickness varying from 50 mm, 75 mm and 100 mm of the beam depth. In total, 30 specimens are cast and tested with 3 specimens of each condition. Failure mode, crack pattern and load-slip response are recorded and discussed under the different test parameters. Results of the study overlap and the depth that can receive the most force is 85.05 kN in the span at 9 times the diameter of the steel reinforcement, 100 mm deep, but the strength is 43 less than that of the unconnected beam, which is 148.11 kN. percent

Keywords: Ultra-high performance concrete, four-point bending test, reinforcing bars, development length, non-shrink cement

1. บทนำ

ในปัจจุบันงานก่อสร้างมีการพัฒนามากขึ้นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความรวดเร็ว และความสะดวก จะเห็นมีการใช้ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปในงานก่อสร้างขนาดใหญ่ ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป เช่น คาน เสา แผ่นพื้น และผนัง มีการควบคุมมาตรฐานจากโรงงาน ในบางงานวิจัยมีการใช้เสาสำเร็จรูปในลักษณะที่นำมาเชื่อมโดยใช้คอนกรีตเชื่อมต่อ ผลการทดสอบเสาสำเร็จรูปสามารถรับแรงได้เทียบเท่ากับเสาหล่อในที่ [1] การใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปส่วนที่สำคัญที่สุด คือ จุดเชื่อมต่อของชิ้นส่วนในแต่ละชั้นจะต้องมีความแข็งแรงที่เพียงพอ ในการเชื่อมต่อ เช่น จุดเชื่อมต่อของเสาและคานก็จะใช้การเชื่อมต่อของเหล็กเสริม และใช้คอนกรีตปิดรอยเชื่อมนี้ ซึ่งการเชื่อมนี้สามารถควบคุมคุณภาพได้ยากเพราะต้องใช้ฝีมือช่าง

จึงเห็นว่าหากใช้การเชื่อมต่อโดยการทาบเหล็กระหว่างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป และใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงที่เป็นตัวเชื่อมต่อในช่องว่างที่เหลือ มีกำลังรับแรงอัด 1,000 ถึง 1,600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในแต่ละงานก็จะมีส่วนผสมที่แตกต่างกันออกไป เช่น เส้นใยเหล็ก (Fiber) ที่ 4 เปอร์เซ็นต์ ทำให้คอนกรีตสมรรถนะสูงรับแรงได้เพิ่มขึ้น [2, 3] ซึ่งมีค่าสูงกว่าคอนกรีตโดยทั่วไป กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตสมรรถนะสูงสามารถรับแรงได้มากกว่าคอนกรีตทั่วไปเนื่องจากมีเส้นใยเหล็ก (Fiber) และกำลังการรับแรงอัดที่สูง [4] กำลังการรับแรงของคอนกรีตจะส่งผลต่อพันธะระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม ในคอนกรีตที่มีกำลังการรับแรงอัดสูงก็จะทำให้พันธะที่มีต่อเหล็กเสริมสูงขึ้นตามไปด้วย [5-7] แต่เนื่องจากคอนกรีตสมรรถนะสูงยังไม่มีมาตรฐานในการนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมที่แน่นชัดจึงจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับระยะการทาบที่เหมาะสมเพื่อนำไปพัฒนาต่อในการใช้กับจุดต่อของโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป ในงานวิจัยที่ผ่านมาจะ

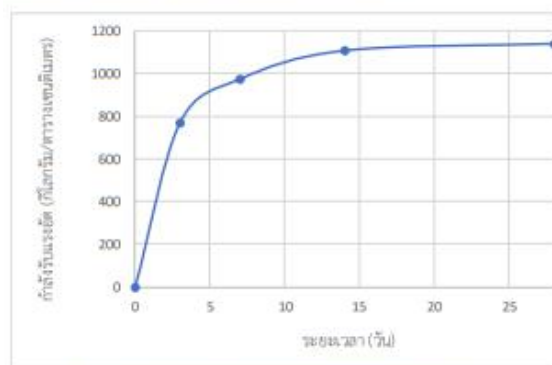
ทางมีผลต่อโครงสร้างเนื่องจากการวิบัติจะเกิดขึ้นในจุดนี้หากความแข็งแรงไม่เพียงพอหรือ เทียบเท่าตัวอย่างที่ไม่มีระยะทาผลการศึกษาพบว่าระยะทาที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตสมรรถนะสูงคือ 12 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม (8, 9) รูปแบบของการทาเหล็กก็เป็นปัจจัยที่มีผล การรับแรงของคาน การทาแบบการองเหล็กเสริมก็สามารถเพิ่มกำลังการรับแรงได้ แต่ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีความยุ่งยาก ไม่สะดวกในการทำงาน [10] และคอนกรีตสมรรถนะสูงเป็นวัสดุที่มีต้นทุนสูงจึงจำเป็นต้องลดต้นทุน โดยการใช้ คอนกรีตสมรรถนะสูงในบริเวณคานที่รับแรงดึงของคาน โดยหา ระยะความลึกที่เหมาะสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงเพื่อลดต้นทุน

โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการค้ำของคาน ที่มีจุดเชื่อมต่อของคอนกรีตสมรรถนะสูง เพื่อศึกษาระยะทาที่เหมาะสม สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็กสมรรถนะสูง และเพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ของคอนกรีตสมรรถนะสูงสำหรับการใช้ในงานเชื่อมต่อ โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้ ระยะทาของเหล็กเสริมกลางคานที่ 3 เท่า 6 เท่า และ 9 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม ความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง ในบริเวณจุดเชื่อมต่อความลึกที่ใช้คือ 33.3%, 50% และ 66.7% ของความลึกคาน ส่วนที่เหลือจะใช้ปูนแบบไม่หดตัว การทดสอบการค้ำของคาน คอนกรีตนั้นมีหลายวิธีแต่วิธีที่นิยมใช้กับคานคอนกรีตคือ การทดสอบเป็นการทดสอบแบบค้ำ 4 จุด (four-point bending test) [11]

2. ตัวอย่างและขั้นตอนการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

คอนกรีตที่นำมาใช้เป็นคานสำเร็จรูป มีกำลังอัดโดยประมาณเท่ากับ 380 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร คอนกรีตสมรรถนะสูงที่ใช้มีกำลังอัดประมาณ 1,100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และได้เก็บตัวอย่างคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ 3, 7, 14 และ 28 วัน เพื่อให้เห็นถึงการพัฒนากำลัง และใช้ปูนแบบไม่หดตัวกำลังอัดประลัย 600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แสดงให้เห็นในรูปที่ 1 การวิจัยนี้ใช้เหล็กข้ออ้อยคุณภาพ SD40T ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร สำหรับเป็นเหล็กเสริมหลักที่ด้านล่างของคาน และเหล็กกลมผิวเรียบคุณภาพ SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร สำหรับเป็นเหล็กเสริมด้านบนและเหล็กเสริมรับแรงเฉือน



รูปที่ 1 การพัฒนากำลังของคอนกรีตสมรรถนะสูง (UHPC)

2.2 ตัวอย่างและขั้นตอนดำเนินการ

จากขอบเขตของงานวิจัยสามารถแบ่งชุดของตัวอย่างได้เป็น 10 แบบ แต่ละแบบจะมีระยะทา และความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ใช้เชื่อมแตกต่างกันออกไป ดังแสดงตารางที่ 1 โดยแต่ละแบบจะหล่อตัวอย่างทั้งหมด 3 ชิ้นทำให้ตัวอย่างทั้งหมดมี 30 ตัวอย่าง

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างคาน

สัญลักษณ์ตัวอย่าง	ความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง (มิลลิเมตร)	ระยะทาของเหล็กเสริม(มิลลิเมตร)
B-0D-00	0	0
B-3D-50	50	36
B-3D-75	75	36
B-3D-100	100	36
B-6D-50	50	72
B-6D-75	75	72
B-6D-100	100	72
B-9D-50	50	108
B-9D-75	75	108
B-9D-100	100	108

สัญลักษณ์ของตัวอย่างเช่น B-3D-50 บอกลักษณะว่าเป็นคาน เช่น B เท่ากับ คาน, 3D เท่ากับ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม และ 50 เท่ากับ ความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง หน่วย (มิลลิเมตร) ขั้นตอนการดำเนินงาน เริ่มจากผูกเหล็กเสริมกับเหล็กรับแรงเฉือน ติดตัววัดความเครียด (strain gauge) ไว้ที่เหล็กเสริมบริเวณกลางคานแสดงในรูปที่ 2 เตรียมแบบหล่อ นำเหล็กเสริมใส่ในแบบหล่อ ในคานที่มีการเชื่อมต่อนำแผ่นโฟมปิดในรอยเชื่อมแสดงในรูปที่ 3 นำคอนกรีตเทใส่ในแบบหล่อ รอคอนกรีตแข็งตัว และทิ้งไว้ 7 วันจึงนำมาเชื่อมต่อตรงกลางคานด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูงแสดงในรูปที่ 4 หลังจากเชื่อมต่อครบ 28 วันจึงทดสอบคาน



รูปที่ 2 การผูกเหล็กและติดตัววัดความเครียด (strain gauge)



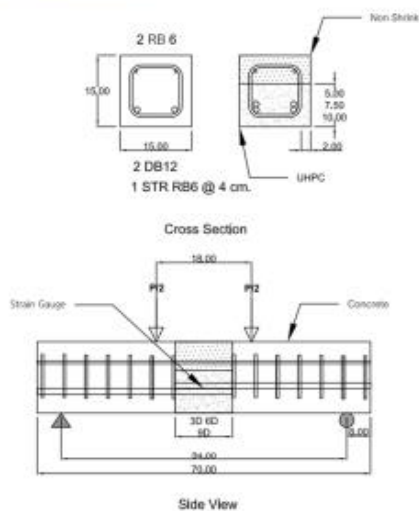
รูปที่ 3 การเตรียมวัสดุก่อนหล่อคาน



รูปที่ 4 การเชื่อมคานด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูง

2.3 รายละเอียดของคาน

จากการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของคานที่ไม่มีรอยเชื่อมต่อได้ออกแบบทดสอบแบบการดัด 4 จุด (four-point bending test) จะสามารถรับแรงสูงสุดได้ 120 กิโลนิวตัน คานที่ใช้ทดสอบมีขนาด 15 เซนติเมตร x 15 เซนติเมตร x 70 เซนติเมตร ด้านล่างจะเสริมเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร จำนวน 2 เส้น ด้านบนจะเสริมเหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จำนวน 2 เส้น เหล็กกลมผิวเรียบรับแรงเหนือหรือเหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรทุก 4 เซนติเมตร และติดตั้งวัดความเครียดที่เหล็กเสริม (strain gauge) บริเวณกลางคาน 2 ตัว แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงรายละเอียดคาน

2.4 การติดตั้งและการทดสอบ

การทดสอบเป็นการทดสอบแบบดัด 4 จุด (four-point bending test) โดยติดตั้งเครื่องวัดระยะการโก่งตัว (LVDT) จำนวน 1 ตัวที่กึ่งกลางคาน ให้แรงโดยใช้ระบบไฮดรอลิกผ่านตัววัดแรง (load cell) ขนาด 100 ตัน และวัดวัดความเครียด (strain gauge) บริเวณกลางคาน 2 ตัว ทั้งหมดได้เชื่อมต่อกับระบบ Universal Recorder EDX-100 ที่แสดงผลการทดสอบ และบันทึกข้อมูลในคอมพิวเตอร์แสดงในรูปที่ 6 คานถูกวางบนที่รองรับที่ระยะ 54 เซนติเมตรเครื่องกดให้แรงกระทำโดยถ่ายแรงผ่านเหล็ก

ที่วางอยู่บนคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และถ่ายแรงสองจุดลงบนคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีระยะ L/3 เท่ากับ 18 เซนติเมตร (L= 54 เซนติเมตร) หลังจากติดตั้งเสร็จทำการทดสอบโดยกดแรงบริเวณกลางคานพร้อมจดบันทึกการเปลี่ยนแปลงของคานเมื่อทดสอบเสร็จแล้วถ่ายรูปการวิบัติ และบันทึกผลการทดสอบนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลต่อไป



รูปที่ 6 การติดตั้งตัวอย่างคานเพื่อทดสอบ

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

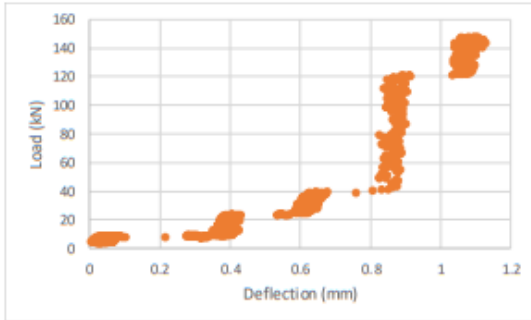
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโก่งตัว และแรงกับความเครียดของเหล็กเสริม

ผลการทดสอบคานทั้งหมด 10 แบบ จำนวน 30 ตัวอย่าง นำมาเฉลี่ยพบว่าน้ำหนักประลัย การโก่งตัวที่น้ำหนักประลัย และความเครียดของเหล็กเสริมที่น้ำหนักประลัย แสดงดังตารางที่ 2

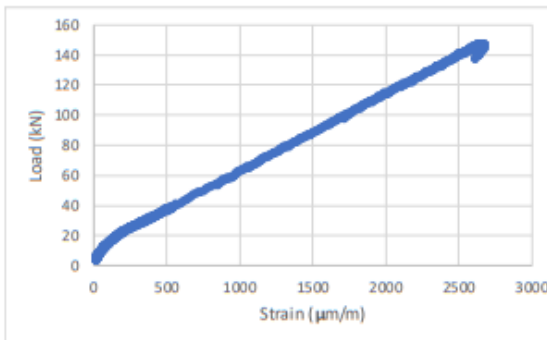
ตารางที่ 2 แสดงกำลังประลัย การโก่งตัว และความเครียดของเหล็กเสริมเฉลี่ยในคาน

สัญลักษณ์ตัวอย่าง	น้ำหนักประลัย (kN)	ความเครียดเหล็กเสริม	การโก่งตัว (มิลลิเมตร)
B-0D-00	148.11	2651.24	1.158
B-3D-50	15.43	94.20	0.469
B-3D-75	25.75	432.37	0.675
B-3D-100	26.80	669.95	0.648
B-6D-50	40.55	1354.41	0.681
B-6D-75	57.62	789.23	0.988
B-6D-100	65.29	1220.00	1.128
B-9D-50	55.68	645.11	0.933
B-9D-75	71.18	708.10	1.713
B-9D-100	85.05	620.67	1.477

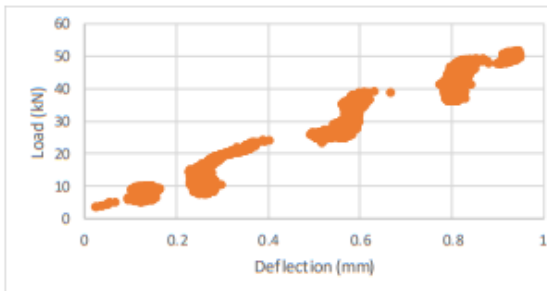
จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าการโก่งตัวของคานค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามกำลังรับแรงประลัย ความเครียดของเหล็กเสริมในตัวอย่างคานที่เป็นรอยต่อจะเห็นได้ค่อนข้างยากเนื่องจากความวิบัติในกำลังรับแรงประลัยที่น้อยทำให้เหล็กของเราที่มีความเครียดไม่มากนัก แตกต่างกับคานที่มีรอยเชื่อมความเครียดในเหล็กเสริมจะเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดทั้ง 3 ตัวอย่างเนื่องจากเหล็กเสริมในคานเกิดการครากก่อนที่คานจะวิบัติ



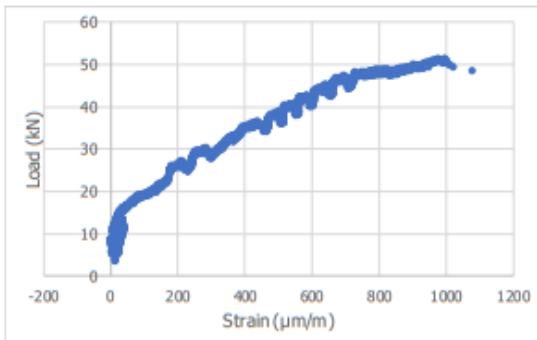
รูปที่ 7 แสดงกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-0D-00



รูปที่ 8 แสดงกำลังการรับแรง และความเครียดในเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-0D-00



รูปที่ 9 แสดงกำลังการรับแรง และการโก่งตัวของคานตัวอย่าง B-6D-100

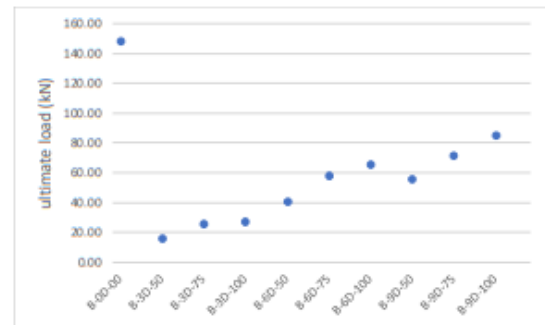


รูปที่ 10 แสดงกำลังการรับแรง และความเครียดในเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง B-6D-100

ในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 จะแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของคานที่ไม่มีการเชื่อมต่อเมื่อมีการให้แรงจนไปถึงจุดที่ใกล้การครากของเหล็กเสริมตัวอย่างคานจะมีการโก่งตัวเพิ่มขึ้นอย่าง ๆ ขึ้นเนื่องจากเหล็กเสริมยังไม่คราก จุดครากของเหล็กเสริมจะมีค่าความเครียดประมาณ 2,300 ไมโครเมตรต่อเมตร หลังจากผ่านจุดครากไปแล้วการโก่งตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและตัวอย่างคานก็วิบัติตามมา ในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 จะแสดงให้เห็นตัวอย่างคานที่มีการเชื่อมต่อการโก่งตัวเมื่อเทียบกับแรงจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเป็นเส้นตรงจนคานวิบัติเนื่องจากความเครียดของเหล็กเสริมนี้มีค่าน้อยไม่ถึงจุดครากของเหล็กเสริม

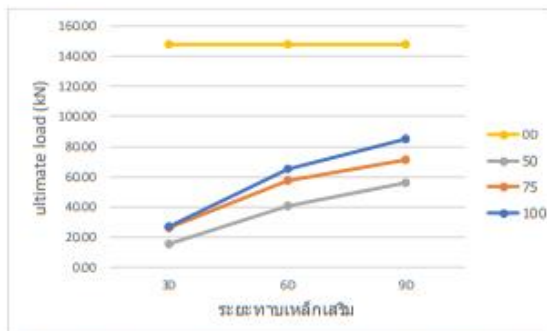
3.2 กำลังรับแรงของระยะทาบและความลึกแต่ละแบบ

จากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงของคานตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามระยะทาบเหล็ก และความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง แต่ในตัวอย่าง B-9D-50 จะมีค่ากำลังรับแรงน้อยกว่า B-6D-100 เนื่องจากผลของความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงแสดงให้เห็นว่าระยะทาบที่เพิ่มขึ้นแต่ความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงน้อยลงส่งผลให้กำลังรับแรงของคานตัวอย่างต่ำลงด้วย และกำลังรับแรงที่มากที่สุดของคานที่มีรอยเชื่อมคือ B-9D-100 ที่ 85.05 กิโลนิวตัน แต่กำลังรับแรงยังห่างจากคานที่ไม่ได้เชื่อมคือ B-0D-00 ที่ 148.11 กิโลนิวตัน อยู่ถึง 43 เปอร์เซ็นต์ แสดงในรูปที่ 11



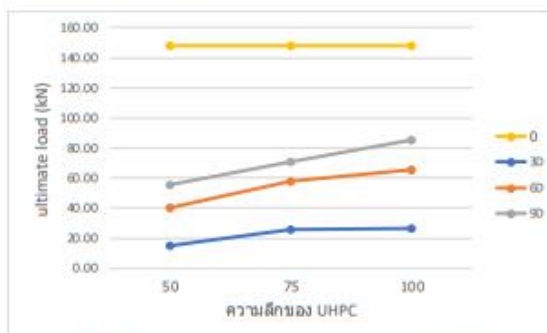
รูปที่ 11 แสดงกำลังรับแรงประลัยของตัวอย่างคานแต่ละแบบ

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงประลัยของคานตัวอย่างกับระยะทาบที่เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าที่ความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง 50 มิลลิเมตร กำลังรับแรงของคานจะเพิ่มขึ้นตามระยะทาบที่เพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของการรับแรงจะน้อยเมื่อเทียบกับความลึก 75 และ 100 มิลลิเมตร ส่วนความลึกที่ 75 มิลลิเมตร กำลังรับแรงของคานจะเพิ่มขึ้นตามระยะทาบที่เพิ่มขึ้น และในความลึกที่ 100 มิลลิเมตรกำลังรับแรงของคานจะเพิ่มขึ้นตามระยะทาบที่เพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังการรับแรงจะมากกว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับความลึก 50 และ 75 มิลลิเมตร



รูปที่ 12 แสดงกำลังรับแรงประลัย กับระยะทาบเหล็กเสริมของคานในแต่ ละความลึกของ (UHPC)

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงประลัยของคานตัวอย่างกับ ความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูง ตัวอย่างคานที่ระยะทาบ 3D กำลังการ รับแรงจะเพิ่มขึ้นตามความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่เพิ่มขึ้น แต่การ เพิ่มความลึกจะสามารถเพิ่มการรับแรงขนาดของได้ไม่มากนัก ที่ระยะทาบ 6D กำลังการรับแรงจะเพิ่มขึ้นตามความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงใน ความลึกที่ 75 มิลลิเมตร เทียบกับ 50 มิลลิเมตร อัตรากำลังการรับแรงจะ เพิ่มขึ้นมากกว่าที่ความลึก 100 มิลลิเมตร เทียบกับ 75 มิลลิเมตร และที่ ระยะทาบ 9D กำลังการรับแรงจะเพิ่มขึ้นตามความลึกของคอนกรีต สมรรถนะสูงที่เพิ่มขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงจะมากกว่าระยะ ทาบที่ 3D และ 6D ตามลำดับ



รูปที่ 13 แสดงกำลังรับแรงประลัย กับความลึกของ (UHPC) ในแต่ละระยะทาบของเหล็กเสริมในคาน

3.3 การรับแรงและรูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง

ในตัวอย่างที่ระยะทาบ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมที่ความลึก 50 75 และ 100 มิลลิเมตร รอยแตกการวิบัติจะมีในจุดที่เป็นรอยต่อระหว่าง คอนกรีตสมรรถนะสูงกับคานคอนกรีตสำเร็จรูปแสดงให้เห็นใน รูปที่ 14 รูปที่ 15 และรูปที่ 16



รูปที่ 14 แสดงลักษณะรอยแตกของตัวอย่าง B-3D-50



รูปที่ 15 แสดงลักษณะรอยแตกของตัวอย่าง B-3D-75



รูปที่ 16 แสดงลักษณะรอยแตกของตัวอย่าง B-3D-100

ในตัวอย่างที่ระยะทาบ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมที่ความลึก 50 มิลลิเมตรแสดงในรูปที่ 17 รอยแตกจะมีการแตกในส่วนที่แบ่งชั้นระหว่าง คอนกรีตสมรรถนะสูงกับปูนแบบไม่หดตัว และมีรอยแตกตรงจุดเชื่อมต่อ ระหว่างคานกับคอนกรีตสามรรถนะสูง และในความลึกที่ 75 และ 100 มิลลิเมตรแสดงในรูปที่ 18 และรูปที่ 19 มีรอยแตกในลักษณะเดียวกันแต่จะมี จำนวนรอยแตกเพิ่มมากขึ้นในบริเวณจุดเชื่อมต่อ และด้านข้างจุดเชื่อมต่อ



รูปที่ 17 แสดงลักษณะรอยแตกของตัวอย่าง B-6D-50

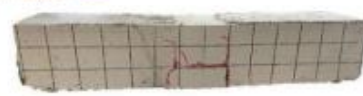


รูปที่ 18 แสดงลักษณะรอยแตกของตัวอย่าง B-6D-75



รูปที่ 19 แสดงลักษณะรอยแตกของตัวอย่าง B-6D-100

ในตัวอย่างที่ระยะทาบ 9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมที่ความลึก 50 มิลลิเมตรแสดงในรูปที่ 20 จะเห็นรอยแตกกว้างแยกชั้นระหว่างคอนกรีต สมรรถนะสูง กับปูนแบบไม่หดตัวได้ชัดเจน และมีรอยแตกกว้างตรงจุดเชื่อม ระหว่างคานทั้ง 2 ข้าง ที่ความลึก 75 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 21 มีรอย แตกเฉียงตรงจุดเชื่อมต่อที่คอนกรีตสมรรถนะสูง และรอยแตกระหว่างคาน กับจุดเชื่อมต่อ ที่ความลึก 100 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 22 จะมีรอยแตก เฉียงจากจุดรองรับของคาน และรอยแตกบริเวณคอนกรีตสมรรถนะสูง ตัวอย่างคานที่ไม่มีจุด เชื่อมต่อรอยแตกในแนวทแยงจะมีจำนวนมากเริ่ม จากจุดรองรับด้านล่างของคานทั้ง 2 ข้าง และมีรอยแตกบริเวณกลางคาน ด้านล่างแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 20 แสดงลักษณะรอยแตกของตัวอย่าง B-9D-50



รูปที่ 21 แสดงลักษณะรอยแตกของตัวอย่าง B-9D-75



รูปที่ 22 แสดงลักษณะรอยแตกของตัวอย่าง B-9D-100



รูปที่ 23 แสดงลักษณะรอยแตกของตัวอย่าง B-0D-00

จากลักษณะรอยแตกของคานคอนกรีตรอยแตกบริเวณจุดเชื่อมต่อกึ่งกลางคานที่มีลักษณะยาวเกิดจากระยะทาบที่ไม่เพียงพอต่อการยึดเกาะของคอนกรีต รอยร้าวในลักษณะที่จุดเชื่อมต่อมีการแตกร้าวแบ่งแยกชั้นของคอนกรีต สมรรถนะสูงแสดงให้เห็นการวิบัติเนื่องจากความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่น้อย รอยแตกร้าวในลักษณะเฉียงเข้าหากกลางคานทั้งสองด้านทำมุมประมาณ 45 องศาเริ่มจากบริเวณจุดรองรับด้านข้างเกิดจากการรับแรงเฉือนของคอนกรีต และรอยแตกร้าวในลักษณะการแตกร้าวเป็นเส้นตรงด้านข้างบริเวณกึ่งกลางคานเกิดจากการรับแรงดัดของคาน

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษารอยเชื่อมต่อกันด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูงทั้งหมด 10 แบบ จำนวน 30 ตัวอย่าง โดยทำการศึกษาดังต่อไปนี้คือ ระยะทาบของเหล็กเสริมกลางคานที่ 3 เท่า 6 เท่า และ 9 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม และความลึกของคอนกรีตสมรรถนะสูงในบริเวณจุดเชื่อมต่อความลึกที่ใช้คือ 5.0 เซนติเมตร 7.5 เซนติเมตร และ 10.0 เซนติเมตร ส่วนที่เหลือจะเป็นปูนแบบไม่หดตัว ผลการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงของคานที่มีจุดเชื่อมต่อ เพิ่มขึ้นตามระยะทาบที่เพิ่มขึ้น และกำลังการรับแรงของคานตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้น คานที่รับแรงได้มากที่สุดคือ B-9D-100 รับแรงได้ 85.05 กิโลนิวตัน โดยมีระยะทาบที่ 9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม และความลึกที่ 100 มิลลิเมตรของคอนกรีตสมรรถนะสูงอยู่ด้านล่าง 50 มิลลิเมตรของปูนแบบไม่หดตัวอยู่ด้านบน ของรอยต่อคาน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคานที่ไม่มีจุดเชื่อมต่อ B-0D-00 รับแรงได้ 148.11 กิโลนิวตัน แสดงให้เห็นว่าจุดเชื่อมคานนั้นยังต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้การกับแรงมากกว่าหรือ เทียบเท่าคานที่ไม่มีจุดเชื่อมต่อ งานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดเพื่อทดสอบการรับแรงในจุดเชื่อมต่อของคานโดยใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงในคาน โดยเพิ่มตัวแปรเพื่อให้เกิดการทดสอบมีความแม่นยำมากขึ้น และให้นำไปใช้งานได้ดี เช่น ความลึก ความกว้าง ความยาวคาน และขนาดของเหล็กเสริมที่แตกต่างกันไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชา วิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนการทดสอบงานวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณบริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์คอนกรีตสมรรถนะสูง และขอขอบคุณ บริษัท สดางค์ วิศวกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เหล็กเสริมกำลัง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Rave-Arango J.F., Blandón C.A., Restrepo J.I. and Carmona F. (2018). Seismic performance of precast concrete column-to-column lap-splice connections. *Engineering structures*, 172, pp. 687-699.
- [2] Fabien L., Massicotte B., and Charron J. P. (2016). Experimental investigation of bond stress distribution and bond strength in unconfined UHPFRC lap splices under direct tension. *Cement and Concrete Composites*, 74, pp. 26-38.
- [3] Ma F., Deng M., Ma Y., Lü H., Yang Y. and Sun H. (2020). Study on the lap-splice behavior of post-yield deformed steel bars in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 262, pp. 120611.
- [4] Islam M.M.U. (2021). Investigation of tensile creep for Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) for the long-term. *Construction and Building Materials*, 305, pp.124752.
- [5] Abadel A.A., Galal M., Kohail M. and Alharbi Y. R. (2021). Bond behavior between concrete and steel rebars for stressed elements. *Ain Shams Engineering Journal*, 12.2 pp. 1231-1239.
- [6] Qi J., Liu J., Wang J., Cheng Z. and Ma Z. J. (2021). Bond strength of reinforcing bars in ultra-high performance concrete: Experimental study and fiber-matrix discrete model. *Engineering Structures*, 248, pp. 113290.
- [7] Konstantinos T. and Pantazopoulou S. J. (2021). Bond behavior of high-performance fiber reinforced concrete (HPFRC) under direct tension pullout. *Engineering Structures*, 243, pp. 112701.
- [8] Eric J., and Saatcioglu M. (2019). Bond-slip modelling of reinforced concrete lap splices subjected to low and high strain rates. *Engineering Structures* 195, pp. 568-578.
- [9] Fabien L., Massicotte B., and Charron J. P. (2015). Bond strength of tension lap splice specimens in UHPFRC. *Construction and Building Materials*, 93, pp. 84-94.
- [10] Mousa I. M. (2015). Flexural behaviour and ductility of high strength concrete (HSC) beams with tension lap splice. *Alexandria Engineering Journal*, 54.3, pp. 551-563.
- [11] Yin, Y., Qiao Y., and Hu S. (2019). Four-point bending tests for the fracture properties of concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 211, pp. 371-381.