พฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่คอนกรีตถูกแทนที่ด้วยโฟมบางส่วน

Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Partly Replaced by Blocks of Foam

พงศ์ศักดิ์ ศุขมณี[1] อาศิส อัยรักษ์[2,*] และ สมมาตร์ สวัสดิ์[3]

[1,2,3] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา

**Corresponding author; E-mail address: arsit.i@rmutsv.ac.th*

บทคัดย่อ

การที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีน้ำหนักที่น้อยลงแต่ยังคงมีความสามารถในการรับกำลังดัดได้อย่างมีนัยสำคัญ การแทนที่คอนกรีตด้วยโฟมบางส่วนเพื่อเป็นการลดน้ำหนักของคานและศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดและลักษณะของการพิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยคานขนาดหน้าตัด 10×15 เซนติเมตร ยาว 120 เซนติเมตร มีเหล็กเสริมด้านรับแรงอัดและแรงดึงเป็น RB9 2 เส้น ภายในแทนที่ด้วยโฟมขนาดหน้าตัด 2.50×5.00 เซนติเมตร แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มใส่โฟม 2 ชิ้น ยาว 20 30 และ 40 เซนติเมตร และกลุ่มใส่โฟม 1 ชิ้น ยาว 90 เซนติเมตร คอนกรีตที่ใช้มีค่าการออกแบบ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์มาตรฐานที่อายุการบ่ม 28 วัน ตัวอย่างคานถูกทำการทดสอบด้วยการดัดแบบแรงกระทำ 3 จุด และ 4 จุด เพื่อทดสอบหากำลังต้านทานแรงดัดและการโก่งตัวจนกระทั่งคานเกิดการพิบัติ ผลที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดและความยาวที่เท่ากันแต่ไม่มีการแทนที่ด้วยโฟม พบว่าตำแหน่งการวางโฟมแบบ 2×40 สามารถรับโมเมนต์ดัดได้สูงสุดคือ 6.46 กิโลนิวตัน-เมตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 5.42 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับคานตัวอย่าง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับกำลังดัดได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับน้ำหนักของคานที่ลดลง

คำสำคัญ: คานคอนกรีตเสริมเหล็ก, กำลังรับแรงดัด, โฟม

Abstract

Reinforced concrete beams have a lower weight but still have significant flexural capacity. Partial foam concrete replacement to reduce the weight of beam and study the flexural behavior and failure characteristics of reinforced concrete beam. The sample beam, cross sectional size 10×15 centimeters with span length 120 centimeters with two 9 millimeters diameter bars in both tension and compression sides. The beams are replaced by foam with a cross section of 2.50×5.00 centimeters, divided into 2 groups: 2 foam insert group, 20 30 and 40 centimeters long, and 1 foam insert group, 90 centimeters long. The designed compressive strength of a standard cubical concrete 240 kilograms per square centimeter were used for this research with a curing age of 28 days. The sample was tested by 3 points and 4 points bending force for flexural strength and deflection until the beam failed. The results are compared with reinforced concrete beams of the same cross section and length, but without foam replacement. It was found that the position of placing the foam in type 2×40 centimeters can bear the maximum bending moments of 6.46 kilo newton-meters, which were lower than 5.42 percent compared to the normal sample beam. Demonstrates a significant flexural strength compared to the reduced beam weight.

Keywords: Reinforced Concrete Beam, Flexural Strength, Foam

1. คำนำ

คานเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างสองมิติที่รับแรงกระทำตามขวาง (Transverse Loading) นั่นก็คือ การดัดหรือหน่วยแรงดัด โดยส่วนมากคอนกรีตจะถูกใช้เป็นวัสดุหลักในโครงสร้างเนื่องจากมีความสะดวกในการผลิต ในการหล่อและมีความแข็งแรง แต่ความสามารถในการรับแรงดึงต่ำซึ่งเป็นข้อด้อยของคอนกรีต และเพื่อเป็นการเสริมข้อด้อยนี้จึงใช้เหล็กเข้ามาเสริมเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึง หรือเรียกว่าคอนกรีตเสริมเหล็ก นั่นแสดงให้เห็นว่าเมื่อคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงกระทำจะมีการรับแรงในสองลักษณะคือ แรงดึงและแรงอัด และโดยหลักการในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตในส่วนรับแรงอัดจะรับด้วยคอนกรีตและหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นซึ่งอยู่ใต้แนวแกนสะเทินจะรับด้วยเหล็กเสริมเท่านั้น จะเห็นการศึกษาและการทดสอบที่ผ่านมาหลายๆ ครั้งจะมุ่งเพื่อที่จะหาวัสดุทางเลือกที่จะมาแทนที่คอนกรีต อย่างเช่น เถ้าลอย แกลบ หรือวัสดุน้ำหนักเบา ตลอดจนการแทนที่ส่วนรับแรงดึงดังกล่าวด้วยช่องว่าง ตลอดจนการใช้ท่อพีวีซีหรือโฟม หรือช่องกลวงแทนที่คอนกรีตในแนวตามยาวของคาน เป็นต้น

Kumar, M. et al., [1] ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการนำคอนกรีตในส่วนที่รับแรงดึงออกไป 25 เปอร์เซ็นต์ และทั้งหมดของพื้นที่หน้าตัดคานในส่วนรับแรงดึงตามลำดับ ซึ่งพบว่าไม่มีผลต่อพฤติกรรมการดัด และยังมีการแทนที่คอนกรีตด้วยช่องกลวงด้วยท่อพีวีซี โดย Balaji, G., et al., [2] ได้แทนที่คอนกรีตในส่วนรับแรงดึงด้วยการใส่ท่อพีวีซีตลอดทั้งความยาวคานและทำการทดสอบการรับแรงดัดเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดปกติ และยังมีการศึกษาของ Elamary, A.S., et al., [3] ที่มีการแทนที่คอนกรีตด้วยโฟม 3 – 7 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่หน้าตัดคานและทดสอบสามจุดเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัด

ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการแทนที่คอนกรีตคิดเป็นประมาณ 8.3 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่หน้าตัดคานส่งผลให้คานมีน้ำหนักที่ลดลง โดยมีการใช้โฟมหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉากในการแทนที่คอนกรีตที่มีความยาวของโฟมเมื่อเทียบกับความยาวของคานที่แตกต่างกัน และทำการศึกษาการรับแรงดัดและรูปแบบของการวิบัติที่เกิดขึ้น ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดต่อไป

2. การดำเนินการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

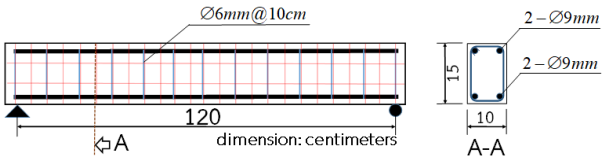
คอนกรีตที่ใช้หล่อคานตัวอย่างทั้งหมด มีค่าการออกแบบของกำลังอัดประลัยเฉลี่ยเท่ากับ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์มาตรฐานที่อายุการบ่ม 28 วัน เป็นการผสม ปูน ทราย หิน และน้ำ โดยผสมคอนกรีตในห้องปฏิบัติการด้วยโม่ผสมขนาดมาตรฐาน 0.25 ลูกบาศก์เมตร และเก็บก้อนตัวอย่างขนาด 15×15×15 เซนติเมตร, สำหรับเหล็กที่ใช้เป็นเหล็กเส้นกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลิเมตร (ใช้เป็นเหล็กเสริมหลัก) และ 6 มิลลิเมตร (ใช้เป็นเหล็กปลอกระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก 10 เซนติเมตร) โดยเหล็กเส้นกลมที่ใช้อยู่ในชั้นคุณภาพ 2,400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (SR24) ตามมาตรฐาน มอก. 20-2559 [5]

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

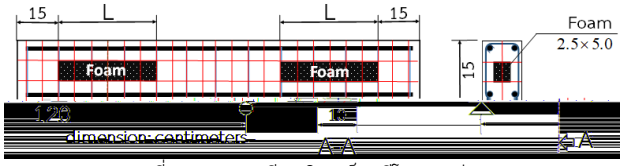
รหัส	ขนาดคาน (เซนติเมตร)	ความยาวโฟม (2xL) (เซนติเมตร)	การทดสอบ
B1-0000-3P	10x15x120	-	3 Points
B1-2x20-3P	10x15x120	2 x 20	3 Points
B1-2x30-3P	10x15x120	2 x 30	3 Points
B1-2x40-3P	10x15x120	2 x 40	3 Points
B1-1x90-3P	10x15x120	1 x 90	3 Points
B2-0000-4P	10x15x120	-	4 Points
B2-2x20-4P	10x15x120	2 x 20	4 Points
B2-2x30-4P	10x15x120	2 x 30	4 Points
B2-2x40-4P	10x15x120	2 x 40	4 Points
B2-1x90-4P	10x15x120	1 x 90	4 Points

2.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษา

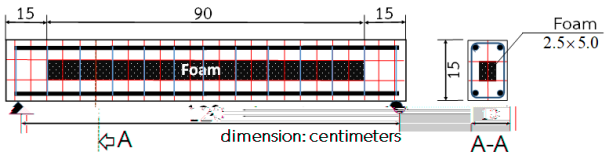
การศึกษานี้ได้ทำการหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 10×15 เซนติเมตร และมีความยาวในการทดสอบ 120 เซนติเมตร จำนวนทั้งหมด 10 ตัวอย่าง แบ่งเป็นสองกลุ่ม ตามรูปแบบของการแทนที่คอนกรีตด้วยโฟมและประเภทของการทดสอบ โดยมีคานปกติที่ไม่มีการแทนที่ด้วยโฟมเป็นคานอ้างอิง แสดงดังรูปที่ 1 โดยโฟมที่ใช้มีขนาดหน้าตัด 2.50×5.00 เซนติเมตร ความยาวถูกแบ่งเป็นสองช่วง (2×L) เมื่อ L คือความยาวโฟม จากซ้ายและขวาของคาน (20, 30 และ 40 เซนติเมตร) แสดงดังรูปที่ 2 และคานที่ใส่โฟมยาวตลอด 90 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3 โดยรายละเอียดของตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 1 และตัวอย่างที่ดำเนินการหล่อคอนกรีตแล้ว ดังรูปที่ 4



รูปที่ 1 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ไม่มีโฟม)



รูปที่ 2 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก (มีโฟมบางส่วน)



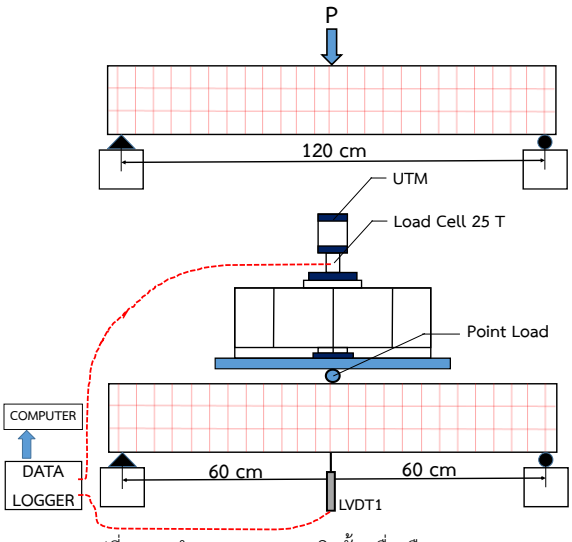
รูปที่ 3 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก (มีโฟมตลอดความยาว)



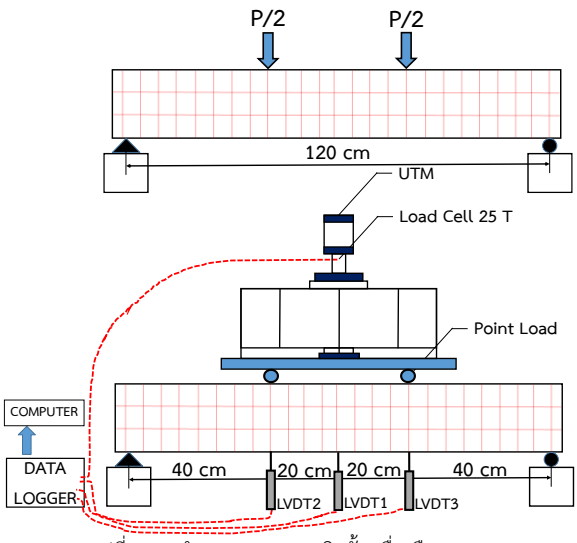

รูปที่ 4 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษา

2.3 วิธีการทดสอบ

การศึกษานี้มุ่งเน้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมการดัดของคานช่วงเดียว (Simple Beam) โดยวิธีการทดสอบมีสองรูปแบบด้วยกันคือ การทดสอบแรงดัดแบบ 3 จุด (Three Points Bending Test) และการทดสอบแรงดัดแบบ 4 จุด (Four Points Bending Test) รายละเอียดดังในตารางที่ 1 และแสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการจำลองแรงและการติดตั้งเครื่องมือทดสอบในห้องปฏิบัติการ และรูปที่ 7 และ 8 ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือบนคานคอนกรีตตัวอย่างที่วางอยู่บนที่รองรับอย่างง่าย (Simple Supports) พร้อมในการทดสอบสำหรับการทดสอบสามจุดและสี่จุดตามลำดับ ประกอบด้วยโหลดเซลล์ขนาด 25.00 ตัน สำหรับเพิ่มแรงกระทำต่อคาน และอุปกรณ์วัดค่าการโก่งตัว (LVDT) ของคาน ข้อมูลที่ได้จะถูกเก็บโดย Data Logger ในขณะทำการทดสอบและนำไปวิเคราะห์ผลในลำดับต่อไป



รูปที่ 5 การจำลองแรงและการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ
(สำหรับการทดสอบแบบ 3 จุด)



รูปที่ 6 การจำลองแรงและการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ
(สำหรับการทดสอบแบบ 4 จุด)



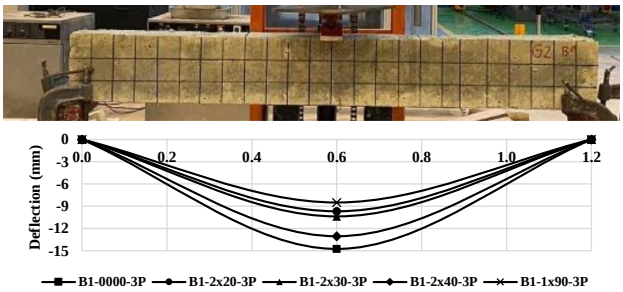
รูปที่ 7 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบในห้องปฏิบัติการ
(สำหรับการทดสอบแบบ 3 จุด)



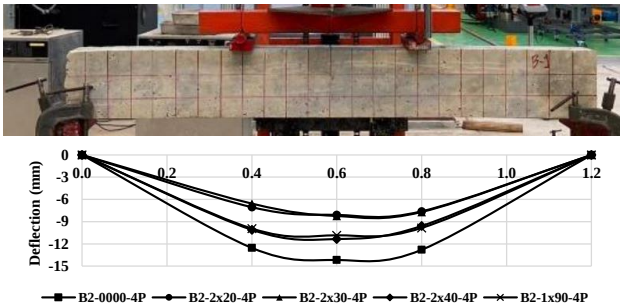
รูปที่ 8 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบในห้องปฏิบัติการ
(สำหรับการทดสอบแบบ 4 จุด)

3. ผลการทดสอบและอภิปราย

3.1 การโก่งตัว

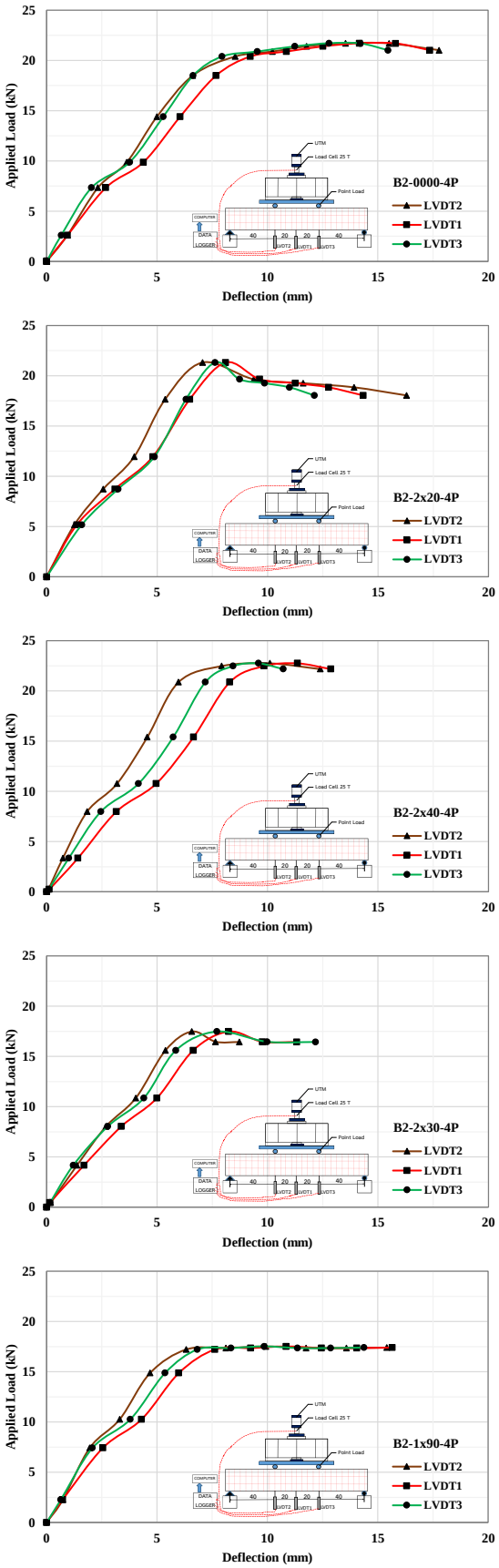


รูปที่ 9 การโก่งตัวของคานที่ตำแหน่งกึ่งกลาง เนื่องจากแรงสูงสุด (3 จุด)



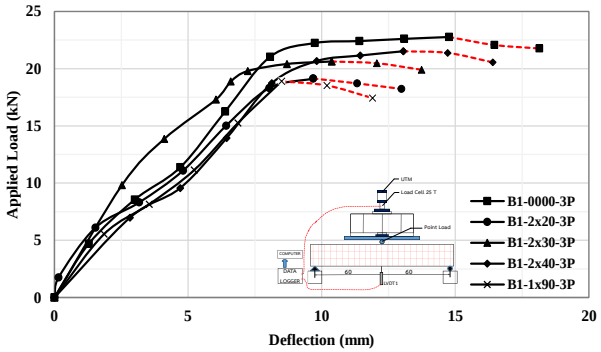
รูปที่ 10 การโก่งตัวของคานที่ตำแหน่งกึ่งกลาง เนื่องจากแรงสูงสุด (4 จุด)

3.2 แรงกระทำกับการโก่งตัว

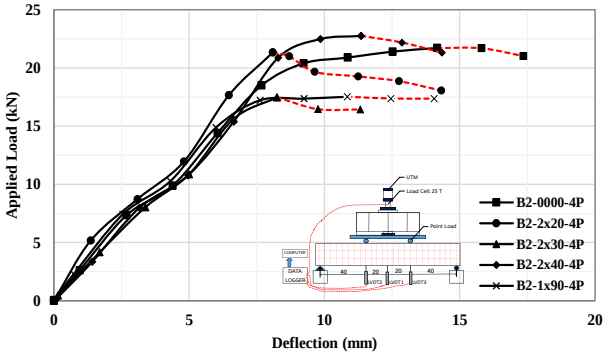


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวกับแรงกระทำ (4 จุด)

การโก่งตัวของตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 มีค่าการโก่งตัวสูงที่สุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานเนื่องจากแรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 14.77 มิลลิเมตร และ 14.17 มิลลิเมตร และเกิดจากแรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 22.77 กิโลนิวตัน และ 21.71 กิโลนิวตัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 11 และรูปที่ 12 โดยการโก่งตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นเกิดกับตัวอย่าง B1-0000-3P และ B2-0000-4P ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ไม่ได้มีการแทนที่คอนกรีตด้วยโฟม ในตัวอย่างที่แทนที่ด้วยโฟมจะมีการโก่งตัวเนื่องจากแรงกระทำสูงสุดมากที่สุดในตัวอย่าง B1-2x40-3P และ B2-2x40-4P สำหรับการทดสอบด้วยแรงกระทำ 3 จุด และ 4 จุด ตามลำดับ ทั้งนี้จะพบว่าตัวอย่างคานจะมีพฤติกรรมการโก่งตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้น จนแรงกระทำอยู่ระหว่างช่วง 7 กิโลนิวตัน ถึง 12 กิโลนิวตัน คานตัวอย่างส่วนใหญ่เริ่มมีการแตกร้าวเนื่องจากลักษณะของเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัว ดังแสดงในรูปที่ 11 12 และ 13 มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำที่น้อยลงแต่มีค่าการโก่งตัวที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ในช่วงแรก และต่อมาคานตัวอย่างก็ยังคงสามารถรับแรงกระทำเพิ่มขึ้นได้อย่างต่อเนื่องพร้อมกับการโก่งตัวที่เพิ่มขึ้นจนถึงตำแหน่งแรงกระทำสูงสุดและตัวอย่างเกิดการพิบัติในที่สุด โดยผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ จากการทดสอบแบบ 3 จุด และ 4 จุด ของตัวอย่างทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ

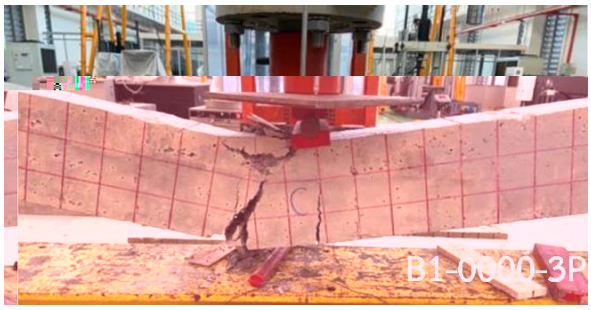


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานกับแรงกระทำ (สำหรับการทดสอบแบบ 3 จุด)

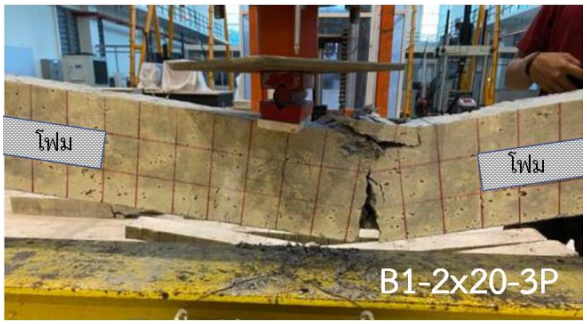


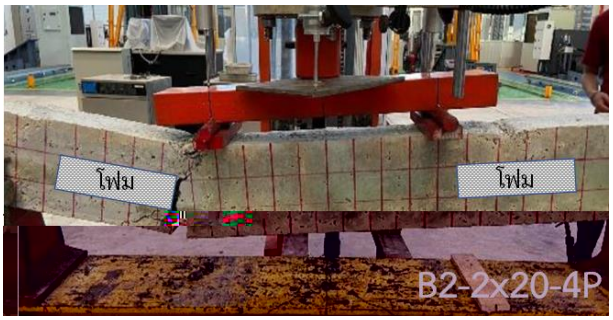
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานกับแรงกระทำ (สำหรับการทดสอบแบบ 4 จุด)

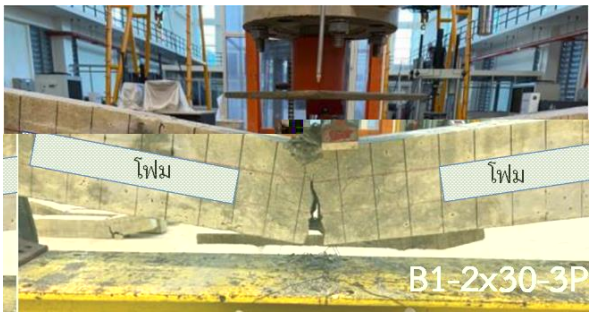
3.3 ความเสียหายของตัวอย่าง

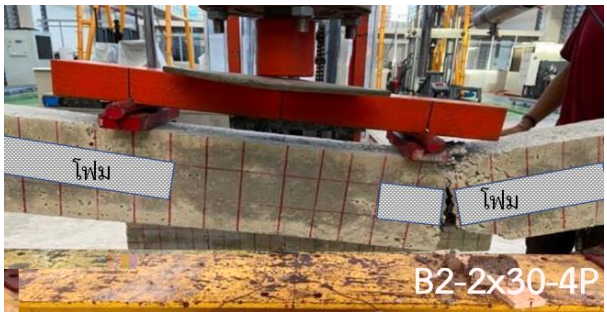


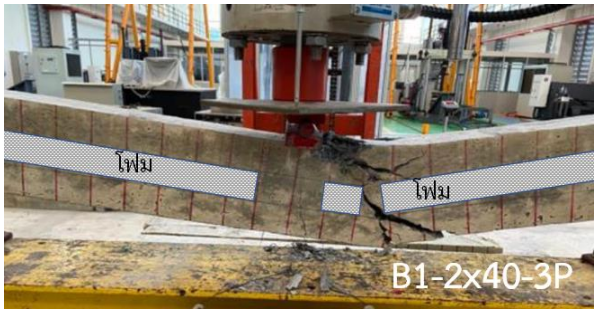


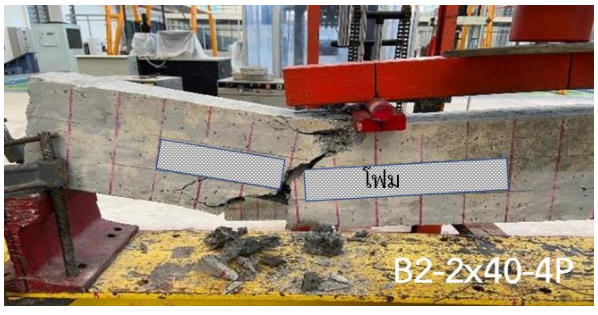


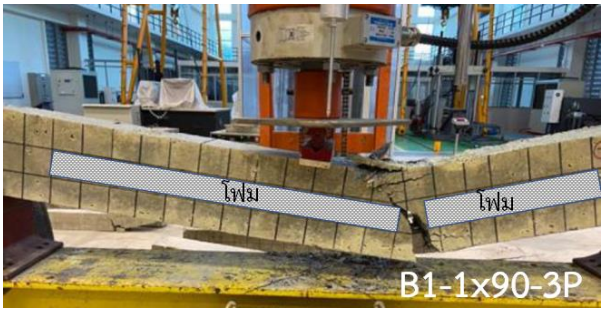


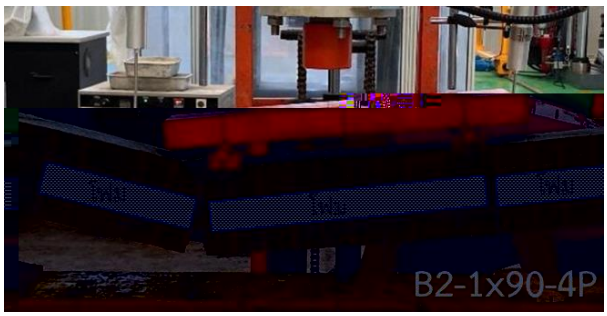












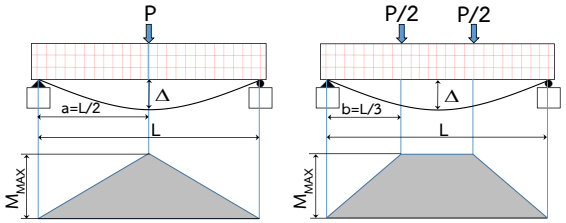
รูปที่ 14 ความเสียหายของคานตัวอย่าง (สำหรับการทดสอบแบบ 3 จุด)

รูปที่ 15 ความเสียหายของคานตัวอย่าง (สำหรับการทดสอบแบบ 4 จุด)

เมื่อตัวอย่างคานรับแรงกระทำเพิ่มขึ้น การโก่งตัวก็จะเพิ่มขึ้นดังกล่าวข้างต้น และเมื่อแรงกระทำเข้าสู่ช่วง 7 – 12 กิโลนิวตัน ตัวอย่างคานเริ่มต้นแตกร้าว ซึ่งในบางตัวอย่างสามารถได้ยินเสียงของการแตกร้าวได้ ส่งผลให้แรงที่กระทำในช่วงนี้ที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำเท่ากับช่วงก่อน 7 กิโลนิวตัน แต่ทำให้อัตราการเพิ่มของการโก่งตัวมีมากกว่าเมื่อเทียบกัน ทำให้ลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวกับแรงกระทำในช่วงนี้มีลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรงเมื่อเทียบกับช่วงก่อน 5 กิโลนิวตัน และเมื่อตัวอย่างเริ่มแตกร้าว คานตัวอย่างก็ยังคงรับแรงได้เพิ่มขึ้นต่อไป รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะมีขนาดที่กว้างและเพิ่มมากขึ้น จนตัวอย่างรับแรงถึงค่าสูงสุด (ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13 ซึ่งกราฟเป็นเส้นทึบจนถึงตำแหน่งที่แรงกระทำมีค่าสูงสุด และเกิดการโก่งตัวที่ตำแหน่งแรงกระทำสูงสุด ดังตารางที่ 2 และแรงกระทำค่อยๆลดลงดังเส้นประในรูป) และคานตัวอย่างเกิดการพิบัติในที่สุด พบว่าตำแหน่งที่เกิดรอยร้าวส่วนใหญ่ของตัวอย่างจะเริ่มเกิดตรงที่ขอบด้านล่างของคานตัวอย่างตรงตำแหน่งใต้แรงกระทำ ทั้งการทดสอบ 3 จุด และ 4 จุด โดยแนวของการแตกร้าวจนกระทั่งคานตัวอย่างเกิดการพิบัติ จะมีสองรูปแบบที่เห็นได้ชัดเจน ได้แก่ แนวการแตกร้าวเริ่มจากด้านล่างเพิ่มขึ้นในแนวดิ่งที่ใต้แรงกระทำ อย่างเช่น B1-0000-3P B1-2x30-3P B2-0000-4P เป็นต้น และแนวการแตกร้าวที่มีแนวเฉียงหรือเอียงทำมุมกับแนวของคานตัวอย่าง อย่างเช่น B1-2x40-3P B2-2x40-4P (ซึ่งทั้งสองตัวอย่างนี้เป็นการแทนที่คอนกรีตด้วยโฟมบางส่วนที่สามารถรับแรงกระทำได้ใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ไม่มีโฟม แทนที่และมีการโก่งตัวที่สูงสุดในกลุ่มของคานตัวอย่างที่คอนกรีตถูกแทนที่ด้วยโฟมบางส่วน) เป็นต้น โดยรูปการพิบัติของตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 14 และรูปที่ 15 สำหรับการทดสอบ 3 จุด และ 4 จุด ตามลำดับ

3.4 ค่าโมเมนต์ดัดและการโก่งตัว

ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่วิเคราะห์ได้จากแรงกระทำสูงสุดที่บันทึกค่าจากการทดสอบสามารถคำนวณได้ด้วยหลักการโดยการเขียนแผนภาพของโมเมนต์ดัด (Bending Moment Diagram) ของคานอย่างง่าย ตามรูปที่ 16 และสมการที่ 1 และ 2 สำหรับการทดสอบด้วยแรงกระทำแบบ 3 จุด และแบบ 4 จุด ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 17 ซึ่งเป็นตารางและรูปสรุปค่าที่ได้จากการทดสอบและคำนวณดังกล่าวข้างต้น



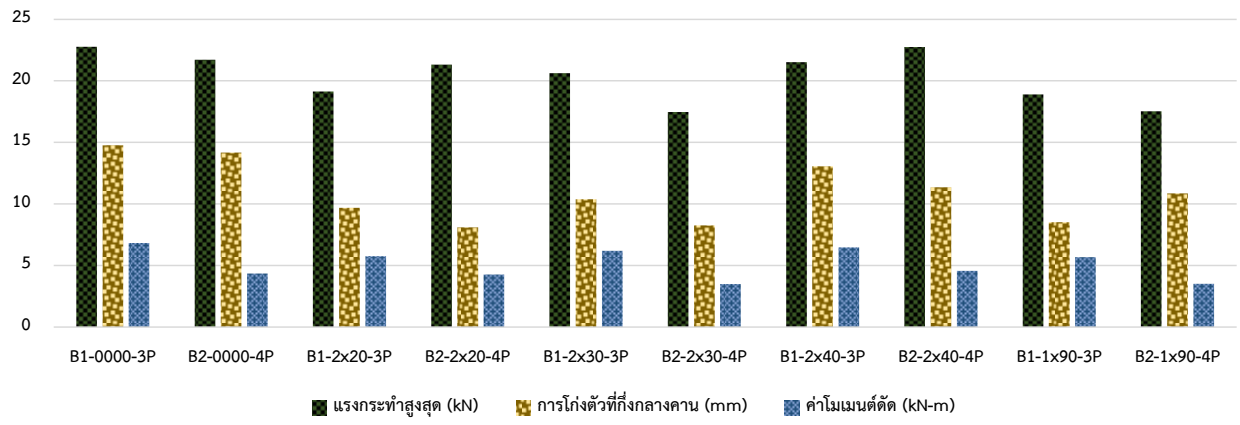
รูปที่ 16 แผนภาพโมเมนต์ดัด สำหรับการทดสอบ 3 จุด และ 4 จุด

$$M_{MAX} = \frac{P}{2}a \quad (1)$$

$$M_{MAX} = \frac{P}{2}b \quad (2)$$

ตารางที่ 2 ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้การการทดสอบ

รหัส	แรงกระทำสูงสุด (kN)	การโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (mm)	ค่าโมเมนต์ดัด (kN-m)
B1-0000-3P	22.77	14.77	6.83
B1-2x20-3P	19.14	9.69	5.74
B1-2x30-3P	20.63	10.38	6.19
B1-2x40-3P	21.52	13.06	6.46
B1-1x90-3P	18.89	8.50	5.67
B2-0000-4P	21.71	14.17	4.34
B2-2x20-4P	21.33	8.10	4.27
B2-2x30-4P	17.47	8.25	3.50
B2-2x40-4P	22.75	11.36	4.55
B2-1x90-4P	17.52	10.85	3.50



รูปที่ 17 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบ

จากตารางที่ 2 ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างที่ทำการทดสอบแบบ 3 จุด และ 4 จุด คือ ตัวอย่าง B1-0000-3P และ B2-0000-4P มีค่าเท่ากับ 6.83 กิโลนิวตัน-เมตร และ 4.34 กิโลนิวตัน-เมตร ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างคานทั้งสองเป็นตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีโฟม ในส่วนของคานตัวอย่างที่ถูกแทนที่ด้วยโฟม B1-2x40-3P และ B2-2x40-4P มีค่าของโมเมนต์ดัดที่ใกล้เคียงกับคานตัวอย่างควบคุม โดยมีความแตกต่างกัน (น้อยกว่าคานควบคุม) ประมาณ 5.42 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดสอบ 3 จุด และมีความแตกต่างกัน (มากกว่าคานควบคุม) ประมาณ 4.84 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดสอบ 4 จุด ซึ่งเป็นตัวอย่างคานเพียงตัวอย่างเดียวที่มีค่าของแรงกระทำสูงสุด และค่าของโมเมนต์ดัดที่สูงกว่าคานควบคุม ทำให้เป็นกรณีที่น่าสนใจในการไปทำการศึกษาต่อไป และสำหรับตัวอย่างที่รับแรงกระทำได้น้อยที่สุดหรือมีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดน้อยที่สุดจากแต่ละรูปแบบของการทดสอบนั้นคือ B1-1x90-3P และ B2-1x90-4P ซึ่งเป็นตัวอย่างที่คอนกรีตถูกแทนที่ด้วยโฟมตลอดความยาว 90 เซนติเมตร โดยไม่แบ่งเป็นสองส่วน ซึ่งในเบื้องต้นได้แสดงให้เห็นว่า การใส่โฟมเป็นช่วง 2 ช่วง คานตัวอย่างสามารถรับแรงกระทำได้ดีกว่าใส่ตลอดความยาว

3.5 น้ำหนักกับแรงกระทำ

น้ำหนักของคานที่ได้จากการวัดก่อนที่จะทำการทดสอบถูกนำมาแสดงพร้อมกับแรงกระทำที่รับได้ของตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าน้ำหนักของคานตัวอย่างกับแรงกระทำ

รหัส	แรงกระทำสูงสุด (kN)	ความต่างแรงกระทำสูงสุด (%)	น้ำหนักคาน (kg)	ความต่างของน้ำหนัก (%)
B1-0000-3P	22.77	0.00	44.48	0.00
B1-2x20-3P	19.14	15.95	43.24	2.79
B1-2x30-3P	20.63	9.42	42.63	4.16
B1-2x40-3P	21.52	5.52	42.01	5.55
B1-1x90-3P	18.89	17.04	41.74	6.16
B2-0000-4P	21.71	0.00	44.51	0.00
B2-2x20-4P	21.33	1.76	43.24	2.85
B2-2x30-4P	17.47	19.52	42.60	4.29
B2-2x40-4P	22.75	-4.77	42.35	4.85
B2-1x90-4P	17.52	19.31	42.00	5.64

จากตารางที่ 3 พบว่า ปริมาณโฟมที่ใช้ในการแทนที่คอนกรีตในคานตัวอย่างมีผลต่อความสามารถในการรับแรงของคาน นั่นหมายถึงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของคานตัวอย่างเนื่องจากการแทนที่คอนกรีตด้วยโฟมจะมีผลต่อการรับแรงกระทำหรือโมเมนต์ดัดของตัวอย่างคานนั่นเอง น้ำหนักของคานที่ลดลงในขณะที่ขนาดยังคงเดิม ส่งผลให้คานตัวอย่างส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่จะรับแรงกระทำได้น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุม (แถบสีเข้ม) ตามสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่ลดลง แต่ก็จะพบว่าตัวอย่าง B1-2x40-3P และ B2-2x40-4P มีความสามารถในการรับแรงกระทำที่ไม่สอดคล้องกับที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งตัวอย่างทั้งสองมีความสามารถในการรับแรงได้ใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม และมากกว่าตัวอย่าง B1-2x30-3P หรือ B2-2x30-4P เป็นต้น ซึ่งมีน้ำหนักที่มากกว่าหรือมีปริมาณโฟมน้อยกว่า โดยตัวอย่างที่กล่าวมาทั้งหมดมีความแตกต่างกันในการวางตำแหน่งของโฟม

4. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่คอนกรีตถูกแทนที่ด้วยโฟมบางส่วนภายใต้แรงกระทำแบบ 3 จุด และ 4 จุด โดยมีตัวแปรก็คือรูปแบบของการจัดวางตำแหน่งของโฟมที่ใช้ในการแทนที่คอนกรีต ตลอดจนรูปแบบของวิธีการทดสอบ และจากผลการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตที่นำเสนอมาข้างต้นทั้งหมด สามารถที่จะสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

4.1) ผลตอบสนองและพฤติกรรมของคานตัวอย่างที่มีโฟมและไม่มีโฟม ในช่วงแรกของการให้แรงกระทำจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน และเริ่มมีความแตกต่างในช่วงก่อนที่คานตัวอย่างจะรับแรงกระทำสูงสุด

4.2) การใส่โฟมเพื่อแทนที่คอนกรีตบางส่วนมีผลต่อการโก่งตัวของคานเมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างควบคุม (คานที่ไม่มีโฟม) โดยจะมีการโก่งตัวได้น้อยลงอยู่ในช่วงประมาณ 11.57 ถึง 42.45 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าคานมีความยืดหยุ่นน้อยลง

4.3) ความสามารถในการรับแรงกระทำสูงสุดของคานที่คอนกรีตถูกแทนที่ด้วยโฟมมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคานตัวอย่าง โดยลดลงมากสุด 17.04 เปอร์เซ็นต์ และ 19.30 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดสอบแบบ 3 จุด และ 4 จุด ตามลำดับ (เทียบกับคาน B1-0000-3P และ B2-0000-4P) และเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ลดลง 6.16 และ 5.64 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักของคานมีผลต่อการรับแรงกระทำ

4.4) คานตัวอย่าง B1-2x40-3P และ B2-2x40-4P สำหรับการทดสอบแบบ 3 จุด และ 4 จุด ตามลำดับ สามารถรับแรงกระทำ หรือค่าโมเมนต์ ได้เท่ากับ 6.46 กิโลนิวตัน-เมตร และ 4.55 กิโลนิวตัน-เมตร ซึ่งใกล้เคียงกับค่าการรับน้ำหนักของคานตัวอย่าง ในเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่ารูปแบบและตำแหน่งของการวางตำแหน่งโฟมมีผลต่อความสามารถในการรับแรงกระทำ หรือโมเมนต์ดัด

4.5) การเสียหายของคานจากการทดสอบมีรูปแบบที่เกิดขึ้นคือ ความเสียหายเนื่องจากแรงดัด มีลักษณะการแตกร้าวในแนวดิ่งตรงตำแหน่งใต้แรงกระทำ และความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือนมีลักษณะการแตกร้าวในแนวเอียงทำมุมกับแนวราบในตำแหน่งที่ที่ห่างจากตำแหน่งที่แรงกระทำ และค่อยๆเอียงทำมุมเข้าหาตำแหน่งที่แรงกระทำ แสดงให้เห็นว่าการใส่โฟมภายในนอกจากมีผลต่อพฤติกรรมการดัดแล้ว ยังมีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงเฉือนด้วย

5. ข้อเสนอแนะ

5.1) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในคานตัวอย่างที่มีขนาดหน้าตัดที่ใหญ่ขึ้นและมีความยาวมากขึ้นหรืออาจจะมีขนาดเท่าขนาดจริง เนื่องจากสามารถที่จะจัดตำแหน่งของโฟมเพื่อแทนที่คอนกรีตในคานตัวอย่างได้หลากหลายรูปแบบมากขึ้น

5.2) ควรมีการศึกษาผลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม อย่างเช่น ขนาดของเหล็กที่ใช้ หรือระยะห่างของเหล็กปลอก เป็นต้น

5.3) ควรมีการศึกษาด้วยแบบจำลองทางไฟไนท์เอลิเมนต์เพิ่มเติม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยส่วนนี้ต้องขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดสงขลา ในการสนับสนุนห้องปฏิบัติการและเครื่องมือในการทดสอบ และขอบคุณทีมงานทุกท่าน ได้แก่ นายกีรติ มูณีวรรณ, นายนิรัติศัย สุขขาว และนายอันดามัน อาดำ

เอกสารอ้างอิง

[1] Kumar, M., Khare, G.P. and Sahu, P. (2019). Flexural behaviour of RCC beam with Partially replaced concrete below neutral axis. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 06, 03, pp. 619-624.

[2] Balaji, G. and Vetturayasudharsanan, R. (2020). Experimental investigation on flexural behaviour of RC hollow beams. *Materials Today: Proceedinds*, 21, Part 1, 2020, pp. 351-356.

[3] Elamary, A.S., Sharaky, I.A. and Alqur, M. (2021). Flexural behaviour of hollow concrete beams under three points loading: Experimental and numerical study. *Structures 32*, pp.1543-1552.

[4] Manikandan, S., Dharmar, S. and Robertravi, S. (2015). Experimental study on flexural behaviour of reinforce concrete hollow core sandwich beams. *International Journal of Advance Research In Science And Engineering (IJARSE)*, 4, Special Issue (01), March, pp. 937-946.

[5] Sirisonthi, A., Julphunthong, P., Joyklad. P., Suparp, S., Ali, A., Javid, M.A., Chaiyasarn, K. and Hussian, Q. (2021). Structural Behavior of Large-Scale Hollow Section RC Beams and Strength Enhancement Using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composites. *Journal of Polymer*, 14, 158, pp. 1-22.

[6] มาตรฐานอุตสาหกรรม, เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต : เหล็กเส้นกลม มอก.20-2559, [Online], https://www.tisi.go.th/data/standard/fulltext/TIS-20-2559p.pdf [18 มิ.ย. 2560]

[7] นพดล สุยะหลาน และ ประกิต ชมชื่น (2563). พฤติกรรมการดัดของคานเหล็กกล่องกลวงที่มีการเติมคอนกรีตบางส่วน. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25*, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า 986-991.

[8] ปิยะพงษ์ วงค์เมธา, ชยานนท์ หรรษภิญโญ, รัฐพล เกติยศ และ กิตติคุณ จิตไพโรจน์ (2564). พฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็กมากเกินพอดีภายใต้แรงกระทำแบบวนซ้ำ. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26*, กรุงเทพมหานคร, 23-25 มิถุนายน 2564, Online Conference, หน้า STR-15-1 -STR-15-6.

[9] พิพรรธ คุณความสุข, พงศธร คำภาแย่, โยธิน บัวชุม, Mengky Sorn, Chhaya Samhean, สรศักดิ์ เชียวศิริกุล และ มานิตย์ จรูญธรรม (2564). การเพิ่มความลึกของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26*, กรุงเทพมหานคร, 23-25 มิถุนายน 2564, Online Conference, หน้า STR-09-1- STR-09-4.