พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานเหล็กปีกกว้างภายหลังได้รับความร้อนเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

Flexural behavior of Post-fire wide-flanged Steel Beam strengthened with carbon fiber reinforced polymer plates.

ไพโรจน์ แซ่ตั้ง* สายันต์ ศิริมนตรี,ชนะชัย ทองโฉม และ นรวิชญ์ หมั่นกิจ
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จ.ปทุมธานี
**Corresponding author; E-mail address: phairot.saet@gmail.com*

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเสริมกำลังคานเหล็กที่ได้รับความร้อนซึ่งส่งผลให้กำลังรับของคานเหล็กลดลง การเสริมกำลังโครงสร้างเป็นประเด็นสำคัญที่วิศวกรต้องเผชิญในปัจจุบัน โดยวัสดุ CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) ได้รับความนิยมในการเสริมกำลังเนื่องจากคุณสมบัติที่ดี เช่น ความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา และทนทานต่อการกัดกร่อน งานวิจัยนี้ได้ทดสอบคานที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ได้รับความร้อนในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ได้แก่ อุณหภูมิห้อง และ 900 องศาเซลเซียส โดยมีตัวอย่างทั้งหมด 6 ตัวอย่าง แบ่งเป็นคานควบคุมที่ไม่เสริมกำลัง 2 ตัวอย่าง คานที่เสริมกำลัง 2 ตัวอย่าง คานที่เสริมกำลังพร้อมด้วยมีรอยบากที่จุกกึ่งกลาง 2 ตัวอย่าง การทดลองพบว่า การเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีผลในการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถเพิ่มความทนทานและประสิทธิภาพของคานได้แม้จะเผชิญกับอุณหภูมิสูง ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการใช้วัสดุ CFRP ในการเสริมกำลังคานเหล็กในสภาพแวดล้อมที่ได้รับความร้อนสูง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างเหล็กในสภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างมาก

คำสำคัญ: พฤติกรรมการรับแรงดัด, พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน, เสริมกำลัง, อุณหภูมิ

Abstract

In this research, the strengthening of steel beams subjected to elevated temperatures, which reduce their load-bearing capacity, was investigated. Structural strengthening is a significant issue currently faced by engineers, with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) becoming popular for strengthening applications due to its advantageous properties, such as high strength, lightweight, and corrosion resistance. The study tested externally strengthened steel beams using fiber-reinforced polymer sheets under different heating conditions, specifically at room temperature and 900°C. A total of six specimens were tested, consisting of two unstrengthened control beams, two strengthened beams, and two strengthened beams with a central notch. The experimental results showed that strengthening with fiber-reinforced polymer sheets significantly improved the load-bearing capacity, durability, and performance of the beams, even under high-temperature conditions. These findings demonstrate the advantages of using CFRP materials for strengthening steel beams in environments exposed to elevated temperatures, highlighting potential applications in designing and enhancing steel structures subjected to substantial temperature variations.

Keywords: The behavior of the bending strength, carbon fiber reinforced polymer, Temperature

1. คำนำ

โครงสร้างโดยทั่วไปจะมีความหลากหลายยกตัวอย่างเช่น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างไม้ หรือโดยเฉพาะโครงสร้างเหล็ก โครงสร้างเหล็กจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกับคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะในเรื่องของโอกาสในการสัมผัสเพลิงไหม้กับเหล็ก จะทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไปได้ง่าย หรือผลเรื่องกำลังโครงสร้างเหล็กได้ง่ายกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพราะโครงสร้างเหล็กมีตัวฉนวนค่อนข้างสูง อาจจะทำให้โครงสร้างมีความเสียหายหรือมีการลดกำลังได้จากการได้รับความร้อน

จาก Guo และคณะ(2023) [3] จากงานวิจัยมีการทดลองคานเหล็กที่มีรอยบากที่เสริมกำลังด้วย CFRP ที่อุณหภูมิใช้งานทั่วไป (-20 ถึง 80) แรงดึงที่ทำให้เกิดการหลุดลอกของวัสดุเสริมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก −20 °C ถึง 60 °C และลดลงเมื่ออุณหภูมิถึง 80 °C โดยขาดการทดลองเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิสูง

จาก Prasertsri และคณะ(2020) [1] การรับแรงดัดของคานเหล็กที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP แบบติดตั้งบางส่วน โดยมีการเจตนาใส่จุดบกพร่องของการยึดติด (initial bond defect) จุดบกพร่องเริ่มต้นทำให้รูปแบบการวิบัติเปลี่ยนจากการขาดของเส้นใย CFRP ไปเป็นการหลุดลอกของแผ่น CFRP ที่บริเวณกลางคาน ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังลดลงตามขนาดของจุดบกพร่องและเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ในคานที่เกิดความเสียหายล่วงหน้า โดยเฉพาะกรณีที่ปีกล่างของคานเกิดการคราก่อนติดตั้ง CFRP ทั้งนี้ จุดบกพร่องไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดและดัชนีความเหนียวโดยรวมอย่างมีนัยสำคัญ

จาก Lenwari และคณะ (2005) การดัดของคานเหล็กรีดที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ติดตั้งบางส่วน พบว่ารูปแบบการวิบัติขึ้นอยู่กับความยาวของแผ่น โดยแผ่นสั้นมักเกิดการหลุดลอก ในขณะที่แผ่นยาวเกิดการขาดบริเวณกึ่งกลางคาน พฤติกรรมที่สำคัญที่วิเคราะห์ได้แก่ ความเครียดดึงในแผ่น CFRP ความสัมพันธ์โมเมนต์-ความโค้ง และแรง-การโก่งตัวของคาน วิธีการวิเคราะห์เชิงกลที่ใช้ประกอบการศึกษาประกอบด้วยการวิเคราะห์ shear lag การวิเคราะห์หน้าตัด และการใช้หลักการ virtual work ผลการ

ทดลองพบว่ามีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีอย่างมีนัยสำคัญ

แน่นอนว่าในปัจจุบันมีเทคนิคหลากหลายในการเสริมกำลัง ไม่ว่าจะเป็นการใช้เหล็ก การขยายหน้าตัด หรือเป็นการทุบทิ้งแล้วสร้างใหม่ แต่เนื่องจากปัจจุบันมีวัสดุใหม่ที่เป็นทางเลือกและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน เช่น แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย *[2]* ซึ่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะมีอยู่หลากหลายประเภทขึ้นอยู่กับไฟเบอร์ที่เราใช้ อย่างเช่น *Aramic fiber Glass fiber* หรือ *carbon fiber* เนื่องด้วยคาร์บอนไฟเบอร์มีค่ากำลังค่อนข้างสูง และค่า *E* เทียบเท่าเท่ากับเหล็ก ดังนั้น ในการเสริมกำลังโครงสร้างเหล็ก เป็นตัวเลือกที่ดี เนื่องด้วยมีน้ำหนักเบาและมีกำลังรับแรงดึงต่อน้ำหนักค่อนข้างสูง [1]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้แผ่น *CFRP [5]* มาเสริมกำลังโครงเหล็กไวด์แฟรงค์หรือเหล็กปีกกว้างในการรับแรงดัดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานแรงดัด ชะลอการสูญเสียกำลังและความแข็งแรงของโครงสร้างเมื่อได้รับความร้อนจากเพลิงไหม้ ลดโอกาสเกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติวัสดุเหล็กเนื่องจากอุณหภูมิสูง และยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง โดยเฉพาะการเสริมบริเวณที่เกิดการเสียหายหรือบริเวณที่ต้องการเพิ่มความสามารถในการรับแรงเพิ่มเติม [3] เพื่อให้โครงสร้างเหล็กมีเสถียรภาพและปลอดภัยในการใช้งานมากขึ้น รวมทั้งช่วยลดต้นทุนและระยะเวลาในการซ่อมแซมหรือเสริมกำลัง เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการเสริมกำลังแบบดั้งเดิม เช่น การขยายหน้าตัดหรือการเปลี่ยนชิ้นส่วนเหล็กใหม่ทั้งหมด

2. ตัวอย่างคานทดสอบ

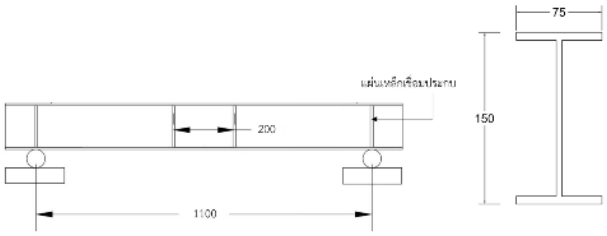
ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานภายหลังของการได้รับความร้อนและเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ตัวแปรที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้จะประกอบด้วย อุณหภูมิ (RT , 900℃) ความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) ขนาด 1.2 มิลลิเมตร และรอยบากหรือช่องรอยเจาะกึ่งกลางคาน คานทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นคานเหล็กรูปพรรณรีดร้อนหน้าตัดรูปตัวเอช (Wide flange) มีการเสริมเหล็กแผ่นเหล็กข้างบนปีกรับแรงอัดเพื่อให้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนรับแรงดึงได้เต็มที่โดยไม่พักที่ปีกรับแรงอัดก่อน ทั้งหมดจำนวน 6 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็นคานตัวอย่างควบคุม (คานที่ไม่เสริมกำลัง) จำนวน 2 ตัวอย่าง เช่น คานอุณหภูมิห้อง คานอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ตาม ISO834 [4] กลุ่มคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) จำนวน 2 ตัวอย่าง และกลุ่มคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP)ที่มีรอยบาก จำนวน 2 ตัวอย่าง ดังแสดงใน ***ตารางที่ 1***

ตารางที่ 1 ตัวอย่างคานทดสอบ

คานตัวอย่าง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	CFRP 1.2 มิลลิเมตร	รอยบาก
B	อุณหภูมิห้อง	-	-
B900	900	-	-
BF	อุณหภูมิห้อง	✔	-
BF900	900	✔	-
BNF	อุณหภูมิห้อง	✔	✔
BNF900	900	✔	✔

2.1 คานตัวอย่าง B B-900

มีขนาดของคานเหล็กที่ ความยาว 1300 มิลลิเมตร สูง 150 มิลลิเมตร กว้าง 75 มิลลิเมตร ทำการให้ความร้อนอยู่ที่อุณหภูมิห้อง 700 และ900 ตามลำดับ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง



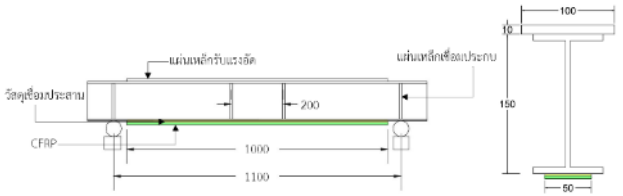
รูปที่ 1 แบบคานตัวอย่างควบคุม (คานที่ไม่เสริมกำลัง)

2.2 คานตัวอย่าง BF BF-900

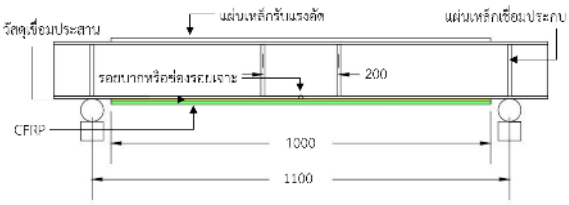
มีขนาดของคานเหล็กที่ ความยาว 1300 มิลลิเมตร สูง 150 มิลลิเมตร กว้าง 75 มิลลิเมตร ทำการให้ความร้อนอยู่ที่อุณหภูมิห้อง 700 และ900 ตามลำดับ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง และเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน มีขนาดอยู่ที่ ความยาว 1000 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร และความหนาอยู่ที่ 1.2 มิลลิเมตร

2.3 คานตัวอย่าง BNF BNF-900

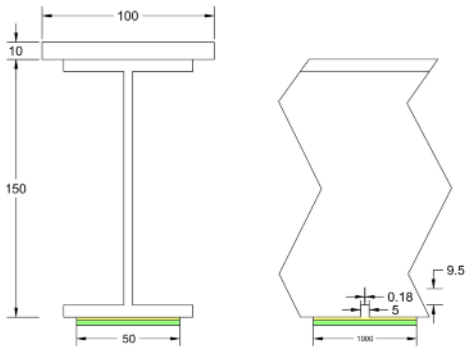
มีขนาดของคานเหล็กที่ ความยาว 1300 มิลลิเมตร สูง 150 มิลลิเมตร กว้าง 75 มิลลิเมตร ทำการให้ความร้อนอยู่ที่อุณหภูมิห้อง และ 900 เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง และเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน มีขนาดอยู่ที่ ความยาว 1000 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร และความหนาอยู่ที่ 1.2 มิลลิเมตร และมีรอยบากที่จุดกึ่งกลาง 2 รอยได้แก่ 1.มีขนาดความกว้างที่ 5 มิลลิเมตร สูง 7 มิลลิเมตร 2.มีขนาดความกว้างที่ 0.18 มิลลิเมตร สูง 9.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 2 แบบตัวอย่างคานเสริมกำลัง



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 แบบตัวอย่างคานเสริมกำลังและมีรอยบาก (ก) แนวยาว (ข) แนวลึก

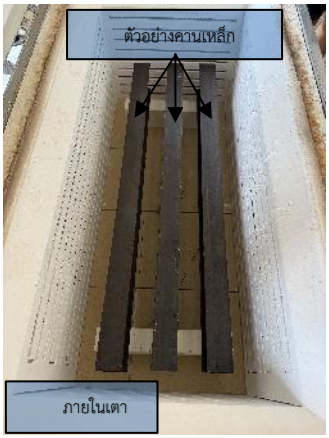
2.4 การให้ความร้อน

การทดสอบนี้ใช้เตาเผาแบบไฟฟ้าขนาด 140 × 60 × 50 เซนติเมตร การให้ความร้อนจะแบ่งออกเป็น 3 ตัวอย่าง จะใช้ 1 อุณหภูมิ ได้แก่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งจะแบ่งออกตามการเสริมกำลัง ได้แก่ ไม่เสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน เสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน และเสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีรอยบาก แสดงดังใน **ตารางที่ 1**

หลังจากการให้ความร้อนเสร็จตามกำหนดแล้ว ทำการปล่อยเย็นตัวในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน เพื่อให้อุณหภูมิของตัวอย่างคงที่ที่อุณหภูมิห้อง พร้อมที่จะทำการทดสอบ



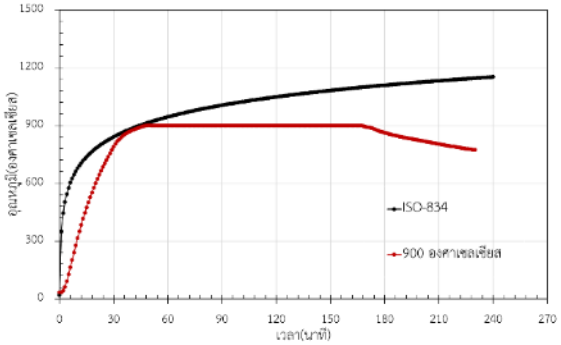
(ก)



(ข)

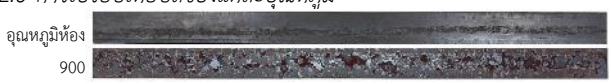
รูปที่ 3 (ก) เตาเผาภายนอก , (ข) การติดตั้งตัวอย่างการทดสอบภายในเตาเผา

2.5 กราฟเปรียบเทียบแต่ละอุณหภูมิ



รูปที่ 4 กราฟการเปรียบเทียบแต่ละอุณหภูมิ

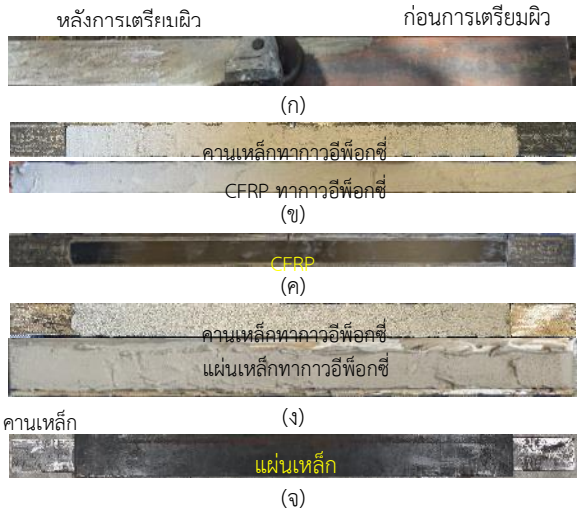
2.6 การเปรียบเทียบสีของแต่ละอุณหภูมิ



รูปที่ 5 สีของตัวอย่างหลังจากการถูกเผาไฟตามอุณหภูมิ

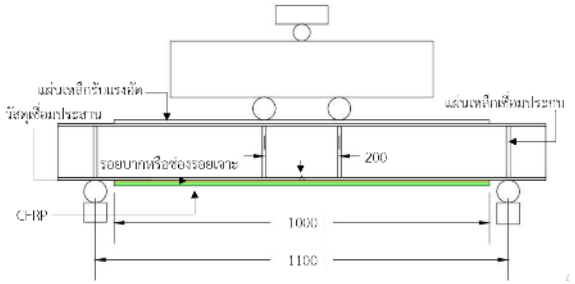
2.7 การเสริมกำลัง Strengthening

สำหรับคานตัวอย่างควบคุม (ไม่เสริมกำลัง) ประกอบไปด้วย 2 คานตัวอย่าง คานที่เสริมกำลัง ประกอบด้วย 2 ตัวอย่าง และคานเสริมกำลังที่มีรอยบาก 2 ตัวอย่าง ภายหลังคานตัวอย่างเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง คานตัวอย่างที่เผาไฟทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ที่พื้นผิวด้านล่างของแต่ละคานทดสอบ พื้นผิวด้านล่างของคานได้ถูกการเตรียมพื้นผิวโดยเทคนิค Acetone และ Sandblasted เพื่อขจัดสารเคลือบออกไซด์ เพื่อให้แน่ใจว่ามีความเข้ากันได้ทางเคมีกับกาว ก่อนที่จะยึดติดกับพื้นผิวเหล็กแผ่น CFRP ได้รับการทำความสะอาดอย่างระมัดระวังด้วย Acetone โดยใช้ผ้ากอซหลังจากนั้นแผ่น CFRP จะถูกยึดติดกับกาว (อีพ็อกซี่) กับคานเหล็กภายในครึ่งชั่วโมงเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดออกซิเดชันของพื้นผิวเหล็ก น้ำหนักกาวอีพ็อกซี่เฉลี่ยสำหรับแต่ละคานตัวอย่างคือ 22.8 กรัม ดังนั้นความหนาเฉลี่ยประมาณ 0.37 มิลลิเมตร



รูปที่ 6 (ก) เตรียมผิวก่อนติดกาวอีพ็อกซี่ (ข) ทากาวอีพ็อกซี่ลงบน CFRP (ค) ติด CFRP (ง) ทากาวลงบนแผ่นเหล็ก (จ) ติดแผ่นเหล็ก

2.8 การติดตั้งการทดสอบคานเหล็ก



(ก)



(ข)

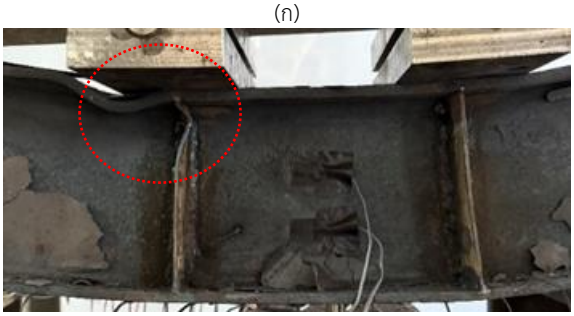
รูปที่ 7 (ก) ตัวอย่างภาพวาดการทดสอบ (ข) ตัวอย่างภาพจริงการทดสอบ

3. ผลการทดลอง

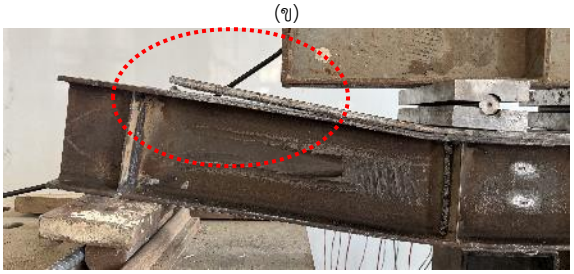
3.1 Failure mode



(ก)



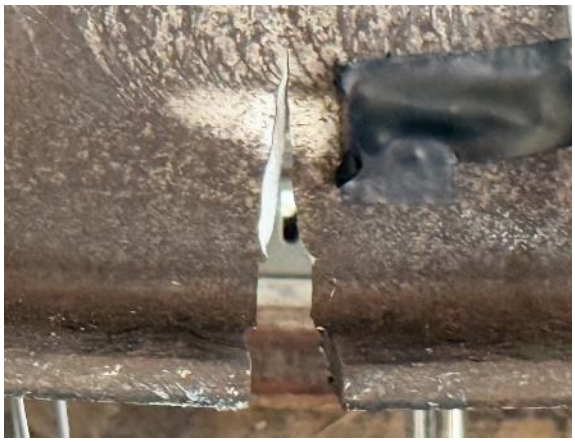
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 8 (ก) การแอ่นตัวของคาน (ข) การโก่งเดาะเฉพาะจุด (ค) การหลุดลอกของแผ่นเหล็ก (ง) การหลุดลอกของ CFRP (จ) การฉีกขาดของรอยบาก

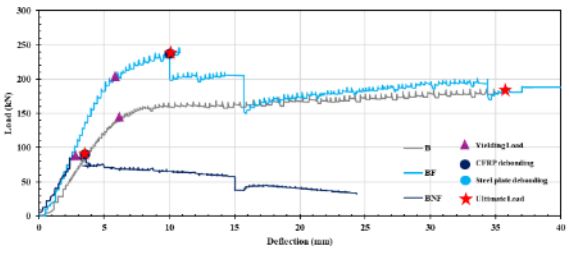
จากรูปที่ 8 คานที่ไม่ได้เสริมกำลังจะพบว่าเกิดการแอ่นตัวตามแบบการคำนวณที่อุณหภูมิห้อง และเกิดการโก่งเดาะเฉพาะจุด เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 900 องศาเซลเซียส แบบมีนัยสำคัญ

คานที่เสริมกำลัง จะเกิดการแอ่นตัวเป็นไปตามแบบคำนวณและ มีการหลุดลอกของแผ่นเหล็กด้านบนและแผ่น CFRP เริ่มที่ปลายแผ่นจนถึงคานที่การรับน้ำหนักสูงสุดจะเกิดการหลุดลอกทั้งแผ่น

คานที่เสริมกำลังที่มีรอยบาก เมื่อคานเหล็กที่อุณหภูมิห้องรับน้ำหนักได้สูงสุดจะเกิดการหลุดลอกของ CFRP ทั้งแผ่น ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีการหลุดลอกของแผ่นเหล็กด้านบนและแผ่น CFRP เริ่มที่ปลายแผ่นจนถึงการรับน้ำหนักสูงสุดจะเกิดการหลุดลอกทั้งแผ่น สำหรับรอยบากจะเกิดการฉีกขาดที่แกนกลางขึ้นไปตามน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ

3.2 Load-Deflection Relationship

3.2.1. คานควบคุมอุณหภูมิห้อง

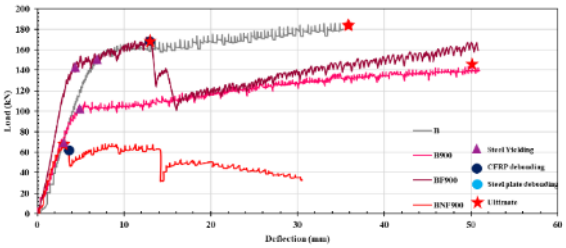


คานควบคุมที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง (B) สามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้ที่ 185.6 kN ซึ่งใช้เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบหลัก ในขณะที่คานที่ได้รับ

การเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ที่อุณหภูมิห้อง (BF) มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 245.6 kN หรือคิดเป็นร้อยละ 132.3 ของคานควบคุม โดยเกิดการหลุดลอกของแผ่น CFRP ครั้งแรกที่น้ำหนัก 245.6 kN ที่ค่าการแอ่นตัว 10.74 มม. และเกิดการหลุดลอกครั้งที่สองที่แผ่นเหล็กเสริมกำลังด้านบนของคานที่น้ำหนัก 204.3 kN ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 110.0 ของคานควบคุม ที่ค่าการแอ่นตัว 15.71 มม.

ในกรณีของคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP และมีรอยบาก (BNF) พบว่ามีน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเพียง 93.3 kN ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 50.3 ของคานควบคุม แสดงให้เห็นถึงผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจากรอยบากที่ลดทอนประสิทธิภาพของการเสริมกำลัง โดยเกิดการหลุดลอกของแผ่น CFRP ครั้งแรกที่น้ำหนักเท่ากันกับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดคือ 93.3 kN ที่ค่าการแอ่นตัว 3.79 มม. และหลุดลอกครั้งที่สองที่แผ่นเหล็กเสริมกำลังด้านบนของคานที่น้ำหนัก 57.8 kN คิดเป็นร้อยละ 31.1 ของคานควบคุม ที่ค่าการแอ่นตัว 14.99 มม.

3.2.2. คานอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส



คานควบคุมที่ไม่ได้รับการเสริมกำลังที่อุณหภูมิห้อง (B) สามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้ 185.6 kN ขณะที่คานควบคุมที่ไม่ได้เสริมกำลังแต่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 900 ℃ (B900) รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลงเหลือ 144.0 kN หรือคิดเป็นร้อยละ 77.6 ของคาน B แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของคานเหล็ก

สำหรับคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ที่อุณหภูมิ 900 ℃ (BF900) มีน้ำหนักบรรทุกสูงสุดอยู่ที่ 178.8 kN หรือคิดเป็นร้อยละ 96.3 ของคาน B หรือคิดเป็นร้อยละ 62.6 ของคาน BF แม้จะได้รับความร้อนในระดับสูง แต่การเสริมกำลังด้วย CFRP ยังคงช่วยฟื้นฟูความสามารถในการรับน้ำหนักได้ในระดับใกล้เคียงกับคานที่ไม่ได้รับความร้อน โดยเกิดการหลุดลอกของแผ่น CFRP ครั้งแรกที่น้ำหนัก 160.1 kN (ร้อยละ 86.3 ของคาน B) ที่ค่าการแอ่นตัว 13.26 มม. และเกิดการหลุดลอกครั้งที่สองที่แผ่นเหล็กเสริมกำลังด้านบนของคานที่น้ำหนัก 139.0 kN (ร้อยละ 74.9) ที่ค่าการแอ่นตัว 14.95 มม.

ในกรณีของคานเสริมกำลังที่มีรอยบากและได้รับความร้อนที่ 900 ℃ (BNF900) มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเพียง 70.3 kN หรือคิดเป็นร้อยละ 37.9 ของคาน B หรือคิดเป็นร้อยละ 67.2 ของคาน BNF ซึ่งลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุม โดยเกิดการหลุดลอกของแผ่น CFRP ครั้งแรกที่น้ำหนัก 58.3 kN (ร้อยละ 31.4) ที่ค่าการแอ่นตัว 3.65 มม. และหลุดลอกครั้งที่สองที่แผ่นเหล็กเสริมกำลังด้านบนคานที่น้ำหนัก 61.8 kN (ร้อยละ 33.3) ที่ค่าการแอ่นตัว 14.19 มม.

คานที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ที่อุณหภูมิห้อง (BF) มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 245.6 kN

ตารางที่ 2 ผลการทดลอง

name	Load yield (kN)	Deflection at yield point (mm)	Ultimate load (kN)	Deflection at Ultimate load (mm)	First Debond (kN)	Deflection at First Debond (mm)	Second Debond (kN)	Deflection at Second Debond (mm)
B	150.8	6.72	185.7	36.51	-	-	-	-
B900	103.5	4.84	144.0	50.11	-	-	-	-
BF	203.8	6.11	245.7	10.74	245.7	10.74	204.3	15.71
3F900	144.2	4.24	178.8	68.84	160.2	13.26	139.0	14.95
BNF	84.7	3.21	93.3	3.79	93.3	3.79	57.8	15.00
NF900	65.5	2.92	70.3	3.16	58.3	3.66	61.8	14.19

4. สรุปผล

ผลกระทบของการเสริมกำลัง คานที่ได้รับการเสริมกำลังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้มากกว่าคานที่ไม่ได้เสริมกำลังในทุกอุณหภูมิ คานที่เสริมกำลังโดยไม่มีรอยบาก (BF) มีความสามารถในการรับน้ำหนักที่ดีขึ้นชัดเจน คานที่มีรอยบาก (BNF) มีความสามารถในการรับน้ำหนักลดลงเมื่อเทียบกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง ผลกระทบของอุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของคานลดลง คานที่ไม่ได้เสริมกำลังมีแนวโน้มลดความสามารถในการรับน้ำหนักมากกว่าคานที่เสริมกำลังเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น รูปแบบของการหลุดลอก คานเสริมกำลังมีการหลุดลอกของวัสดุเสริม (CFRP และแผ่นเหล็ก) ที่เกิดขึ้นในจุดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและการเสริมกำลัง การหลุดลอกครั้งแรกมักเกิดขึ้นที่ CFRP และการหลุดลอกครั้งที่สองที่แผ่นเหล็ก คานที่อุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น คานที่เสริมกำลังยังคงมีความสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิ 900℃ คานเสริมกำลัง (BF900) มีค่าการรับน้ำหนักสูงสุดลดลงเมื่อเทียบกับคานเสริมกำลังที่อุณหภูมิห้อง โดยรวมแล้วคานเสริมกำลังสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนัก แต่ยังคงได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิสูงและมีโอกาสเกิดการหลุดลอกของวัสดุเสริมที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ

ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง กลไกการหลุดลอกของแผ่น CFRP มีความซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากกาวที่ใช้ยึดแผ่น CFRP กับเหล็กมักจะสูญเสียคุณสมบัติความแข็งแรงเมื่ออุณหภูมิเกินจุดอ่อนตัว (glass transition temperature) ส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายแรงลดลง โดยเฉพาะกาวประเภทอีพ็อกซี่ที่มีความไวต่ออุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การขยายตัวที่แตกต่างกันระหว่าง CFRP และเหล็กก่อให้เกิดแรงเค้นเฉือนภายในที่รอยต่อ ซึ่งนำไปสู่การ debonding ก่อนถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุด นอกจากนี้ การมีรอยบากในคานยังเป็นจุดอ่อนที่เร่งการเริ่มต้นของรอยร้าวและการหลุดลอกได้เร็วยิ่งขึ้น

ด้วยเหตุนี้ ในการออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างเหล็กที่อาจเผชิญกับสภาวะอุณหภูมิสูง ควรให้ความสำคัญกับพฤติกรรมของวัสดุเสริมและสารยึดติดภายใต้ความร้อน เพื่อให้แน่ใจว่าระบบเสริมกำลังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยในสถานการณ์จริง

ผลกระทบของการให้ความร้อนต่อค่า Load Yield คานที่ไม่ได้เสริมกำลัง เมื่อได้รับความร้อนที่ 900°C ค่า Load Yield ลดลง 31.38% เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิห้อง คานที่เสริมกำลัง เมื่อได้รับความร้อนที่ 900°C ค่า Load Yield ลดลง 29.26% เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิห้อง

ผลกระทบของการให้ความร้อนต่อค่า Ultimate Load คานที่ไม่ได้เสริมกำลัง เมื่อได้รับความร้อนที่ 900°C ค่า Ultimate Load ลดลง 22.44% เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิห้อง คานที่เสริมกำลัง เมื่อได้รับความร้อนที่ 900°C ค่า Ultimate Load ลดลง 27.20% เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิห้อง

ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการเสริมกำลังคานเหล็กด้วยแผ่น CFRP ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง โดยเฉพาะในกรณีที่โครงสร้างได้รับผลกระทบจากเพลิงไหม้หรือสภาวะวิกฤตด้านความร้อน ซึ่งสามารถนำไปสู่ข้อเสนอแนะและแนวทางในการใช้งานจริง ดังนี้

การเสริมกำลังโครงสร้างเหล็กในอาคารที่มีความเสี่ยงจากไฟไหม้ การเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP สามารถช่วยฟื้นฟูและเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างเหล็กที่อาจต้องเผชิญกับอุณหภูมิสูงได้ในระดับหนึ่ง แม้ในสภาวะที่โครงสร้างมีตำหนิหรือรอยบาก การประยุกต์ใช้เทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับการซ่อมแซมหรือปรับปรุงอาคารเก่า รวมถึงโครงสร้างในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีโอกาสเกิดความร้อนสะสม

ข้อควรระวังในการออกแบบภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง แม้การเสริมกำลังด้วย CFRP จะมีประสิทธิภาพในอุณหภูมิปกติ แต่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง ประสิทธิภาพของกาวยึดเกาะจะลดลง และมีโอกาสเกิดการหลุดลอกของวัสดุเสริมก่อนถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ดังนั้น การออกแบบควรพิจารณาเลือกใช้กาวที่มีค่า glass transition temperature สูง และมีความทนทานต่อความร้อน รวมถึงอาจต้องพิจารณาใช้วิธีการป้องกันความร้อนเพิ่มเติม เช่น การหุ้มฉนวนกันไฟ

การนำไปใช้ในงานซ่อมบำรุงโครงสร้างที่เสียหายจากไฟ สำหรับโครงสร้างที่ได้รับความเสียหายจากไฟ การเสริมกำลังด้วย CFRP อาจเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าและรวดเร็ว โดยต้องมีการประเมินความเสียหายของวัสดุเหล็กอย่างรอบคอบก่อนทำการเสริมกำลัง และเลือกวัสดุเสริมที่เหมาะสมกับสภาวะความร้อนที่อาจเกิดซ้ำในอนาคต

ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อยอด

- ศึกษาพฤติกรรมของกาวชนิดต่าง ๆ ที่ทนอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าอีพ็อกซี่ทั่วไป
- ทดสอบพฤติกรรมระยะยาวของคานที่เสริมกำลังแล้วเมื่อเผชิญกับความร้อนซ้ำ
- วิจัยเรื่องการห่อหุ้มระบบเสริมกำลังด้วยวัสดุป้องกันความร้อนเพิ่มเติม (Fireproofing)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณา ความช่วยเหลือ และการสนับสนุนจากหลายฝ่าย ผู้จัดทำขอขอบพระคุณอย่างยิ่งแก่ รศ.ดร.ชนะชัย ทองโฉม อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำที่มีคุณค่า รวมถึงให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหา อุปสรรคต่างๆ ในการทำวิจัยครั้งนี้ จนงานนี้สำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้แก่ อาจารย์สายันต์ ศิริมนตรี อาจารย์สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ และอาจารย์เพ็ญพิชชา สนิทอินทร์ ที่กรุณาสละเวลาอ่านและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ทำให้ผู้วิจัยสามารถปรับปรุงแก้ไขจนงานสมบูรณ์และมีคุณภาพมากขึ้น

ขอขอบคุณบริษัทรีโทรฟิก สตรัคเจอร์ สเปเชียลลิสต์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุ CFRP และให้ความช่วยเหลือด้านการติดตั้ง อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่ให้การสนับสนุนทั้งด้านสถานที่ อุปกรณ์ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ และหากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

เอกสารอ้างอิง

[1] Prasertsri, T., Lenwari, A., & Thepchatri, T. (2020). Flexural response of CFRP-strengthened steel beams with initial bond defects. Engineering Journal, 24(1), 115-127.

[2] Lenwari, A., Thepchatri, T., & Albrecht, P. (2005). Flexural response of steel beams strengthened with partial-length CFRP plates. Journal of Composites for Construction, 9(4), 296-303.

[3] Guo, D., Gao, W. Y., Liu, Y. L., & Dai, J. G. (2023). Intermediate crack-induced debonding in CFRP-retrofitted notched steel beams at different service temperatures: Experimental test and finite element modeling. Composite Structures, 304, 116388.

[4] International Organization for Standardization. (1999). ISO 834-1:1999 Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements. International Organization for Standardization.

[5] Sika Corporation. (2024). Sika® CarboDur® S: Carbon fiber laminate for structural strengthening.