การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมแรงด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ภายใต้สภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

Investigate the flexural strength behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymer bar under elevated in-service temperature

พีระพัฒน์ ชากระโทก* โกเศส เสนาแปลง เมธา สารีผล วริษฐา มาลาวงษ์ พีรพล อินทคล้าย ภูตะวัน ยูวนานนท์ ทวิช พูลเงิน และ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

**Corresponding author; E-mail address: peerapat.chakr@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมแรงด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber-Reinforced Polymer, GFRP) ภายใต้สภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการใช้แท่ง GFRP ทดแทนเหล็กเสริม โดยงานวิจัยนี้ใช้วัสดุเสริมแรง 2 ประเภท คือ แท่ง GFRP และเหล็กข้ออ้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร เตรียมตัวอย่างคานคอนกรีตขนาดหน้าตัดที่ความกว้าง 150 มิลลิเมตร ความลึก 200 มิลลิเมตร และความยาว 1600 มิลลิเมตร และมีการเสริมแท่ง GFRP ในแนวยาว จำนวน 3 เส้น โดยคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 33.5 เมกะปาสคาล ก่อนการทดสอบกำลังรับแรงดัดให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อนจนแท่ง GFRP มีอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชม และให้ความร้อนต่อเนื่องจนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย จากการศึกษาพบว่าคานคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP มีค่าการโก่งตัวเพิ่มขึ้นและน้ำหนักบรรทุกมีค่าลดลง เมื่อทดสอบภายใต้อุณหภูมิสูง เมื่อเปรียบเทียบคานคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP และเหล็ก จากการศึกษาพบว่าค่าการโก่งตัวมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 52.6 และค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยลดลงที่ร้อยละ 46.1 และผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP ที่อุณหภูมิห้องเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส พบว่าค่าการโก่งตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 34.3 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และน้ำหนักบรรทุกประลัยลดลงเพียงร้อยละ 2.6

คำสำคัญ: คานคอนกรีตเสริมแรง, แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว, กำลังรับแรงดัดงอ

Abstract

This article aims to investigate the flexural strength behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymer bar (GFRP) under elevated in-service temperatures. It also evaluates the effectiveness of GFRP as a replacement for steel reinforcement. The research used two types of reinforcement i.e., GFRP and steel, with a diameter of 12 millimeters. Concrete beam sample, with dimensions of 150 x 200 x 1600 mm were prepared. Three GFRP bars, each 1550 mm in length, were installed longitudinally in the concrete beams, which had a compressive strength of 33.5 MPa at 90 days. A heating apparatus was used to heat the beams until the GFRP bars reached a temperature of 150°C for 1 hour, after they were tested under flexural strength. The study found that the concrete beams reinforced with GFRP exhibited increased deflection and a decrease in load capacity as the temperature increased. When comparing concrete beams reinforced with GFRP to those reinforced with steel, the study found that the deflection increased by 52.6%, and the load capacity decreased by 46.1%. In tests involving GFRP-reinforced concrete beams at room temperature and at 150°C, it was found that the deflection increased by 34.3% when the temperature was elevated, and the load capacity decreased by only 2.6%.

Keywords: Concrete reinforcement, Glass Fiber Reinforced Polymer, Flexural strength

1. คำนำ

คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete, RC) เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโยธาและก่อสร้างมาอย่างยาวนาน แม้ว่าการใช้คอนกรีตเสริมเหล็กมีข้อดีในด้านความแข็งแรงและความทนทาน ปัญหาสำคัญที่มักเกิดขึ้นในการใช้งานคือ การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสื่อมสภาพลงอย่างรวดเร็ว และส่งผลให้โครงสร้างเกิดความเสียหายและมีอายุการใช้งานสั้นลง [1]

คอนกรีตที่เสริมแรงด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว กำลังได้รับความสนใจอย่างมากในการใช้งาน โดยเฉพาะแท่งโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

(Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP) [2] ซึ่งนำมาใช้เป็นทางเลือกแทนเหล็กในการเสริมแรงคอนกรีต วัสดุชนิดนี้มีสมบัติเด่นหลายประการที่เหมาะสำหรับโครงสร้างคอนกรีต เช่น ความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง ความสามารถในการรับแรงดึงได้ดี และน้ำหนักที่เบากว่าเหล็กเสริม นอกจากนี้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนานและมีความเสถียรในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงมากกว่าเหล็กเสริม [3] ด้วยสมบัติเหล่านี้ของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว จึงถูกนำมาใช้ในโครงการก่อสร้างที่ต้องการความทนทานต่อการกัดกร่อน เช่น สะพาน โครงสร้างใต้ดิน และโครงสร้างในพื้นที่ใกล้ชายฝั่งทะเล

อย่างไรก็ตามการวิจัยเกี่ยวกับวัสดุผสมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วที่สัมผัสกับความร้อนสูงเผยให้เห็นว่าอุณหภูมิสูงส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสมบัติเชิงกลของแท่ง GFRP ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากการสลายตัวของพอลิเมอร์เมื่อสัมผัสกับอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกายภาพและการรับแรงของคอนกรีตที่เสริมด้วยแท่ง GFRP ลดลง [4] เพื่อส่งเสริมการใช้แท่ง GFRP ในโครงสร้างพื้นฐานทางโยธา การวิเคราะห์สมบัติของโครงสร้างคอนกรีตเสริมด้วยแท่ง GFRP หลังจากถูกสัมผัสกับอุณหภูมิสูงจึงถือเป็นสิ่งสำคัญ [5]

โครงสร้างคอนกรีตที่เสริมแรงด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วอาจต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวย เช่น สัมผัสกับอุณหภูมิในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิที่กำหนดไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส ถึง 100 องศาเซลเซียส [6] และ 23 องศาเซลเซียส ถึง 180 องศาเซลเซียส [7] โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดที่ลดลง [8] และค่าการโก่งที่เพิ่มขึ้นของคานคอนกรีต [9] ซึ่งอุณหภูมิแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติที่ลดลงของพอลิเมอร์เส้นใยแก้วที่เวลา 1 ชั่วโมง ถึง 3 ชั่วโมงอีกด้วย [10]

อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมายังขาดการศึกษาเกี่ยวกับคานคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP ในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและผลกระทบต่อพฤติกรรมของคาน ดังนั้นบทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงและเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งการศึกษานี้มุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพในการใช้แท่ง GFRP ทดแทนเหล็กเสริมในคานคอนกรีตในสภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.2.1 สัดส่วนผสมคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ทดสอบเป็นคอนกรีตผสมเสร็จได้รับการสนับสนุนจากบริษัท เอ็มคอนกรีต จำกัด ซึ่งออกแบบให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 28 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน ดังตารางที่ 1 ทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความสูง 200 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C39 [11] ให้แรงในอัตรา 5 กิโลนิวตัน/วินาที พบว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 28.5 และ 33.5 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของคอนกรีต (kg/m^3)

Cement	Fly Ash	Water	Coarse	Fine	Admixture Type G (ml)	Compressive Strength at 90 days (MPa)
185	155	145	1125	845	4100	33.5

2.2.2 พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเป็นวัสดุคอมโพสิตที่ประกอบด้วยเส้นใยแก้ว (Glass Fiber) ที่ฝังในเมทริกซ์โพลิเมอร์ (Polymer Matrix) ได้แก่ อีพ็อกซีเรซินและเส้นใยแก้ว เพื่อให้มีสมบัติที่แข็งแรงและทนทาน โดยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วช่วยเพิ่มความต้านทานต่อแรงดึง แท่ง GFRP ที่ใช้ในการทดสอบได้รับการสนับสนุนจากบริษัท จีเอฟอาร์พี คิงส์ จำกัด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และเป็นประเภทพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบตรง ชั้นคุณภาพที่ 2 มีสีเหลืองอ่อน ความลึกของเกลียวเท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1 จุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 254 องศาเซลเซียส และมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6 ถึง 8 ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

2.2.3 เหล็ก

เหล็กที่ใช้ในการทดสอบแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เหล็กข้ออ้อยที่ใช้เสริมกำลังรับแรงดัด ชั้นคุณภาพ SD40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร (DB12) และเหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร (RB9) ชั้นคุณภาพ SR24 ตามมาตรฐาน มอก. 24 (2559) [12]

2.2.4 อุปกรณ์ให้ความร้อน

อุปกรณ์ให้ความร้อนประกอบด้วยหลอดไฟอินฟราเรดจำนวน 2 หลอด ความยาว 1,000 มิลลิเมตร และเครื่องควบคุมอุณหภูมิและเวลา แสดงในรูปที่ 3 โดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิสามารถกำหนดอุณหภูมิที่ต้องการได้ผ่านการตั้งค่า โดยทำงานร่วมกับอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) เพื่อใช้ในการกำหนดอุณหภูมิและเวลาที่ต้องการทดสอบ โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิประเภท K ที่สามารถทนความร้อนได้ 260 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการอ่านค่าอุณหภูมิที่เหล็กเสริม จำนวน 1 ตำแหน่ง บริเวณกึ่งกลางของเหล็กเสริมแนวยาวของเหล็กเสริมด้านล่าง โดยการทำงานของเครื่องจะส่งผ่านคลื่นอินฟราเรดและแปลงเป็นพลังงานความร้อนส่งไปยังคานคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต

(ก) รูปการติดตั้งทดสอบ

(ข) อุปกรณ์ให้ความร้อน

รูปที่ 3 เครื่องให้ความร้อน

2.2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

คานคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดหน้าตัดความกว้าง 150 มิลลิเมตร ความลึก 200 มิลลิเมตร และความยาว 1,600 มิลลิเมตร การเสริมแรงแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) เหล็กเสริม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร (DB12) ความยาว 1,550 มิลลิเมตร โดยเสริมแรงด้านบน จำนวน 2 เส้น และด้านล่างจำนวน 3 เส้น โดยเสริมเหล็กปลอกขนาด 9 มิลลิเมตร (RB9) ตลอดความยาวของคาน ระยะห่างเหล็กปลอก 80 มิลลิเมตร และ 2) เสริมแท่ง GFRP ซึ่งเสริมแรงลักษณะเดียวกันกับเหล็กเสริม แต่การเสริมแรงด้านล่างแทนที่ด้วยแท่ง GFRP ดังรูปที่ 4

ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain Gauge) โดยใช้เกจวัดความเครียดแบบ 3 สาย ที่สามารถทนความร้อนได้ 250 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการทดสอบหาค่าความเครียดของแท่ง GFRP และเหล็ก จำนวน 2 ตำแหน่ง ที่ตำแหน่งกึ่งกลางเหล็กเสริมบริเวณด้านล่าง

รูปที่ 4 ลักษณะการติดตั้งเหล็กเสริม

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้คานคอนกรีตที่แตกต่างกัน 2 ประเภท คือ 1) คานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ST) และ 2) คานคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP โดยแบ่งเป็นการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (G3-A) และการทดสอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส (G3-150)

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของแท่ง GFRP และเหล็ก

ทดสอบเพื่อหาสมบัติของวัสดุเสริมแรงที่ใช้ในการออกแบบคานคอนกรีต ด้วยการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแท่ง GFRP โดยเตรียม GFRP ขนาดความยาวรวม 1,000 มิลลิเมตร ทำการติดตั้งเหล็กท่อดำที่มีระยะยึด (Anchor Length) ด้านละ 310 มิลลิเมตร และใช้กาวอีพ็อกซี่สำหรับเหล็กในการเชื่อมผสานระหว่างเหล็กท่อดำและแท่ง GFRP ทิ้งให้กาวอีพ็อกซี่แข็งตัว 24 ชั่วโมง ทำการทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ให้แรงในอัตรา 1 มิลลิเมตร/นาที [13] และเก็บค่าความเครียดด้วยความถี่ในเก็บข้อมูล 10 เฮิรตซ์ พบว่าค่าความเค้นเท่ากับ 983.7 เมกะปาสคาล ความเครียดเท่ากับ 0.01 และโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 98.4 จิกะปาสคาล จากการเฉลี่ย 2 ตัวอย่าง

การทดสอบกำลังรับแรงดึงเหล็กแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เหล็กเสริมกำลังรับแรงดัดใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และเหล็กปลอกใช้เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร และความยาว 700 มิลลิเมตร ติดตั้งในเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ให้แรงในอัตรา 30 มิลลิเมตร/นาที [14] และเก็บค่าความเครียดด้วยความถี่ในเก็บข้อมูล 10 เฮิรตซ์ จากการทดสอบพบว่าเหล็ก (DB12) มีจุดคราก (Yield Point) เท่ากับ 489 เมกะปาสคาล ความเค้นสูงสุดเท่ากับ 646 เมกะปาสคาล และร้อยละของระยะยืดของวัสดุเท่ากับ 25.5 เหล็กปลอก (RB9) มีจุดครากเท่ากับ 361 เมกะปาสคาล ความเค้นสูงสุดเท่ากับ 489 เมกะปาสคาล และร้อยละของระยะยืดของวัสดุเท่ากับ 33.6

รูปที่ 5 ขณะให้ความร้อน

2.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

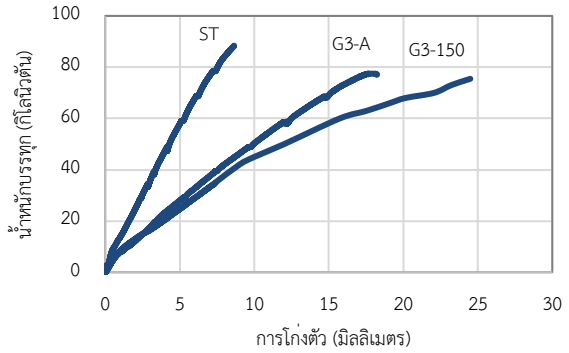
Transformer, LVDT) ขนาด 25 มิลลิเมตร และความถี่ในการเก็บข้อมูล 10 เฮิรตซ์

3. ผลการทดสอบ

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานคอนกรีต

ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6 พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ST) คานคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP ที่อุณหภูมิห้อง (G3-A) และคานคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส (G3-150) มีแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและโก่งตัวที่กึ่งกลางคานใกล้เคียงกัน สำหรับตัวอย่าง ST พบว่ามีน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate Load) เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจนกระทั่งคานคอนกรีตเกิดการวิบัติที่น้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 88.4 กิโลนิวตัน และมีค่าการโก่งตัวเท่ากับ 8.7 มิลลิเมตร เนื่องจากคอนกรีตทำหน้าที่รับกำลังรับอัด ในขณะที่เหล็กเสริมด้านล่างทำหน้าที่รับแรงดึง ซึ่งการเสริมเหล็กช่วยเพิ่มความต้านทานการโก่งตัวของคานคอนกรีต ส่งผลให้ค่าการโก่งตัวของตัวอย่าง ST มีค่าน้อยที่สุด

สำหรับตัวอย่าง G3-A พบว่าแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวมีการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่เป็นเส้นตรง จนกระทั่งเกิดการวิบัติที่น้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 77.5 กิโลนิวตัน และมีค่าการโก่งตัวเท่ากับ 18.2 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง G3-A และตัวอย่าง ST พบว่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของตัวอย่าง G3-A มีค่าลงลดในอัตราร้อยละ 14.1 และการโก่งตัวของตัวอย่าง G3-A มีอัตราเพิ่มขึ้นร้อยละ 52.2 นอกจากนั้นมีค่ากำลังรับแรงดัดที่น้อยกว่าตัวอย่าง ST เนื่องจากการเสริมแรงด้วยแท่ง GFRP ในตัวอย่าง G3-A มีความแข็งแรงในด้านกำลังรับแรงดึง แต่มีความสามารถในการรับแรงดัดที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กเสริม ทำให้ตัวอย่าง G3-A มีการโก่งตัวมากขึ้น และค่ากำลังรับแรงมีค่าน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu และคณะ [17]



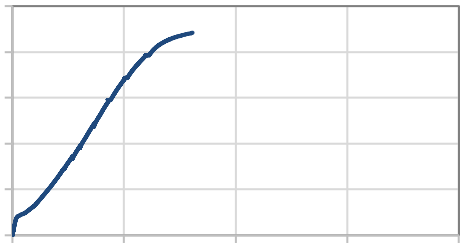
รูปที่ 6 ความระหว่างสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุกและโก่งตัวที่กึ่งกลางคานคอนกรีต

สำหรับตัวอย่าง G3-150 มีการให้ความร้อนขณะทดสอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวมีการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่และมีความใกล้เคียงกับตัวอย่าง G3-A จนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 46 กิโลนิวตัน หลังจากนั้นแนวโน้มของกราฟมีการลดลงจนตัวอย่างเกิดการวิบัติที่น้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 75.5 กิโลนิวตัน และมีค่าการโก่งตัวเท่ากับ 24.5 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่าง G3-150 และตัวอย่าง G3-A พบว่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของตัวอย่าง G3-150 มีค่าลดลงในอัตราร้อยละ 2.6 และการโก่งตัวของตัวอย่าง G3-150 มีอัตราเพิ่มขึ้นร้อยละ 34.6 เนื่องจากผลกระทบของอุณหภูมิสูงที่ทำให้สมบัติทางกลของวัสดุลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 150 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์จะเริ่มเสื่อมสภาพ ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตเสื่อมสภาพลง และไม่สามารถทนต่อกำลังรับแรงดัดได้และเกิดการโก่งตัวมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhao และคณะ [18]

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด

ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 7 โดยใช้เกจวัดความเครียดแบบฝังขนาด 5 มิลลิเมตร พบว่าตัวอย่าง ST ตัวอย่าง G3-A และตัวอย่าง G3-150 มีแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่บริเวณกึ่งกลางคานคอนกรีตใกล้เคียงกัน สำหรับตัวอย่าง ST พบว่าแนวโน้มของกราฟมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างคงที่จนน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 79.2 กิโลนิวตัน หรือประมาณร้อยละ 70 ของน้ำหนักบรรทุกประลัย หลังจากนั้นเหล็กด้านล่างในตัวอย่าง ST จะเกิดการคราก (Yield Point) ทำให้หลังจากนั้นมีแนวโน้มของกราฟลดลง จนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 88.4 กิโลนิวตัน และมีค่าความเครียดที่จุดกึ่งกลางเหล็กเสริมเท่ากับ 0.016 เนื่องจากเหล็กเสริมมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูง ทำให้มีการยืดตัวของเหล็กเสริมน้อยที่สุด

สำหรับตัวอย่าง G3-A พบว่าแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่บริเวณกึ่งกลางคานคอนกรีตลดลงเป็นอันดับที่ 2 โดยมีแนวโน้มของกราฟเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจนเกิดการวิบัติที่น้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 77.5 กิโลนิวตัน และมีค่าความเครียดที่จุดกึ่งกลางแท่ง GFRP เท่ากับ 0.035 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง G3-A และตัวอย่าง ST พบว่าความเครียดของตัวอย่าง G3-A มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 56.8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดแสดงให้เห็นว่า เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นทำให้การยืดตัวของแท่ง GFRP มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสมบัติของแท่ง GFRP มีโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ที่น้อยกว่าเหล็กเสริม ส่งผลให้ความเครียดของแท่ง GFRP ในตัวอย่าง G3-A มีค่ามากกว่าตัวอย่าง ST ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li และคณะ [19]



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและเกจวัดความเครียดที่กึ่งกลางวัสดุเสริมแรง

สำหรับตัวอย่าง G3-150 พบว่าแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัว มีการเพิ่มขึ้นไม่คงที่ จนกระทั่งคานเกิดการ

วิบัติที่น้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 75.5 กิโลนิวตัน และมีค่าความเครียดที่จุดกึ่งกลางแท่ง GFRP เท่ากับ 0.037 เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่าง G3-150 และตัวอย่าง G3-A พบว่าความเครียดของตัวอย่าง G3-150 มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นทำให้การยืดตัวของแท่ง GFRP มีค่าเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิส่งผลให้แท่ง GFRP มีความเครียดเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลกระทบของอุณหภูมิสูงทำให้สมบัติทางกลของวัสดุลดลง โดยแท่ง GFRP เริ่มเสื่อมสภาพ เกิดจากอีพ็อกซี่เรซินถูกหลอมละลายด้วยความร้อน และเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีเหลืองน้ำตาลในบางบริเวณ แสดงดังรูปที่ 8

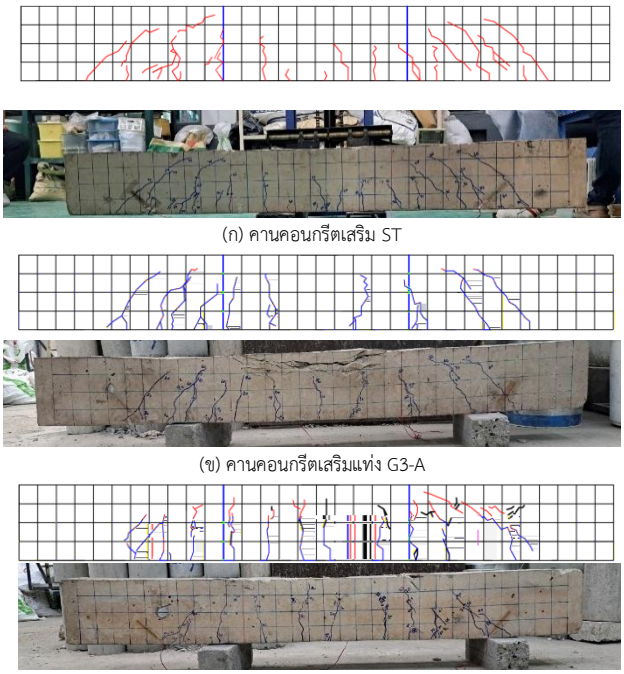


รูปที่ 8 ลักษณะเหล็กเสริมพอลิเมอร์เส้นใยแก้วที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

3.3 ลักษณะการวิบัติและรอยแตกร้าว

เพื่อตรวจสอบรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนผิวคานคอนกรีต ก่อนการทดสอบได้ทำการวาดเส้นเพื่อแบ่งช่วงกำลังรับแรงดัด (Bending zone) โดยตรวจสอบรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นด้วยตาเปล่าและวาดรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นลงบนผิวคอนกรีต เมื่อพิจารณาตัวอย่าง ST ดังรูปที่ 9 (ก) พบว่ารอยแตกแรก (First Crack) เกิดขึ้นบริเวณผิวกึ่งกลางคานคอนกรีตจนน้ำบรรทุกเท่ากับ 10 กิโลนิวตัน เมื่อหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นทำให้รอยแตกร้าวมีมากขึ้นและมีการขยายตัวของเหล็กเสริม ทำให้ตัวอย่าง ST มีการโก่งตัวเพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีแรงเฉือนเกิดขึ้นบริเวณนอกระยะแรงดัดเท่ากับ 60 กิโลนิวตัน หรือประมาณร้อยละ 60 ของน้ำหนักบรรทุกประลัย เมื่อเหล็กเสริมเกิดการขยายตัวจนถึงจุดคราก (Yield Point) เท่ากับ 70 กิโลนิวตัน พบว่ามีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นบริเวณช่วงนอกกำลังรับแรงดัด จนกระทั่งตัวอย่าง ST เกิดการวิบัติในช่วงกำลังรับแรงอัด (Compression Zone) มีค่าเท่ากับ 88.4 กิโลนิวตัน

สำหรับตัวอย่าง G3-A พบว่ารอยแตกร้าวแรกเกิดขึ้นบริเวณผิวกึ่งกลางคานคอนกรีตจนน้ำบรรทุกเท่ากับ 10 กิโลนิวตัน เมื่อหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นทำให้รอยแตกร้าวมีมากขึ้นและมีการขยายตัวของแท่ง GFRP ทำให้ตัวอย่าง G3-A มีการโก่งตัวเพิ่มขึ้น และมีแรงเฉือนเกิดขึ้นบริเวณนอกระยะแรงดัดเท่ากับ 60 กิโลนิวตัน หรือประมาณร้อยละ 60 ของน้ำหนักบรรทุกประลัย จนกระทั่งตัวอย่าง G3-A เกิดการวิบัติในช่วงกำลังรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 77.5 กิโลนิวตัน ในขณะที่แท่ง GFRP เกิดการขยายตัวแต่ไม่ขาดออกจากกัน เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่าง G3-A และตัวอย่าง ST พบว่าตัวอย่าง G3-A มีจำนวนรอยแตกร้าวที่น้อยกว่าตัวอย่าง ST และมีระยะห่างของรอยแตกร้าวน้อยกว่า เนื่องจากตัวอย่าง ST มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อถึงจุดคราก สังเหตุได้ว่าการยืดตัวของรอยแตกช้ากว่าตัวอย่าง G3-A ในขณะที่ตัวอย่าง G3-A มีความเหนียวที่น้อยกว่าซึ่งทำให้มีระยะห่างของรอยแตกมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hemalatha และคณะ [20]



(ก) คานคอนกรีตเสริม ST

(ข) คานคอนกรีตเสริมแท่ง G3-A

(ค) คานคอนกรีตเสริมแท่ง G3-150

รูปที่ 9 ลักษณะการวิบัติและรอยแตกร้าว

เมื่อพิจารณาตัวอย่าง G3-150 หลังจากได้รับอุณหภูมิที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 9 (ค) พบว่าอุณหภูมิที่ผิวคอนกรีตสูงถึงประมาณ 300 องศาเซลเซียส และเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กที่บริเวณผิวคอนกรีตช่วงกึ่งกลางและด้านข้าง เนื่องจากความแตกต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตและที่ผิวมีอุณหภูมิไม่เท่ากัน เมื่ออุณหภูมิที่ผิวมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ด้านในคานคอนกรีตมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ช้ากว่า ทำให้ผิวเกิดการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจนเกิดรอยแตกร้าว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Qian และคณะ [21] เมื่อให้ความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการทดสอบกำลังรับแรงดัด 4 จุด พบว่ารอยแตกร้าวแรกเกิดขึ้นบริเวณผิวกึ่งกลางคานคอนกรีตจนน้ำบรรทุกเท่ากับ 10 กิโลนิวตัน เมื่อหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นทำให้รอยแตกร้าวมีมากขึ้นและมีการขยายตัวของแท่ง GFRP ทำให้ตัวอย่าง G3-150 มีการโก่งตัวเพิ่มขึ้น และผลกระทบของความร้อนทำให้แท่ง GFRP มีการเสื่อมสภาพในการรับแรงและความยืดหยุ่น ทำให้การโก่งตัวของตัวอย่าง G3-150 มีมากกว่าตัวอย่างอื่น จนกระทั่งแรงเฉือนเกิดขึ้นบริเวณนอกระยะแรงดัดเท่ากับ 60 กิโลนิวตัน หรือประมาณร้อยละ 60 ของน้ำหนักบรรทุกประลัย และทำให้ตัวอย่าง G3-150 จนเกิดการวิบัติในช่วงกำลังรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 75.5 กิโลนิวตัน และเมื่อตรวจสอบแท่ง GFRP ด้านในดังรูปที่ 8 พบว่าแท่ง GFRP มีการขาดของเส้นใยแก้วเนื่องจากอุณหภูมิส่งผลทำให้เรซินที่เคือบเส้นใยแก้วเกิดการละลาย เมื่อพิจารณาตัวอย่าง G3-A และ G3-150 พบว่าตัวอย่าง G3-150 มีรอยแตกร้าวที่มากกว่าเนื่องจากอุณหภูมิส่งผลให้รอยแตกร้าวมีการขยายตัวออกและทำให้คอนกรีตและแท่ง GFRP เสื่อมสภาพ ส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบนี้แสดง

ให้เห็นว่าการทดสอบภายใต้อุณหภูมิสูง มีผลกระทบโดยตรงต่อคานคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP นอกจากนี้ยังพบว่ามีรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นในคานคอนกรีตที่ได้รับความร้อน

4. บทสรุป

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมแรงด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber-Reinforced Polymer, GFRP) ภายใต้การใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูง ผลการทดสอบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ST) คานคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP ที่อุณหภูมิห้อง (G3-A) และคานคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส (G3-150) สรุปได้ดังนี้

1) คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสามารถในการรับแรงดัดสูงกว่าคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เส้นใยแก้วที่อุณหภูมิห้องและคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เส้นใยแก้วที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เนื่องจากเหล็กเสริมมีสมบัติในการรับแรงดึงที่ดี ทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีน้ำหนักบรรทุกประลัยสูงกว่าและการโก่งตัวน้อยกว่า

2) คอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เส้นใยแก้วที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส มีน้ำหนักบรรทุกประลัยลดลงร้อยละ 2.58 และการโก่งตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 34.32 เนื่องจากการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์

3) คอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เส้นใยแก้วที่อุณหภูมิห้องและคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เส้นใยแก้วที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบพบว่าแท่ง GFRP ในคานคอนกรีตที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสมีค่าความเครียดเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้เรซินในแท่ง GFRP เสื่อมสภาพและเปลี่ยนแปลงไปสู่สถานะที่มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น ซึ่งทำให้แท่ง GFRP สามารถยืดตัวได้มากขึ้นเมื่อรับแรงดัด

4) หลังจากคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เส้นใยแก้วที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าความร้อนส่งผลกระทบต่อตัวอย่าง G3-150 ที่มีการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยนำร่องที่มุ่งเน้นสนับสนุนการศึกษาคานคอนกรีตเสริมพอลิเมอร์เส้นใยแก้ว ที่อุณหภูมิห้องเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดที่สำคัญในด้านอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงดัดขณะให้ความร้อนของคานคอนกรีตเสริมพอลิเมอร์เส้นใยแก้ว ซึ่งในอนาคตควรมีการศึกษาอุณหภูมิที่สูงขึ้น เพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่งตัวและการรับแรงดัดของคานได้อย่างครอบคลุมมากขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมโครงสร้างจริงได้อย่างเหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท จีเอฟอาร์พี คิงส์ จำกัด ที่ให้ความกรุณาเอื้อเฟื้อพอลิเมอร์เส้นใยแก้วเพื่อใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณบริษัท เอ็มคอนกรีต จำกัด ที่ให้ความกรุณาเอื้อเฟื้อคอนกรีตเพื่อใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการสนับสนุนมูลฐาน (Fundamental Fund 2567 : โครงการเทคโนโลยีการก่อสร้างขั้นสูงสำหรับ Thailand 4.0 และ Fundamental Fund 2568 : โครงการนวัตกรรมเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อการก่อสร้างอนาคตที่ยั่งยืน)

เอกสารอ้างอิง

[1] Sanchez, J., Fullea, J. and Andrade, C. (2017). Corrosion-induced brittle failure in reinforcing steel Theoretical and Applied Fracture Mechanics. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 92, pp. 229–232.

[2] Ruan, X., Lu, C., Xu, K., Xuan, G., Ni, M. (2020). Flexural behavior and serviceability of concrete beams hybrid-reinforced with GFRP bars and steel bars, *Composite Structures*, 13, pp. 350–359.

[3] Wang, K., Yong, B., Smith, S.T. (2011). Mechanical properties of pultruded carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) plates at elevated temperatures, *Engineering Structures*, 33, pp. 2154-2161

[4] Delaplanque, N., Tharreau, M., Chataigner, S., Quiertant, M., Benzarti, K., Battais, L., Rolland, A., Gaillet, L., Bourbon, X. (2024). Durability of partially cured GFRP reinforcing bars in alkaline environments with or without sustained tensile load, *Construction and Building Materials*, 442, pp.137603.

[5] Abdullah, Q.N., Abdulla, A.I. (2023). Flexural behavior of a box ferrocement beams consisting of self-compacted mortar reinforced by fiber glass mesh and GFRP bars after exposure to high temperatures, *Journal of Building Engineering*, 74, pp. 1069176

[6] Sirimanna, C.S., Islam, M.M, Aravinthan, T. (2010). Advances in FRP Composites in Civil Engineering. *Composites in Civil Engineering (CICE 2010)*, Beijing, China, 27-29 September 2010, pp. 376–380,

[7] Manalo, A., Surendar, S., Van Erp, G., Benmokrane, B. (2016). Flexural behavior of an FRP sandwich system with glass-fiber skins and a phenolic core at elevated in-service temperature, *Composite Structures*, 152, pp. 96–105.

[8] Maranan, G., Manalo, A., M Karunasena, W., Benmokrane, B. (2014). Flexural behaviour of glass fibre reinforced polymer (GFRP) bars subjected to elevated temperature. *Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23),* 6, pp.187-192

[9] Mamdouh, H., Mehany, M., Lbrahim, W.M., Mohamed, H.M., Ali, A.H. (2024). Concrete contribution to shear resistance of GFRP-RC beams under fire exposure, *Case Studies in Construction Materials*, 21, pp.e04109.

[10] Wang, Z., Wang, K., Zhao, J., Wang, S., Shumuye, E.D., Yang, Z. (2022). The mechanical properties of GFRP bars embedded in geopolymer concrete after high temperature exposure, *Journal of Building Engineering*, 62, pp.105355.

[11] American Society for Testing and Materials (2021). ASTM C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *ASTM International*

[12] มาตรฐาน มอก. 24-2559, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม: เหล็กเส้นกลมสำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก (พ.ศ. 2559). *สมาคมอุตสาหกรรมเหล็กแห่งประเทศไทย (The Thai Industrial*

[13] American Society for Testing and Materials (2021). ASTM D7205/D7205M Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars, *ASTM International*.

[14] American Society for Testing and Materials (2023). ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, *ASTM International*

[15] American Society for Testing and Materials (2018). ASTM C78/C78M Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), *ASTM International*.

[16] Zhao, J., Pan, H., Wang, Z., Li, G. (2022). Experimental and Theoretical Study on Flexural Behavior of GFRP- and CFRP-Reinforced Concrete Beams after High-Temperature Exposure. *Polymers*, Zhengzhou, China, 21-24 September 2022, pp.4002

[17] Xu, J., Wu, Z., Jia, H., Cao, Q. (2023). Flexural behavior and serviceability performance of SSC beams reinforced with hybrid GFRP -stainless steel bars, *Structure*, 54, pp.1350-1359.

[18] Zhao, J., Pan, H., Wang, Z., Li, G. (2022). Experimental and Theoretical Study on Flexural Behavior of GFRP- and CFRP-Reinforced Concrete Beams after High-Temperature Exposure, Zhengzhou. *Polymers,* China, 21-24 September 2022, pp.4002

[19] Li, X., Zhange, W., Zhange, C., Liu, J., Li, L., Wang, S. (2024). Flexural behavior of GFRP and steel bars reinforced lightweight ultra-high performance fiber-reinforced concrete beams with various reinforcement ratios, *Structure*, 70, pp.107897.

[20] Hemalatha, K., Prasad, D.R. (2025). Assessment of flexural behaviour and a novel deformability approach of concrete beams reinforced with GFRP and steel bars– A digital image correlation technique, *Structure*, 73, pp.108412.

[21] Qian, W., Lu, C., Yuan, S., Li, H. (2025). Experiment and calculation of high-temperature effect on tensile performance of GFRP rebars embedded in concrete, *Case Studies in Construction Materials*, 22, pp. e04231