

การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นเส้นใยแก้วขึ้นรูปราคาถูกลง Strengthening of Reinforced Concrete Beam using Low-cost Fiber Plates

กীরเกียรติ กลิ่นขำ^{1*} และ กิตติภูมิ รอดสิน²
Keerakiat Klinkhum^{1*} and Kittipoom Rodsin²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800

²ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800

¹Construction Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University
of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800

²Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University
of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800

Received : 2024-05-28 Revised : 2024-10-17 Accepted : 2024-10-21

บทคัดย่อ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาการนำวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer หรือ GFRP) ในการเสริมกำลังเป็นที่นิยมมากขึ้นเนื่องจาก GFRP นั้นมีน้ำหนักที่เบา สะดวกต่อการขนส่งและติดตั้ง ทนทานต่อสภาพแวดล้อม อีกทั้งยังมีกำลังรับแรงดึงที่สูง จึงเหมาะสมสำหรับเสริมพฤติกรรมการรับแรงดึงของคานคอนกรีต แต่ในปัจจุบันการเสริมกำลังด้วย GFRP มีการติดตั้งได้ครั้งละชั้นด้วยอีพอกซี เมื่อต้องการจำนวนชั้นที่มากขึ้นจึงเป็นปัญหาในการติดตั้งงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักคือการใช้ GFRP ที่หาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดนำมาขึ้นรูปตามจำนวนชั้นที่ออกแบบไว้ให้อยู่ในรูปแบบแผ่นแล้วนำไปเสริมกำลังคานคอนกรีตและทดสอบประสิทธิภาพของการเสริมกำลัง โดยทดสอบคานจำนวน 3 ตัวอย่าง ขนาด 15x20 เซนติเมตร ยาว 2 เมตร แบ่งเป็นคานควบคุมและคานเสริมกำลังด้วยแผ่น GFRP จำนวน 1 และ 3 ชั้นตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองเชิงทฤษฎี รวมถึงพฤติกรรมการวิบัติจากการเสริมกำลังในแต่ละรูปแบบ ผลการศึกษาพบว่า การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยแผ่น GFRP สามารถพัฒนากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคาน

คอนกรีตให้สูงขึ้น และได้เสนอแนะจำนวนชั้นของแผ่น GFRP ที่เหมาะสมต่อการเสริมกำลังรวมถึงรูปแบบการวิบัติควรมีการศึกษาในอนาคตต่อไป

คำสำคัญ: แผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว, การเสริมกำลังภายนอก, ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก

Abstract

In recent years, the use of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) for structural strengthening has gained popularity due to its lightweight nature, ease of transportation and installation, environmental durability, and high tensile strength, making it suitable for enhancing the tensile behavior of concrete beams. However, current GFRP strengthening methods involve installing one layer at a time using epoxy, which becomes problematic when multiple layers are required. This research aims to address this issue by using readily available GFRP materials and pre-fabricating them into sheets with the designed number of layers. These sheets are then used to strengthen concrete beams, and their performance

*กীরเกียรติ กลิ่นขำ

E-mail address : keerakiatklinkhum@gmail.com

is tested. Three beam samples, each measuring 15x20 cm and 2 meters in length, were tested. The specimens included a control beam, and beams strengthened with 1 and 3 layers of GFRP sheets, respectively. The results showed an increase in load-bearing capacity that correlated with theoretical models, as well as distinct failure behaviors based on the type of strengthening used. The study concluded that GFRP sheet reinforcement could significantly enhance the load-carrying capacity of concrete beams. The research also recommended the optimal number of GFRP layers for strengthening and suggested that future studies should further investigate failure modes associated with GFRP reinforcement.

Keywords : GFRP Plate, External Strengthening, Load-Bearing Capacity

1.บทนำ

ในปัจจุบันโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นที่นิยมกว้างขวางอย่างมากในงานก่อสร้างโครงสร้างอาคารที่พักอาศัย และโครงสร้างพื้นฐานทางสาธารณูปโภคเนื่องจากมีความคงทน มีอายุในการใช้งานที่ยาวนาน [1] เมื่อโครงสร้างถูกใช้งานไปเป็นระยะเวลาหนึ่งอาจเกิดการเสื่อมสภาพ ทำให้รับน้ำหนักบรรทุกได้ลดลงหรือในบางครั้งมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบการใช้งานทำให้โครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกมากกว่าที่ออกแบบไว้ก่อให้เกิดความอันตรายในการใช้งาน โครงสร้างเหล่านี้จึงต้องมีการบำรุงหรือปรับปรุงการรับน้ำหนักของโครงสร้างให้โครงสร้างมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเพื่อการใช้งานได้อย่างปลอดภัย

การเสริมกำลังโครงสร้างเป็นหนึ่งทางเลือกในการปรับปรุงโครงสร้างเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้าง ซึ่งการเสริมกำลังภายนอกด้วยโพลิเมอร์เสริมเส้นใย(Fiber Reinforced Polymer) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบันเนื่องจากน้ำหนักเบา สะดวกต่อการขนส่งและติดตั้ง กำลังรับแรงดึงที่สูง ทนทานต่อสภาวะแวดล้อม ไม่เกิดการกัดกร่อน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง และการต้านทานความล้า(Fatigue) [2]-[7] จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างอาคารที่พักอาศัย และ

โครงสร้างพื้นฐานทางสาธารณูปโภค[8] ทำให้โครงสร้างมีกำลังรับแรงในด้านต่าง ๆ เพิ่มขึ้นเช่น แรงเฉือน โมเมนต์ และความเหนียวเป็นต้น โดยทั่วไปแล้วโพลิเมอร์ที่ใช้ในทางวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างมีด้วยกัน 3 ชนิดคือ เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) เส้นใยแก้ว(Glass Fiber) และเส้นใยอะรามิด (Aramid) ในปัจจุบันโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer หรือ CFRP) [9] เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการเสริมกำลังเช่น งานวิจัยของ Balamuralikrishnan และJeyasehar [10] ได้ศึกษาการเสริมกำลังคานด้วย CFRP จำนวน 1 และ 2 ชั้น พบว่าการเสริมกำลังด้วย CFRP สามารถปรับปรุงคุณสมบัติกำลังรับโมเมนต์ดัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่วัสดุมีต้นทุนที่สูงกว่าร้อยละ 350 เทียบกับวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer หรือ GFRP) ซึ่งมีราคาต่อตารางเมตรที่ต่ำกว่า 1 เหรียญสหรัฐ (ราคาจากร้านค้าในประเทศไทย)[11] โดย CFRP มีค่าโมดูลัสสูงกว่า 3 ถึง 3.5 เท่าเมื่อเทียบกับ GFRP[12] ทำให้การวิบัติที่สภาวะประลัยของคานที่เสริม GFRP มีรูปแบบที่เหนียวกว่า [2] สังเกตได้จาก เมื่อคานเกิดการวิบัติจากการฉีกขาดของแผ่นโพลิเมอร์คานที่เสริมกำลังด้วย GFRP จะพบค่าการแอ่นตัวและรอยร้าวที่มากกว่า CFRP แต่เนื่องจาก GFRP มีคุณสมบัติกำลังรับแรงในสภาวะใช้งานที่น้อยกว่าจึงไม่เป็นที่นิยมในการนำมาเสริมกำลัง อย่างไรก็ตามเมื่อมีการปรับปรุงให้คุณสมบัติการรับแรงของ GFRP ให้เทียบเท่า CFRP [13],[14] ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการเสริมกำลังโครงสร้าง

ดังนั้นปี ค.ศ.1991 Saadatmanesh และคณะ [15] ได้เริ่มมีการศึกษาความแข็งแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังคานภายนอกด้วย GFRP พบว่าคานที่เสริมกำลังด้วย GFRP มีค่าโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้น และความกว้างของรอยร้าวลดลงเมื่อเทียบกับคานที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง Grace และคณะ [16] ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP ยังได้ตรวจสอบอิทธิพลของจำนวนชั้น ความหนาของ FRP ที่แตกต่างกัน ประเภทของอีพอกซี และรูปแบบของการเสริมแรงที่มีต่อพฤติกรรมของคานพบว่า การเสริมกำลังด้วย FRP สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มขึ้น การแอ่นตัวของคานลดลงรอยแตกร้าวกระจายตัวสม่ำเสมอและมีขนาดเล็กลง ในเวลาต่อมาได้มีการศึกษาการใช้ GFRP เสริมกำลังเพื่อเพิ่มโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน Taheri และคณะ [17] ศึกษาการเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น CFRP และ GFRP ชนิดทิศทางเดียว ซึ่งมีการเสริมความ

ยาวเต็มช่วงคานและเฉพาะช่วงที่คานรับโมเมนต์ดัด พบว่า การเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ความยาวเต็มช่วงคานสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกได้ดีกว่า อีกทั้งการจัดเตรียมพื้นผิวมีผลต่อการเสริมกำลัง ที่ผ่านมามีการนำ GFRP เสริมกำลังหลายรูปแบบเช่นงานวิจัยของ Nabil และคณะ [18] ศึกษาการเสริมกำลังคานด้วย FRP รูปแบบผ้าพบว่าคานที่เสริมกำลังสามารถเพิ่มการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแต่ในการเสริมกำลังรูปแบบผ้าต้องติดตั้งบนคานเมื่อมีจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการกระจายแรงของ FRP นั้นลดลงและเกิดการหลุดล่อน Nguyen และCao[19] ศึกษาการเสริมกำลังคานคอนกรีตด้วยวิธี NSM (near-surface mounted) เป็นการเสริมกำลังเพื่อป้องกันการหลุดล่อน พบว่าคานที่เสริมกำลังด้วยวิธี NSM มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นแต่มีวิธีการติดตั้งซับซ้อนเนื่องจากต้องตัดร่องเข้าไปในคอนกรีตก่อนติดตั้ง Rahimi และ Hutchinson [20] ศึกษาการเสริมกำลังคานคอนกรีตด้วยแผ่น GFRP พบว่า คานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มขึ้น มีการกระจายแรงที่ดี อีกทั้งยังเป็นวิธีการเสริมกำลังที่มีการติดตั้งเร็วที่สุดเนื่องจากมีน้ำหนักที่เบาสะดวกต่อการติดตั้งและยังสามารถติดตั้งโดยไม่ต้องหยุดการใช้งานโครงสร้าง

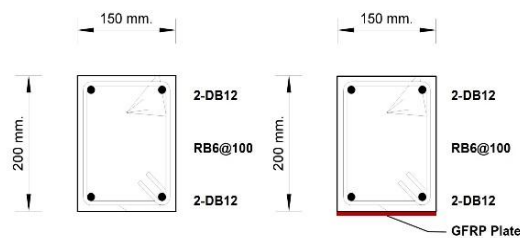
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติการรับแรงของแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วโดยใช้โพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบผ้าทิศทางเดียวที่มีต้นทุนต่ำนำมาเรียงซ้อนกันขึ้นรูปให้อยู่ในรูปแบบแผ่น (GFRP Plate) ด้วยเรซิน และประยุกต์ใช้แผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วในการเสริมกำลังภายนอกเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ อีพอกซีในการเชื่อมประสาน(External Bonding) เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกรวดเร็ว ขั้นตอนไม่ซับซ้อน สามารถกำหนดจำนวนชั้นแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วตามที่ต้องการได้ในห้องปฏิบัติการ

2.วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดลอง

คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง ขนาด 15x20x200 เซนติเมตร ช่วงความยาวสำหรับการทดสอบ 180 เซนติเมตร เสริมเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด DB12 จำนวน 2 เส้น เหล็กปลอก RB6 ระยะ 10 เซนติเมตร กำลังอัดคอนกรีต 230 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 1(ก) และ1(ข) โดยกำหนดให้คาน CB คือ คานควบคุมเพื่อใช้เปรียบเทียบกับพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก

EB-1 และ EB-3 คือคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น GFRP มีความหนาของเส้นใยแก้ว 1 ชั้นและ 3 ชั้นตามลำดับ แสดงได้ดังตารางที่ 1



(ก) คานควบคุม

(ข) คานเสริมกำลัง

รูปที่ 1 หน้าตัดคานคอนกรีตในการทดสอบ

2.2แผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วในการทดสอบ

แผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว(Glass Fiber Reinforced Polymer หรือ GFRP) เป็นวัสดุประกอบ(Composite Materials) คือ ส่วนของเส้นใยซึ่งเป็นส่วนที่รับแรงกระทำหลัก และส่วนของโพลิเมอร์ (Polymer) หรือเรซิน (Resin) ซึ่งใช้เป็นตัวถ่ายแรงและยึดประสานเส้นใยเข้าด้วยกัน โดยในการออกแบบแผ่น GFRP เสริมกำลังที่ใช้ในการทดสอบเส้นใยแก้ว 1 ชั้นมีความหนา 0.25 มิลลิเมตร และ 3 ชั้นมีความหนา 0.75 มิลลิเมตร ขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 154 เซนติเมตร ขั้นตอนในการขึ้นรูปนำแผ่นเส้นใยแก้ววางบนไม้แบบที่ทำด้วยซีเมนต์สำหรับงานเรซินต่อมาทาเรซินให้ทั่วแผ่นเส้นใยจากนั้นนำไม้แบบประกบด้านบนของแผ่นเส้นใยที่ทำด้วยเรซินและกดทับด้วยน้ำหนักให้ทั่วแผ่นไม้แบบเพื่อลดการเกิดฟองอากาศ เมื่อแผ่น GFRP แข็งตัวแล้วนำมาตัดแต่งให้มีขนาดตามที่ต้องการเพื่อเตรียมติดตั้งในการเสริมกำลังของคานทดสอบ และเก็บตัวอย่างขนาดกว้าง 2.5 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 2 เพื่อทดสอบคุณสมบัติของแผ่น GFRP แสดงได้ดังรูปที่ 3 และตารางที่ 2



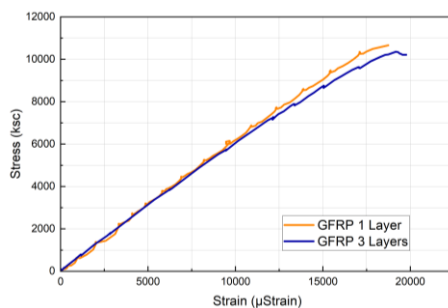
รูปที่ 2 การทดสอบแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

ตารางที่ 1 คานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

Beams	Dimension (cm)			Type of Strengthening
	Span length	Width	Height	
CB	180	15	20	N/A
EB-1	180	15	20	One layer
EB-3	180	15	20	Three layers

ตารางที่ 2 คุณสมบัติวัสดุ

Material	Ultimate tensile strength (kg)	Modulus of elasticity in tension (ksc)
GFRP One layer	647	627089
GFRP Three layers	1839	613061
SD40	6037	2019530

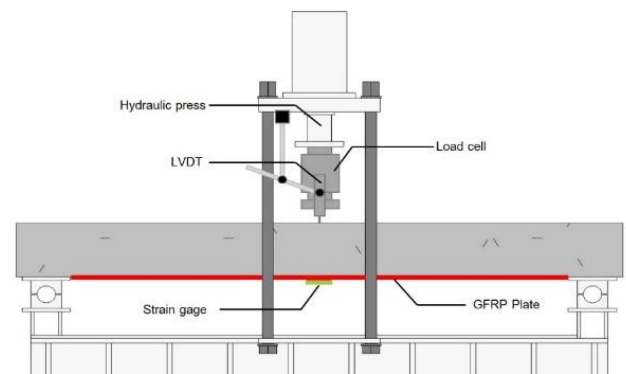


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและค่าความเครียดของแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

2.3 การทดสอบ

การทดสอบกระทำภายใต้โครงเหล็กทดสอบที่มีการติดตั้งมาตรวัดแรง (Load cell) และอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ใช้การทดสอบแบบสามจุด (Three point load) กดน้ำหนักบรรทุกลงจุดกึ่งกลางทำการหาสัณฐานที่คานก่อนการทดสอบช่วยให้สามารถสังเกตเห็นรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนขึ้น โดยทดสอบคาน 3 ตัวอย่าง แบ่งเป็นคานควบคุม 1 ตัวอย่าง และคานเสริมกำลังด้วยแผ่น GFRP 2 ตัวอย่าง โดยมีการจัดเตรียมพื้นผิวและติดตั้งแผ่น GFRP ขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 154 เซนติเมตร ใต้ท้องคานด้วยอีพอกซีเป็นตัวเชื่อมประสานจากนั้นทดสอบภายใต้โครงเหล็กทดสอบ

แสดงได้ดังรูปที่ 4 ทำการทดสอบในรูปแบบของการควบคุมการแอ่นตัว (Displacement Controlled Test Scheme) โดยจะทำการให้แรงที่ละน้อย โดยเพิ่มแรงกระทำจนกระทั่งคานแอ่นตัวทุก 1 มิลลิเมตร โดยแต่ละครั้งก่อนที่จะเพิ่มแรงที่กระทำต่อคานมีการสังเกตพฤติกรรมรอยแตกร้าวของคานคอนกรีต และบันทึกข้อมูลจากเครื่องมือตรวจวัดก่อนที่จะทำการเพิ่มน้ำหนักในขั้นต่อไป ทำการทดสอบจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติเพื่อเปรียบเทียบค่าการรับน้ำหนักและค่าการแอ่นตัว



รูปที่ 4 คานทดสอบภายใต้โครงเหล็กทดสอบ

3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

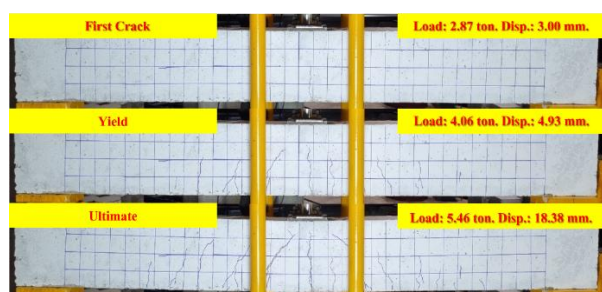
3.1 การวิบัติของคานทดสอบ

จากรูปที่ 5 แสดงถึงรอยแตกร้าวเมื่อคาน CB ได้รับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มมากขึ้น รอยแตกร้าวแรกเกิดขึ้นช่วงกึ่งกลางคานเมื่อคานทดสอบได้รับน้ำหนักบรรทุก 2.87 ตัน คานเกิดการแอ่นตัว 3.00 มิลลิเมตร ที่จุดครากคานรับน้ำหนักบรรทุกได้ 4.06 ตัน คานเกิดการแอ่นตัวที่ 4.93 มิลลิเมตร รอยแตกร้าวเริ่มกระจายออกด้านข้างของคาน และที่จุดวิบัติจากโมเมนต์คานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ 5.46 ตัน การแอ่นตัว 18.38 มิลลิเมตร รอยแตกร้าวที่กระจายออกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยแต่มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น รูปที่ 6 แสดงถึงรอยแตกร้าวเมื่อคาน EB-1 ได้รับน้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งการแอ่นตัว 3.00 มิลลิเมตร คานยังไม่เกิดรอยแตกร้าวแสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกเมื่อเทียบกับคาน CB เริ่มมีรอยแตกร้าวแรกเกิดขึ้นเมื่อคานมีการแอ่นตัวที่ 3.08 มิลลิเมตร รับน้ำหนักบรรทุก 3.65 ตัน ที่จุดครากคาน EB-1 สามารถรับน้ำหนักบรรทุก 6.13 ตัน การแอ่นตัว 7.13 มิลลิเมตร มีรอยแตกร้าวกระจายตัวบริเวณช่วงรับแรงดึงของคาน จนกระทั่งได้รับน้ำหนักบรรทุก 7.44 ตัน การแอ่นตัว 21.76 มิลลิเมตร รูปที่ 7 แสดงถึงรอยแตกร้าวเมื่อ

คาน EB-3 ได้รับน้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งการแอ่นตัว 3.00 มิลลิเมตร คานยังไม่เกิดรอยแตกกว้างแสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกเมื่อเทียบกับคาน CB และ EB-1 รอยร้าวแรกเกิดขึ้นเมื่อคานมีการแอ่นตัว 3.23 มิลลิเมตร รับน้ำหนักบรรทุก 3.92 ตัน ที่จุดครากคานสามารถรับน้ำหนักบรรทุก 7.32 ตัน การแอ่นตัว 6.35 มิลลิเมตร เมื่อเทียบกับคาน EB-1 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเสริมกำลังด้วยแผ่น GFRP ที่มีจำนวนชั้นความหนาที่เพิ่มขึ้น รอยแตกกว้างมีขนาดความกว้างที่เล็กลงเมื่อเทียบกับคาน CB และ EB-1 จนกระทั่งคานรับน้ำหนักบรรทุก 9.29 ตัน การแอ่นตัว 15.49 มิลลิเมตร แผ่น GFRP นั้นเริ่มมีการหลุดล่อนจากออกจากปลายคานเข้าสู่กึ่งกลางคานเป็นลักษณะการหลุดล่อนแบบมีทิศทางจากปลายแผ่นสู่กลางแผ่น (Plate-end debonding) และรูปแบบการวิบัติของคานทดสอบ แสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ลักษณะการวิบัติของคานทดสอบ

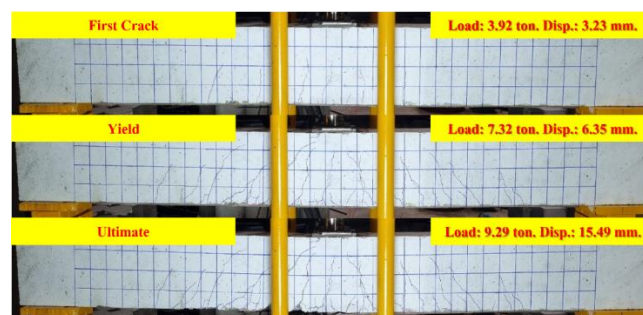
Beams	Load (T)	Displacement (mm)	Failure Mode
CB	5.46	18.38	Flexural failure
EB-1	7.44	21.76	Flexural failure
EB-3	9.29	15.49	Flexural failure, Debonding



รูปที่ 5 รอยแตกกว้างของคาน CB เมื่อมีการแอ่นตัวในแต่ละช่วง



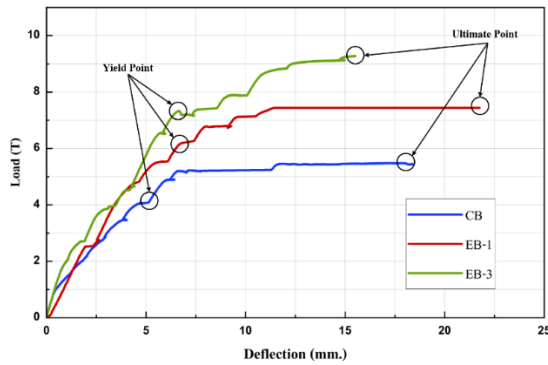
รูปที่ 6 รอยแตกกว้างของคาน EB-1 เมื่อมีการแอ่นตัวในแต่ละช่วง



รูปที่ 7 รอยแตกกว้างของคาน EB-3 เมื่อมีการแอ่นตัวในแต่ละช่วง

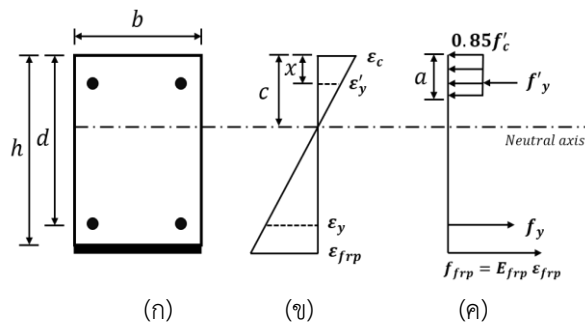
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของตัวอย่างคานทดสอบ

จากการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลังและเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น GFRP ได้นำค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำสูงสุด(Ultimate Load) และค่าการแอ่นตัว (Deflection) มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบ แสดงได้ดังรูปที่ 8 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงค่าการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน CB, EB-1 และ EB-3 ที่มีค่าการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนความหนาของเส้นใยแก้วแต่เมื่อความหนาถึงจุดหนึ่งจะมีผลของการหลุดล่อนของแผ่น GFRP ที่มาเสริมกำลังเป็นปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพในการเสริมกำลังนั้นลดลงก่อนที่จะแผ่น GFRP จะทำงานได้เต็มประสิทธิภาพของวัสดุ ก่อนที่เกิดความเสียหายของแผ่น GFRP จึงเป็นผลทำให้คาน EB-3 ที่เสริมกำลังด้วยโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วความหนาจำนวน 3 ชั้นนั้นมีความแอ่นตัวที่น้อยกว่าคาน EB-1 ที่มีการเสริมกำลังด้วยโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วความหนาจำนวน 1 ชั้น



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว

3.3 แบบจำลองเชิงทฤษฎี



รูปที่ 9 วิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

รูปที่ 9 (ก) แสดงหน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว รูปที่ 9 (ข) แสดงการกระจายความเครียดภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว รูปที่ 9 (ค) แสดงการกระจายหน่วยแรงและทิศทางของแรงลัพธ์ที่กระทำต่อน้ำตัด

ในการวิเคราะห์เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว จำเป็นต้องคำนึงถึงความเครียดประสิทธิผล (ϵ_{fe}) ความเครียดก่อนการหลุดล่อน (ϵ_{fd}) เกิดบริเวณแผ่น GFRP ที่นำมาเสริมกำลังเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดของแผ่น GFRP ก่อนเกิดการวิบัติที่จากการหลุดล่อน โดยจะนำค่าความเครียดที่น้อยที่ได้จากสมการที่ (1) หรือสมการที่ (2) มาวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์

$$\epsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{n_f E_f t_f}} \leq 0.9 \epsilon_{fu} \quad (1)$$

$$\epsilon_{fe} = \left[\left(\epsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) \right) - \epsilon_{bi} \right] \leq \epsilon_{fd} \quad (2)$$

แรงลัพธ์ที่กระทำต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว แบ่งออกเป็นสองส่วน โดยส่วนที่หนึ่งจากสมการที่ (3) คือแรงอัดลัพธ์ในคอนกรีต (C_c) ได้จากกำลังอัดสูงสุดคอนกรีต (f'_c) และความกว้างของหน้าตัดคาน (b) สมการที่ (4) แรงอัดลัพธ์ในเหล็กเสริมรับแรงอัด (C_s) ได้จากพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงอัด (A'_s) และความเค้นรับอัด (f'_y) ส่วนที่สองได้จากสมการที่ (5) คือแรงดึงลัพธ์ในเหล็กเสริมรับแรงดึง (T_s) และสมการที่ (6) แรงดึงลัพธ์ในแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเสริมกำลัง (T_{frp}) จากหลักการสมดุลตั้งสมการที่ (7) แรงลัพธ์อัดเท่ากับแรงลัพธ์ดึงในหน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว แทนค่าตัวแปรให้อยู่ในรูปสมการที่ (8) เพื่อให้ทราบถึงระยะแนวแกนสะเทิน (c) จากสมการที่ (9) แทนค่าให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของพื้นที่หน้าตัดและความเค้น ค่าโมเมนต์ได้จากสมการที่ (10) โดยจะมีการคำนวณโมเมนต์ที่จุดครากและจุดสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างค่าทดสอบ และค่าเชิงทฤษฎี แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า ค่าจากการทดสอบมีความใกล้เคียงกับค่าจากการคำนวณเชิงทฤษฎี

$$C_c = 0.85 f'_c ab \quad (3)$$

$$C_s = A'_s f'_y \quad (4)$$

$$T_s = A_s f_y \quad (5)$$

$$T_{frp} = A_{frp} f_{frp} \quad (6)$$

$$C_s + C_c = T_s + T_{frp} \quad (7)$$

$$A_s f_y + A_{frp} f_{frp} = 0.85 f'_c ab + A'_s f'_y \quad (8)$$

$$c = \frac{A_s f_y + A_{frp} f_{frp} - A'_s f'_y}{0.85 f'_c \beta_1 b} \quad (9)$$

$$M_n = T_{frp}(h-c) + T_s(d-c) + C_s(c-x) + C_c(c) \quad (10)$$

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบโมเมนต์ดัดเชิงทฤษฎีและโมเมนต์ดัดจากการทดสอบ

Beam	Yielding Moment (T-m)		Relative Error (%)	Ultimate Moment (T-m)		Relative Error (%)
	Analytical	Experimental		Analytical	Experimental	
CB	2.05	1.83	12.02	2.45	2.46	0.41
EB-1	2.48	2.76	10.14	3.42	3.35	2.09
EB-3	3.53	3.30	6.97	3.77	4.18	9.81

4.สรุปผลการทดสอบ

ผลลัพธ์จากการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุดและการคำนวณทางทฤษฎี พบว่าคานควบคุม (CB) มีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียว เกิดจากการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณกึ่งกลางคาน ดังนั้นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยแก้วจำนวน 1 และ 3 ชั้น(EB-1 และ EB-3) สามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกเพิ่มขึ้นจากคานควบคุมร้อยละ 36 และ 78 ตามลำดับ และคาน EB-1 มีค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นจากคาน CB ร้อยละ 18 แต่คาน EB-3 มีค่าการแอ่นตัวลดลงจากคาน CB ร้อยละ 0.9 ซึ่งเมื่อเทียบกับการเสริมกำลังด้วย CFRP ตามงานวิจัยของ Balamuralikrishnan และ Jeyasehar คานที่เสริมกำลังด้วย GFRP มีกำลังรับโมเมนต์ดัดที่ต่ำกว่าร้อยละ 10 แต่มีค่าการแอ่นตัวที่มากกว่าแสดงให้เห็นถึงความเหนียว (Ductility) ของคานที่มากกว่าก่อนที่จะเกิดการวิบัติ เมื่อเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดดัดประลัยระหว่างค่าเชิงทฤษฎีและค่าการทดสอบคานทดสอบ พบว่า มีค่าที่ใกล้เคียงกันแต่กรณีคาน EB-3 มีค่าการแอ่นตัวต่ำกว่าคาน EB-1 เนื่องจากเกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยแก้วมีผลจากความหนาที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่ามีการใช้ความสามารถของแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยแก้วได้เพียงร้อยละ 22 จึงควรมีการป้องกันการหลุดล่อนของแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในการเสริมกำลัง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ CIT-2023-GRAD-25 จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] E. G. Nawy, Reinforced Concrete: A Fundamental Approach, 4th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2000.
- [2] American Concrete Institute. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI440.1R-06), U.S.A.2006.
- [3] L. C. Hollaway and M. B. Leeming, Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering. Cambridge: Woodhead Publishing, 2001.
- [4] H. V. S. GangaRao, N. Taly, and P. V. Vijay, Reinforced Concrete Design with FRP Composites. Boca Raton: Taylor & Francis Group LLC., 2007.

- [5] P. Balaguru, A. Nanni, and J. Giancaspro, FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures: A Guide to Fundamentals and Design for Repair and Retrofit. New York: Taylor & Francis Group LLC., 2009.
- [6] H. A. Rasheed, Strengthening Design of Reinforced Concrete with FRP. Boca Raton: Taylor & Francis Group LLC., 2015.
- [7] H.C. Wu and C.D. Eamon, Strengthening of Concrete Structures Using Fiber Reinforced Polymers (FRP): Design, Construction and Practical Applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017.
- [8] I. L. K. Reid, Concrete Bridge Strengthening and Repair. London: Thomas Telford Ltd., 2009.
- [9] P. J. Fanning and O. Kelly, "Ultimate response of RC beams strengthened with CFRP plates", *Journal of Composites for Construction*, pp. 122-127, 2001.
- [10] Balamuralikrishnan, R., & Jeyasehar, C. A. (2009). Flexural behavior of RC beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) fabrics, *The Open Civil Engineering Journal*, 3(1), 102-109
- [11] Rodsins, K., Ejaz, A., Hussain, Q., & Parichatprecha, R. Experimental and analytical studies on low-cost GFRP composites strengthened RC beams: A comparison with carbon/sisal FRP. *Polymers*, 2023
- [12] Ayesha Siddika, Md. Abdullah Al Mamun, Rayed Alyousef, Y.H. Mugahed Amran (2019). Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: A review. *Journal of Building Engineering*, 25, 100798.
- [13] N. Attari, S. Amziane, and M. Chemrouk, Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets, *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 746-757, 2012.
- [14] P. Mukhopadhyaya and N. Swamy, Optimizing structural response of beams strengthened with GFRP plates, *Journal of Composites Construction*, vol. 2, no. 2, pp. 87-95, 1998.
- [15] H. Saadatmanesh and M. R. Ehsani, RC beams strengthened with GFRP plates. I : Experimental study, *Journal of Structural Engineering*, vol.117, no. 11, pp. 3417-3433, 1991.
- [16] N. F. Grace, G. A. Sayed, A. K. Soliman, and K. R. Saleh, Strengthening Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Laminates, *ACI Structural Journal*, 1999.
- [17] F. Taheri, K. Shahin, and I. Widiarsa, On the parameters influencing the performance of reinforced concrete beams strengthened with FRP plates, *Composite Structures*, vol. 58, pp. 217-226, 2002.
- [18] N. F. Grace, G. Abdel-Sayed, and W. F. Ragheb, "Strengthening of Concrete Beams Using Innovative Ductile Fiber-Reinforced Polymer Fabric, *ACI Structural Journal*, 2002.
- [19] V. N. Nguyen and V. V. Cao, NSM GFRP Strengthening of Reinforced Concrete Beams after Exposure to Fire: Experiments and Theoretical Model, *Journal of Composite Construction*, vol. 27, no. 1, 2023.
- [20] H. Rahimi and A. Hutchinson, Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Plates, *Journal of Composite Construction*, vol. 5, no.1, 2001.
- [21] ASTM C293/C293M-16, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading).