



ผลกระทบของกราฟีนออกไซด์ต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยสังเคราะห์และซีเมนต์มอร์ตาร์

อภิสิทธิ์ เตชพัฒนานกร* บุชิต มาโก้ สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม และ ปิติ สุนทรสุขกุล

ศูนย์วิจัยวัสดุอาคารและกรก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เชรชชฐา รัตนพันธ์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญา จินดาประเสริฐ

ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2555 2000 ต่อ 8126 อีเมล: apisit.civileng@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.09.017

รับเมื่อ 25 พฤษภาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 30 ธันวาคม 2563 ตอรับเมื่อ 5 มกราคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 28 กันยายน 2565

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

กราฟีนเป็นวัสดุระดับนาโน ซึ่งสังเคราะห์จากแกรไฟต์ด้วยวิธีทางเคมี ที่มีโครงสร้างระดับอนุภาคทางเคมีเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมที่เชื่อมด้วยพันธะโคเวเลนต์ จึงทำให้มีคุณสมบัติที่โดดเด่นด้านความแข็งแรง นำไฟฟ้าได้ดีและมีความยืดหยุ่นสูง งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การผสมกราฟีนส่งผลให้กำลังรับแรงของมอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของกราฟีนออกไซด์ต่อแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์กับเส้นใยสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วย เส้นใยพอลิโพรพิลีน เส้นใยแก้วและเส้นใยบะซอลต์ โดยนำสารละลายกราฟีนออกไซด์มาผสมร่วมกับซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างทดสอบถูกนำมาทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของเส้นใยด้วยวิธีถอนเส้นใยเดี่ยว (Single Pull Out Test) ผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างที่มีการฝังตัวของเส้นใยในมอร์ตาร์ผสมด้วยสารละลายกราฟีนออกไซด์มีแรงยึดเหนี่ยวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมและเส้นใยแก้ว มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยสังเคราะห์และมอร์ตาร์สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับประเภทของเส้นใยทั้งหมด

คำสำคัญ: กราฟีนออกไซด์ การทดสอบถอนเส้นใยเดี่ยว แรงยึดเหนี่ยว เส้นใยบะซอลต์ เส้นใยแก้ว เส้นใยพอลิโพรพิลีน

การอ้างอิงบทความ: อภิสิทธิ์ เตชพัฒนานกร, บุชิต มาโก้, สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม, ปิติ สุนทรสุขกุล, เชรชชฐา รัตนพันธ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, “ผลกระทบของกราฟีนออกไซด์ต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยสังเคราะห์และซีเมนต์มอร์ตาร์,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 32, ฉบับที่ 4, หน้า 924-933, ต.ค.-ธ.ค. 2565.



The Effect of Graphene Oxide in Bond Strength between Synthetic Fibers and Cement Mortar

Apisit Techaphatthanakon*, Buchit Maho, Sittisak Jamnam and Piti Sukontasukkul

Construction and Building Materials Research Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Chesta Ruttanapun

Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Prinya Chindapasirt

Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2555 2000 Ext. 8126, E-mail: apisit.civileng@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.09.017

Received 25 May 2020; Revised 30 December 2020; Accepted 5 January 2021; Published online: 28 September 2022

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Graphene is a nanomaterial chemically synthesized from graphite. The microstructure of graphene is in hexagonal form with covalent bonding. It exhibits excellent rigidity, electrical conductivity and flexibility. Several researches indicated that mixing graphene oxide with cement mortar can noticeably increase its strength. In this study, the effects of Graphene Oxide (GO) on the bonding strength of synthetic fibers were investigated. Three types of fibers were used, i.e. polypropylene, glass and basalt fibers. The GO solution was mixed with mortar. The specimens were subjected to a single fiber pullout test. Results showed that the sample with fiber embedded in GO mortar exhibited higher bonding strength than the control sample. The glass fiber had the highest bond strength compared to the others.

Keywords: Graphene Oxide, Single Fiber Pullout Test, Bond Strength, Basalt Fiber, Glass Fiber, Polypropylene Fiber

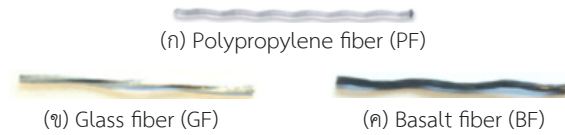
Please cite this article as: A. Techaphatthanakon, B. Maho, S. Jamnam, P. Sukontasukkul, C. Ruttanapun, and P. Chindapasirt, "The effect of graphene oxide in bond strength between synthetic fibers and cement mortar," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 4, pp. 924-933, Oct.-Dec. 2022 (in Thai).

1. บทนำ

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเป็นนวัตกรรมที่มีความแพร่หลายมากขึ้น ส่วนใหญ่นำไปประยุกต์ในลักษณะของวัสดุคอมโพสิต ส่งผลให้วัสดุมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูงขึ้น ซึ่งกราฟีนเป็นวัสดุระดับนาโนที่ถูกค้นพบและได้รับความสนใจจากนักวิจัยอย่างมาก โดยกราฟีนมีลักษณะเป็น 2 มิติ เกิดจากการเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็นโครงสร้างหกเหลี่ยมที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ ซึ่งสังเคราะห์ได้จากแกรไฟต์ด้วยวิธีทางเคมี จากองค์ประกอบของกราฟีนที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก ทำให้มีความโดดเด่นในด้านความแข็งแรง การนำไฟฟ้าได้ดีและมีความยืดหยุ่นบิดงอได้ [1]

รูปแบบของกราฟีนสามารถแบ่งได้เป็นกราฟีนแบบหลายชั้น (Multilayer Graphene) กราฟีนแบบชั้นเดียว (Graphene Nanosheet) กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced Graphene Oxide) [2] โดยกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide) เป็นสารที่ได้จากการออกซิไดซ์ของแกรไฟต์ ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล อีพอกซี คาร์บอนิล และคาร์บอกซิล ที่มีลักษณะเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) สามารถละลายในน้ำได้ [3]

ในด้านวิศวกรรมโยธามีการศึกษาผลกระทบของกราฟีนออกไซด์ต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต Wengui และคณะ [4] ศึกษาซีเมนต์เพสต์ที่ผสมด้วยกราฟีนออกไซด์ในสัดส่วน 0.02–0.08% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 19.1–46.8% เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม Donghoon และคณะ [5] และ Shenghua และคณะ [6] ทำการทดสอบมอร์ตาร์ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ สัดส่วนผสม 0.005–1% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ พบว่า ที่สัดส่วนผสม 0.05% มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ซึ่งเพิ่มขึ้น 32.0–47.9% จากมอร์ตาร์ควบคุม และต่อมา Devi และ Khan [7] ทำการผสมกราฟีนออกไซด์ในคอนกรีต สัดส่วนผสม 0.02–0.08% โดยน้ำหนักซีเมนต์มีอัตราส่วน ซีเมนต์ : มวลรวมละเอียด : มวลรวมหยาบ : น้ำ (1 : 1.86 : 2.89 : 0.45) จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 9–21% ซึ่งกราฟีนออกไซด์มี



รูปที่ 1 รูปทรงของเส้นใยสังเคราะห์

ผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ

ปัจจัยที่มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวของเส้นใยสังเคราะห์กับมอร์ตาร์ประกอบด้วยกำลังของมอร์ตาร์ กำลังของเส้นใยและรูปทรงเส้นใย ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้เป็นความพยายามในการปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวของเส้นใยสังเคราะห์กับมอร์ตาร์ด้วยการใช้สารละลายกราฟีนออกไซด์ผสมร่วมกับมอร์ตาร์ เส้นใยที่ใช้ทดสอบมี 3 ชนิด ประกอบด้วยเส้นใยที่มีความยืดหยุ่นสูงคือ เส้นใยโพลีโพรพิลีน และเส้นใยที่มีคุณสมบัติเปราะ คือ เส้นใยแก้วและเส้นใยบะซอลต์ โดยนำตัวอย่างที่เตรียมไปทำการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวด้วยวิธีถอนเส้นใยเดี่ยว (Single Pull Out Test) อัตราเร็วในการดึง 60 และ 180 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งเก็บข้อมูลเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนกับระยะดึงของหัวทดสอบ ลักษณะการวิบัติและวิเคราะห์ผลเป็นค่าความเค้นสูงสุดของเส้นใยและความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ย โดยดำเนินงานวิจัยดังนี้

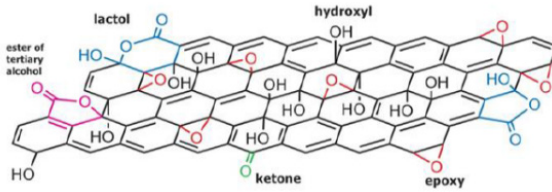
2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

2.1.1 วัสดุ

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1
- 2) ทรายละเอียด ผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ค้างเบอร์ 50
- 3) น้ำสะอาด
- 4) สารเคมีผสมเพิ่ม (Superplasticizer)
- 5) เส้นใยโพลีโพรพิลีน (Polypropylene Fiber; PF)
- 6) เส้นใยแก้ว (Glass Fiber; GF)
- 7) เส้นใยบะซอลต์ (Basalt Fiber; BF)

คุณสมบัติของเส้นใยทั้ง 3 ประเภท ซึ่งกล่าวถึงประเภทรูปร่าง ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลางและกำลังรับแรงดึงของเส้นใยนั้น แสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 1



รูปที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของสารละลายกราฟีนออกไซด์

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเส้นใยสังเคราะห์

Fiber	Polypropylene Fiber (PF)	Glass Fiber (GF)	Basalt Fiber (BF)
Type	polymer	bundle with coating	bundle with coating
Shape	crimped	twisted	twisted
Length (mm)	55	43	43
Diameter (mm)	0.85	0.72	0.72
Tensile strength (N/mm ²)	365	1,100	1,400

8) สารละลายกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide Solution) ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มีลักษณะโครงสร้างทางเคมี ดังรูปที่ 2 มีคุณสมบัติ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสารละลายกราฟีนออกไซด์

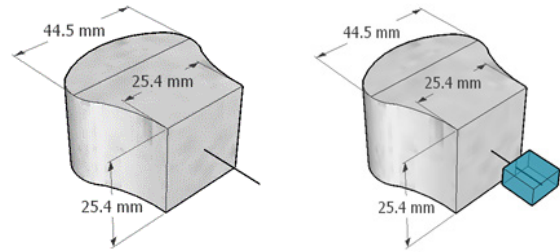
Graphene Oxide Solution (GO)	
Appearance	Brown/Black
Solvent	Dispersion in H ₂ O
Concentration (mg/mL)	10

2.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องทดสอบแรง (Universal Testing Machine) สามารถทดสอบแรงได้สูงสุด 10 กิโลนิวตัน

2.2 สัดส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

กำหนดให้มอร์ตาร์ควบคุมมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.37 อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1 : 1.77 โดยปริมาตร สารลดน้ำพิเศษ สัดส่วน 1% โดยน้ำหนักของ



(ก)

(ข)

รูปที่ 3 ลักษณะของตัวอย่างทดสอบ

ซีเมนต์ และสำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมสารละลายกราฟีนออกไซด์ ทำการผสมที่สัดส่วน 0.05% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมมอร์ตาร์

Specification	Proportion of Mix (kg/m ³)			GO Fraction
	Cement	Sand	Water	
Normal Cement Mortar (NC)	825	1,221	305	-
Graphene Oxide Modified Mortar (GOM)	825	1,221	305	0.05%

การหล่อตัวอย่าง ทำได้โดยการผสมปูนซีเมนต์กับทรายให้เข้ากัน จากนั้นจึงเติมน้ำกับสารเคมีผสมเพิ่ม และผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เทลงแบบหล่อขนาดพื้นที่หน้าตัด 25.4 × 25.4 มิลลิเมตร โดยฝังเส้นใยบริเวณกึ่งกลางของหน้าตัดแบบหล่อ ระยะในการฝัง 30 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3 (ก) สำหรับตัวอย่างที่ปรับปรุงด้วยการผสมสารละลายกราฟีนออกไซด์ร่วมกับมอร์ตาร์ ให้ผสมสารละลายกราฟีนออกไซด์กับน้ำก่อนการผสมกับมวลรวมแห้ง ซึ่งเมื่อมอร์ตาร์แข็งตัวสมบูรณ์ จึงทำการบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน และก่อนการทดสอบสำหรับตัวอย่างที่เป็นเส้นใยบะซอลต์หรือเส้นใยแก้ว ต้องทำการหล่อเรซินบริเวณปลายเส้นใย เนื่องจากเส้นใยข้างต้นมีคุณสมบัติเปราะ เมื่อเครื่องทดสอบทำการจับยึดเส้นใย จะเกิดการแตกหัก ดังนั้น จึงควรป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติก่อนการทดสอบ ดังรูปที่ 3 (ข)

2.3 ประเภทของตัวอย่างทดสอบ

1) ตัวอย่างทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยสังเคราะห์กับมอร์ตาร์ ตัวอย่างในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3 สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้ 1) ตัวอย่างควบคุม (NC/F) เตรียมจากมอร์ตาร์ปกติฝังด้วยเส้นใย และ 2) ตัวอย่างที่เตรียมจากการฝังเส้นใยในมอร์ตาร์ที่ผสมสารละลายกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide-morta; GOM/F) ตัวอย่างทำการทดสอบ โดยกำหนดอัตราเร็วในการดึงที่ 60 และ 180 มิลลิเมตรต่อนาที ดังแสดงในตารางที่ 4

2) ตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดของ NC และ GOM ทำการทดสอบมอร์ตาร์ของตัวอย่างควบคุม (NC) และมอร์ตาร์ที่ผสมสารละลายกราฟีนออกไซด์ สัดส่วนผสม 0.05% โดยน้ำหนักซีเมนต์ (GOM) ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ประเภทของตัวอย่างทดสอบ

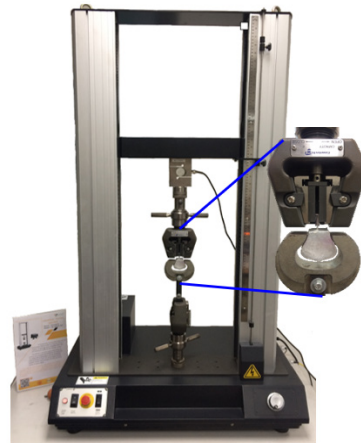
Type	No. of Specimens	
Single Pull Out Test	60 mm/min	180 mm/min
NC/F: NC/PF	3	3
NC/GF	3	3
NC/BF	3	3
GOM/F: GOM/PF	3	3
GOM/GF	3	3
GOM/BF	3	3
Compressive Strength Test		
NC	3	
GOM	3	

2.4 วิธีการทดสอบ

1) ทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-16a

2) ทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยสังเคราะห์กับมอร์ตาร์

ทำการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของเส้นใยด้วยวิธีถอนเส้นใยเดี่ยวอัตราเร็วในการดึง 60 และ 180 มิลลิเมตรต่อนาที โดยติดตั้งตัวอย่างกับเครื่องทดสอบ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

2.5 การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล

1) กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ดังสมการที่ (1)

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

σ คือ กำลังรับแรงอัด (N/mm²)

P คือ แรง (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัด (mm²)

2) ความเค้นดึงสูงสุดของเส้นใย ภายใต้แรงถอน (Pullout Tensile Strength of Fiber) ดังสมการที่ (2)

$$\sigma_{f,max} = \frac{P_{max}}{A_f} \quad (2)$$

$\sigma_{f,max}$ คือ ความเค้นดึงสูงสุดของเส้นใย (N/mm²)

P_{max} คือ แรงสูงสุด (N)

A_f คือ พื้นที่หน้าตัดของเส้นใย (mm²)

3) ความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ย (Average Bond Strength) ดังสมการที่ (3)

$$\tau_{av} = \frac{P_{max}}{\pi d_f L_E} \quad (3)$$

τ_{av} คือ ความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ย (N/mm²)

P_{max} คือ แรงสูงสุด (N)

d_f คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเส้นใย (mm)

L_E คือ ความยาวที่ฝังของเส้นใย (mm)

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

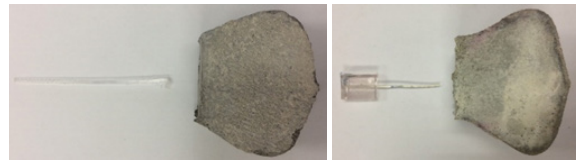
3.1 กำลังรับแรงอัด

ผลการทดลอง พบว่า การผสมสารละลายกราฟีนออกไซด์ ในมอร์ตาร์ควบคุมที่สัดส่วน 0.05% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น จาก 42.20 MPa เป็น 49.13 MPa ซึ่งกำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้น 16.42% เมื่อเทียบกับ มอร์ตาร์ควบคุม โดยการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดของ มอร์ตาร์ที่ผสมสารละลายกราฟีนออกไซด์เกิดจากการที่กราฟีน ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็กในระดับนาโน และประกอบด้วย หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) คาร์บอกซิล (-COOH) จำนวนมาก ซึ่งมีสมบัติในการดูดซับน้ำที่ดี จึงทำให้กราฟีนออกไซด์ สามารถ ทำหน้าที่เป็นตัวเติมเต็มช่องว่าง (Filler) พร้อมกับกำลัเสียง โมเลกุลของน้ำเพื่อทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นของซีเมนต์ (C_3A , C_4AF , C_3S และ C_2S) และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่าง สมบูรณ์ โดยผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (C-S-H และ $Ca(OH)_2$) อาจสร้างพันธะโคเวเลนต์กับหมู่คาร์บอกซิลของ กราฟีนออกไซด์ โดยพันธะโคเวเลนต์ทำหน้าที่ส่งผ่านแรง จากเมทริกซ์สุกรีฟีนออกไซด์ ทำให้มีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น

3.2 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและมอร์ตาร์

3.2.1 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยสังเคราะห์กับมอร์ตาร์

จากการทดสอบตัวอย่างเกิดการวิบัติ 2 ลักษณะ คือ เส้นใยหลุดออกจากมอร์ตาร์ (Slip) หรือเส้นใยเกิดการฉีกขาด (Torn) โดยลักษณะการวิบัติขึ้นอยู่กับกำลังของเส้นใย แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับมอร์ตาร์ (ความเค้นดึงสูงสุดของเส้นใย ภายใต้แรงถอน) ซึ่งการวิบัติแบบเส้นใยหลุดออกจากมอร์ตาร์ แสดงถึงกำลังรับแรงดึงของเส้นใยมีค่าสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยว ทำให้เส้นใยถูกดึงหลุดออกจากมอร์ตาร์ได้อย่างสมบูรณ์และไม่เกิดการฉีกขาด ส่วนการวิบัติแบบเส้นใยฉีกขาด ในตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ฝังด้วยเส้นใยปะชอลต์ พบว่ากำลังรับแรงดึงของเส้นใยมีค่าสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวและเกิดการวิบัติแบบฉีกขาด เนื่องจากการวิบัติแบบฉีกขาดไม่ได้เกิดขึ้นกับเส้นใยโดยตรง แต่เกิดการวิบัติบริเวณเส้นใยที่ฝังอยู่ในมอร์ตาร์ ซึ่งจากการส่องภาพการวิบัติของเส้นใย



(ก) Polypropylene fiber (ข) Glass fiber

รูปที่ 5 เส้นใยเกิดการวิบัติแบบรูดออกจากมอร์ตาร์



Basalt fiber

รูปที่ 6 เส้นใยเกิดการวิบัติแบบฉีกขาด

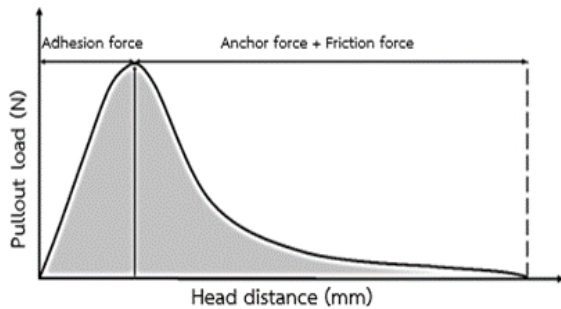
ด้วยกล้องจุลทรรศน์ แสดงให้เห็นว่าผิวเคลือบของเส้นใยมีการหลุดลอก ทำให้กลุ่มของเส้นใยแตกออกเปรียบเสมือนเส้นใยแต่ละเส้นรับแรงถอนโดยตรงส่งผลให้เส้นใยมีความแข็งแรงลดลง และมีความสามารถในการรับแรงถอนต่ำลงเช่นกัน จากนั้นจึงเกิดการวิบัติแบบฉีกขาด โดยลักษณะการวิบัติในแต่ละประเภทของตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 5 และสำหรับรูปที่ 5 และ 6 แสดงภาพการวิบัติของตัวอย่างแบบเส้นใยรูดออกจากมอร์ตาร์อย่างสมบูรณ์ และเส้นใยเกิดการฉีกขาดก่อนการรูดออกจากมอร์ตาร์ ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง

Type of Samples	Mode of Failure	
	Speed Test	
	60 mm/min	180 mm/min
NC/PF	Slip	Slip
GOM/PF	Slip	Slip
NC/GF	Slip	Slip
GOM/GF	Slip	Slip
NC/BF	Torn	Torn
GOM/BF	Torn	Torn

3.2.2 พฤติกรรมภายใต้แรงถอนเส้นใยเดี่ยว

1) ผลกระทบของสารละลายกราฟีนออกไซด์ต่อ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนของเส้นใยกับระยะดึงของหัวทดสอบ

พฤติกรรมภายใต้แรงถอนเส้นใยเดี่ยว

ผลการทดสอบแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนของเส้นใยกับระยะดึงของหัวทดสอบ ซึ่งในแต่ละระยะการถอนเส้นใย สามารถแบ่งลักษณะของแรงได้เป็นแรงยึดเกาะ (Adhesion Force) แรงยึดรั้ง เนื่องจากรูปทรงของเส้นใย (Anchor Force) และแรงเสียดทานระหว่างเส้นใยกับมอร์ตาร์ (Friction Force)

ดังนั้น จากกราฟความสัมพันธ์สามารถแบ่งช่วง และอธิบายถึงพฤติกรรมใต้แรงถอนเส้นใยเดี่ยวได้ ดังนี้ ช่วงที่ 1 เป็นอิทธิพลของแรงยึดเกาะ เมื่อเส้นใยเริ่มมีรับแรงถอนจนถึงจุดสูงสุด หรือจุดที่แรงถอนมีค่าเท่ากับแรงยึดเกาะ ทำให้เส้นใยเริ่มหลุดออกจากมอร์ตาร์หลังจากค่าแรงถอนสูงสุดเริ่มเข้าสู่ช่วงที่ 2 เป็นอิทธิพลของแรงยึดรั้ง เนื่องจากรูปทรงของเส้นใย และแรงเสียดทานระหว่างเส้นใยกับมอร์ตาร์ โดยลักษณะกราฟช่วงนี้ขึ้นอยู่กับรูปทรงของเส้นใยเป็นหลัก ดังรูปที่ 7

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนของเส้นใยกับระยะดึงของหัวทดสอบที่อัตราเร็วในการดึง 60 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่า ช่วงที่ 1 แรงถอนเส้นใยเดี่ยวของตัวอย่าง GOM/PF, GOM/GF และ GOM/BF เพิ่มขึ้นตามระยะดึงของหัวทดสอบและมีค่าสูงสุดสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง NC/PF, NC/GF และ NC/BF เป็นผลจากการผสมสารละลายกราฟีนออกไซด์ร่วมกับมอร์ตาร์ ส่งผลให้มีค่าแรงยึดเกาะสูงขึ้น เนื่องจากสารละลายกราฟีนออกไซด์ ทำหน้าที่ไล่เลียงน้ำไปส่วนต่างๆ ของมอร์ตาร์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นและมีการสร้างพันธะโควาเลนต์กับ C-S-H

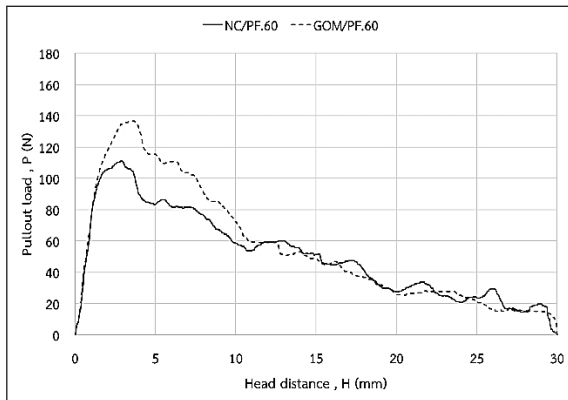
และ Ca(OH)_2 ดังรูปที่ 8

เมื่อเข้าสู่ช่วงที่ 2 สำหรับตัวอย่าง NC/PF และ GOM/PF แสดงดังรูปที่ 8 (ก) ความสามารถในการรับแรงถอนลดลงเป็นลำดับขั้น เนื่องจากแรงเสียดทานและแรงยึดรั้ง จากรูปทรงของเส้นใยพอลิโพรพิลีน โดยรูปทรงเส้นใยเป็นแบบรอยหยัก (Crimped) ทำให้เส้นใยสามารถรับแรงถอนเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่รอยหยัก และลดลงหลังผ่านรอยหยัก ด้วยกำลังรับแรงดึงของเส้นใยพอลิโพรพิลีนที่มีค่าสูงกว่าแรงยึดเกาะ แรงยึดรั้ง และแรงเสียดทานระหว่างเส้นใยกับมอร์ตาร์ ทำให้เส้นใยพอลิโพรพิลีนวิบัติแบบเส้นใยหลุดจากมอร์ตาร์อย่างสมบูรณ์

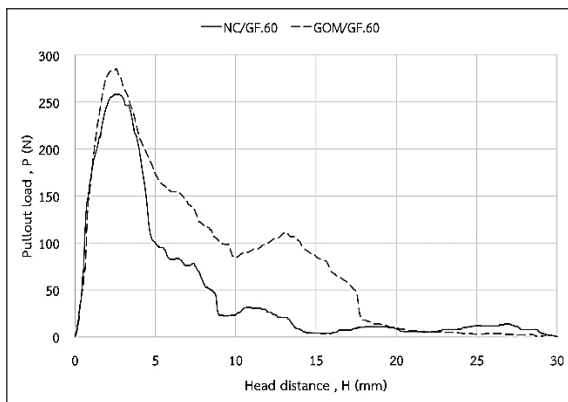
ส่วนตัวอย่าง NC/GF และ GOM/GF เมื่อเริ่มเข้าสู่ช่วงที่ 2 เป็นอิทธิพลของแรงยึดรั้ง เนื่องจากรูปทรงของเส้นใย และแรงเสียดทานระหว่างเส้นใยกับมอร์ตาร์ โดยอิทธิพลของแรงยึดรั้ง เกิดขึ้นในช่วงที่เส้นใยมีความสามารถในการรับแรงถอนลดลงและสูงขึ้นตามระยะการถอนของเส้นใย เป็นผลมาจากรูปทรงของเส้นใยแก้วเป็นแบบเส้นใยพันเกลียว ซึ่งมีพื้นที่ผิวในการขัดลอกจากรูปทรง (แรงยึดรั้ง) ตามระยะการพันเกลียวของเส้นใย โดยเส้นใยสามารถรับแรงถอนได้สูงขึ้น เมื่อระยะการถอนเริ่มเข้าสู่ระยะพันเกลียวของเส้นใย และลดลงเมื่อผ่านระยะพันเกลียวนั้น สำหรับแรงเสียดทานระหว่างเส้นใยกับมอร์ตาร์ มีผลต่อความสามารถในการรับแรงถอนในทุกระยะการถอนของเส้นใย ซึ่งจากการเปรียบเทียบระหว่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนกับกำลังรับแรงดึงของเส้นใย พบว่า กำลังรับแรงดึงของเส้นใยแก้วมีค่าสูงกว่าแรงยึดเกาะในช่วงที่ 1 และแรงยึดรั้งกับแรงเสียดทานระหว่างเส้นใยกับมอร์ตาร์ในช่วงที่ 2 ทำให้ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนของเส้นใยกับระยะดึงของหัวทดสอบ สามารถระบุการวิบัติของตัวอย่าง NC/GF และ GOM/GF เป็นแบบ Slip ดังรูปที่ 8 (ข)

ลักษณะของกราฟช่วงที่ 2 บ่งบอกถึงตัวอย่างที่ผสมสารละลายกราฟีนออกไซด์ร่วมกับมอร์ตาร์ (GOM/PF, GOM/GF) มีผลทำให้แรงเสียดทานระหว่างเส้นใยกับมอร์ตาร์สูงขึ้นเปรียบเทียบกับตัวอย่าง NC/PF และ NC/GF ตามลำดับ

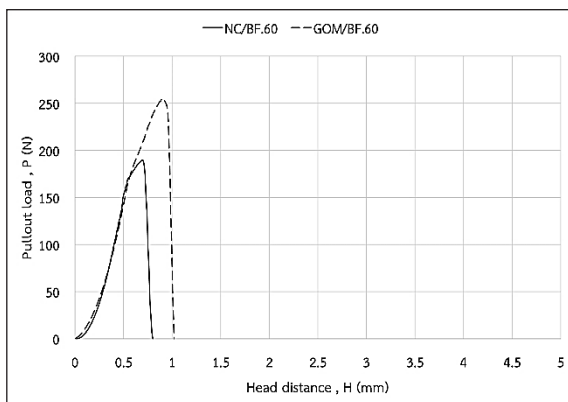
สำหรับตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ฝังด้วยเส้นใยบะซอลต์ (NC/BF, GOM/BF) ซึ่งเป็นเส้นใยประเภทมัดและคงรูปด้วย



(ก) ตัวอย่าง NC/PF และ GOM/PF



(ข) ตัวอย่าง NC/GF และ GOM/GF



(ค) ตัวอย่าง NC/BF และ GOM/BF

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนของเส้นใยกับระยะดึงของหัวทดสอบ อัตราเร็วในการดึง 60 มิลลิเมตรต่อวินาที

การเคลือบผิว (Bundle with Coating) มีการวิบัติแบบ Torn ทั้งหมด และเกิดในกราฟความสัมพันธ์ช่วงที่ 1 ที่ความสามารถในการรับแรงถอน ขึ้นอยู่กับแรงยึดเกาะหรือพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับมอร์ตาร์เป็นหลัก ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ แสดงว่าเมื่อเส้นใยบะซอลต์รับแรงถอนจนถึงจุดสูงสุด ทำให้ผิวเคลือบของเส้นใยเกิดการหลุดลอกเป็นบริเวณกว้าง ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับมอร์ตาร์และพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยลดลงจนเกิดการวิบัติ จากนั้นจึงมีผลให้ความสามารถในการรับแรงถอนลดลงอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 8 (ค)

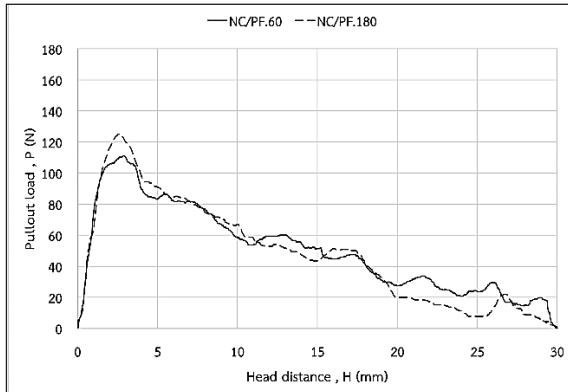
ดังนั้น จากกราฟโดยรวมในรูปที่ 8 (ก) ถึง 8 (ค) แสดงถึงเส้นใยสังเคราะห์ที่ฝังในมอร์ตาร์ผสมสารละลายกราฟีนออกไซด์ ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับมอร์ตาร์สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ฝังในมอร์ตาร์ควบคุม

2) ผลกระทบของอัตราเร็วในการดึงต่อพฤติกรรมภายใต้แรงถอนเส้นใยเดี่ยว

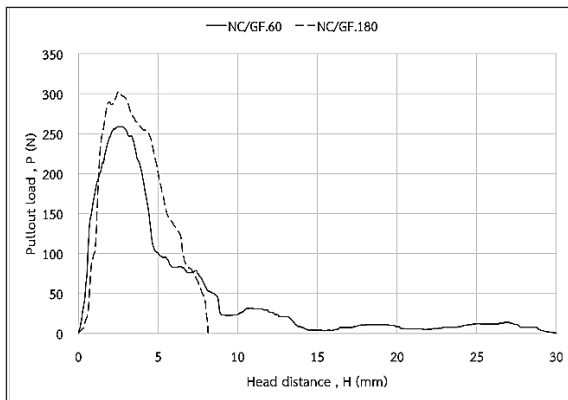
จากผลการทดสอบ อัตราเร็วในการดึงมีผลต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนของเส้นใยกับระยะดึงของหัวทดสอบทุกตัวอย่างทดสอบ โดยในช่วงที่ 1 ส่งผลให้ค่าแรงยึดเกาะเพิ่มสูงขึ้นและเมื่อเข้าสู่ช่วงที่ 2 มีผลทำให้แรงยึดรั้งเนื่องจากรูปทรงของเส้นใยและแรงเสียดทานระหว่างเส้นใยกับมอร์ตาร์เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเทียบอัตราเร็วในการดึงที่ต่ำกว่า แสดงถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและมอร์ตาร์มีคุณสมบัติที่อ่อนไหวต่ออัตราการใส่แรงกระทำ (Rate Sensitive) ดังรูปที่ 9 (ก) ถึง 9 (ค) และจากรูปที่ 9 (ข) การเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วในการดึงจาก 60 เป็น 180 มิลลิเมตรต่อวินาที ส่งผลให้ตัวอย่าง NC/GF เกิดการวิบัติแบบรูดออกจากมอร์ตาร์อย่างรวดเร็ว เนื่องจากผิวเคลือบของเส้นใยแก้วมีการหลุดลอก ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับมอร์ตาร์ลดลง ทำให้แรงเสียดทานช่วงที่ 2 ลดลงอย่างรวดเร็วและเส้นใยรูดออกจากมอร์ตาร์อย่างสมบูรณ์

3.2.3 ความเค้นดึงสูงสุดและความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ยของเส้นใยภายใต้แรงถอนเส้นใยเดี่ยว

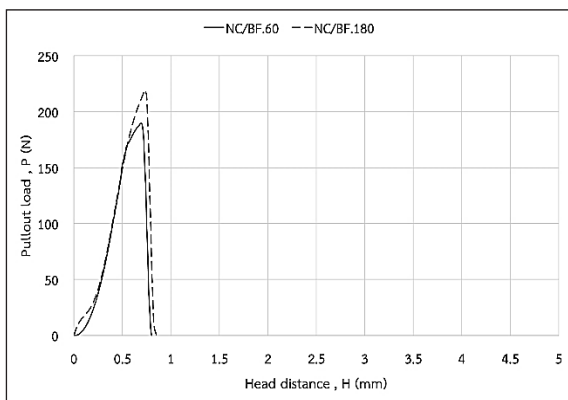
1) ผลกระทบของสารละลายกราฟีนออกไซด์ต่อความเค้นดึงสูงสุดและความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ย



(ก) ตัวอย่าง NC/PF



(ข) ตัวอย่าง NC/GF



(ค) ตัวอย่าง NC/BF

รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนของเส้นใยกับระยะดึงของหัวทดสอบ อัตราเร็วในการดึง 60 และ 180 มิลลิเมตรต่อนาที

จากการวิเคราะห์ผล ความเค้นดึงสูงสุดและความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ยของเส้นใยที่ฝังตัวในมอร์ตาร์ผสมสารละลายกราฟีนออกไซด์ (GOM/PF, GOM/GF และ GOM/BF) มีค่าเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ฝังตัวในมอร์ตาร์ควบคุม (NC/PF, NC/GF และ NC/BF) โดยเพิ่มขึ้น 10.50 - 34.50% และ 6.47 - 30.09% ที่อัตราเร็วในการดึง 60 และ 180 มิลลิเมตรต่อนาที ตามลำดับ และแสดงค่าความเค้นดึงสูงสุด ความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ยของเส้นใยแต่ละประเภท ดังตารางที่ 6

2) ผลกระทบของอัตราเร็วในการดึงต่อความเค้นดึงสูงสุดและความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ย

ความเค้นดึงสูงสุดและความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น ตามอัตราเร็วในการดึงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเพิ่มขึ้น 13.73-17.21% และ 12.93-24.95% สำหรับตัวอย่างที่ฝังเส้นใยในมอร์ตาร์ควบคุม (NC/PF, NC/GF และ NC/BF) และตัวอย่างที่ฝังเส้นใยในมอร์ตาร์ผสมสารละลายกราฟีนออกไซด์ (GOM/PF, GOM/GF และ GOM/BF) ตามลำดับ โดยแสดงค่าความเค้นดึง ความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ย ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ความเค้นดึงสูงสุดและความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ย

Type	Pullout Tensile Strength of Fiber (N/mm ²)		Average Bond Strength (N/mm ²)	
	Rate of Loading (mm/min)		Rate of Loading (mm/min)	
	60	180	60	180
NC/PF	194.7	221.4	1.38	1.57
GOM/PF	227.0	283.7	1.61	2.01
NC/GF	635.1	744.4	3.81	4.47
GOM/GF	701.8	792.6	4.21	4.76
NC/BF	466.5	539.3	2.80	3.24
GOM/BF	627.4	701.6	3.76	4.21

4. สรุป

กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์การผสมสารละลายกราฟีนออกไซด์ร่วมกับมอร์ตาร์ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น เนื่องจากกราฟีนออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นตัวเติมเต็ม

ช่องว่าง (Filler) พร้อมกับลำเลียงโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและมอร์ตาร์แรงยึดเหนี่ยวของเส้นใยสังเคราะห์กับมอร์ตาร์แปรผันตามกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ประเภทของเส้นใยและอัตราเร็วในการตั้ง โดยการผสมสารละลายกราฟีนออกไซด์ในมอร์ตาร์ ทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวของตัวอย่างทดสอบทุกประเภทของเส้นใยและทุกอัตราเร็วในการตั้งมีค่าสูงขึ้นตลอดระยะเวลาการถอนเส้นใย

สำหรับประเภทของเส้นใย มีผลต่อการลดลงของแรงยึดเหนี่ยวหลังจากผ่านจุดสูงสุด โดยเส้นใยที่มีความเปราะ เช่น เส้นใยแก้วและเส้นใยบะซอลต์ เมื่อรับแรงถอนสูงสุดทำให้ผิวเคลือบของเส้นใยเกิดการหลุดลอก ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับมอร์ตาร์ลดลง มีผลให้แรงยึดเหนี่ยวลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน จากนั้นจึงเกิดการวิบัติแบบเส้นใยหลุดออกจากมอร์ตาร์อย่างสมบูรณ์ และเส้นใยเกิดการฉีกขาดก่อนหลุดออกจากมอร์ตาร์ในเส้นใยแก้วและเส้นใยบะซอลต์ตามลำดับ โดยเส้นใยบะซอลต์มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและมอร์ตาร์ต่ำกว่าเส้นใยแก้ว เนื่องจากเส้นใยบะซอลต์มีการหลุดลอกของผิวเคลือบเส้นใยที่สูงกว่า ทำให้กลุ่มเส้นใยแตกออกและมีความสามารถในการรับแรงถอนลดลง สำหรับเส้นใยที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น เส้นใยพอลิโพรพิลีน หลังจากที่มีค่าแรงยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดแล้วมีการลดลงแบบเป็นลำดับขั้นจนเส้นใยหลุดออกจากมอร์ตาร์ได้อย่างสมบูรณ์ แสดงถึงกำลังของเส้นใยมีค่าสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยว

ในกรณีของอัตราการใส่แรงถอน เมื่อเพิ่มอัตราการใส่แรงถอนขึ้นจาก 60 เป็น 180 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวมีค่าสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยมีความอ่อนไหวต่ออัตราเร็วของการใส่แรงกระทำ (Stress Rate Sensitive)

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม สัญญาเลขที่ MSD 62I0063

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Wisetsuwannaphum, "Graphene, 2D materials for the future," *Materials Technology Journal*, vol. 84, pp. 66–70, 2017.
- [2] L. De Marchi, C. Pretti, B. Gabriel, P. A. A. P. Marques, R. Freitas, and V. Neto, "An overview of graphene materials: Properties, applications and toxicity on aquatic environments," *Science of the Total Environment*, vol. 631–632, pp. 1440–1456, 2018.
- [3] N. M. S Hidayah, Wei. Liu, C. Lai, N. Z. Noriman, C. Khe, U. Hashim, and H. Lee, "Comparison on graphite, graphene oxide and reduced graphene oxide: Synthesis and characterization," in *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 2017.
- [4] W. Li, X. Li, S. J. Chen, Y. Liu, W. H. Duan, and S. P. Shah, "Effects of graphene oxide on early-age hydration and electrical resistivity of Portland cement paste," *Construction and Building Materials*, vol. 136, pp. 506–514, 2017.
- [5] D. Kang, K. S. Seo, H. Lee, and W. Chung, "Experimental study on mechanical strength of GO-cement composites," *Construction and Building Materials*, vol. 131, pp. 303–308, 2017.
- [6] S. Lv, Y. Ma, C. Qiu, T. Sun, J. Liu, and Q. Zhou, "Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites," *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 121–127, 2013.
- [7] S. C. Devi and R. A. Khan, "Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 27, pp. 1–12, 2020.