



บทความวิจัย

ความสามารถในการต้านทานกระสุนระดับ 3A ของผนังคอนกรีตแบบหลายชั้นผลิตจากคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและแผ่นยางพารา

บุชิต มาให้* อภิสสิทธิ์ เตชพัฒนากร สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม และ ปิติ สุนทรสุขกุล

ศูนย์วิจัยวัสดุอาคารและงานก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 7136 8369 อีเมล: b.m.civil.kmutnb@gmail.com

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.007

รับเมื่อ 20 เมษายน 2563 แก้ไขเมื่อ 21 พฤษภาคม 2563 ตอปรับเมื่อ 22 พฤษภาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 24 พฤษภาคม 2564

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกของผนังคอนกรีตกันกระสุนแบบหลายชั้นที่ทำจากคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก (FRC) และแผ่นยางพารา (R) ภายใต้การต้านทานการยิงด้วยกระสุนระดับ 3A (.44 Magnum Semi Jacketed Hollow Point) ตามมาตรฐาน National Institute of Justice (NIJ) การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การทดสอบความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์จากกระสุนของวัสดุแต่ละชนิด ได้แก่ แผ่นยางพารา แผ่นโฟมที่มีความหนาแตกต่างกัน และคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กที่แปรผันปริมาณเส้นใยและชนิดของเส้นใย ส่วนที่ 2 ได้นำข้อมูลจากส่วนแรกมาใช้ในการออกแบบผนังกันกระสุนแบบหลายชั้น และเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องในการออกแบบ ผนังถูกออกแบบให้มีความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์รวมแตกต่างกันด้วยการแปรผันองค์ประกอบของผนัง เช่น ประเภทของวัสดุหรือความหนา ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของวัสดุแต่ละชนิดแตกต่างกันตามความหนา ปริมาณเส้นใย และชนิดของเส้นใย ซึ่งเมื่อนำมาออกแบบเป็นผนังแบบหลายชั้นที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานแตกต่างกัน พบความเสียหาย 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) กระสุนทะลุผ่าน 2) กระสุนไม่ทะลุผ่าน ฝังอยู่ในผนัง และเกิดการกะเทาะด้านหลัง และ 3) กระสุนไม่ทะลุผ่าน ฝังอยู่ในผนัง และไม่เกิดการกะเทาะด้านหลัง โดยค่าระดับพลังงานจลน์รวมที่ทำให้เกิดความเสียหายในรูปแบบที่ 3 มีค่าเท่ากับ 3172 จูล

คำสำคัญ: ผนังคอนกรีตกันกระสุนแบบหลายชั้น คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก แผ่นยางพารา กระสุนระดับ 3A

การอ้างอิงบทความ: บุชิต มาให้, อภิสสิทธิ์ เตชพัฒนากร, สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม และ ปิติ สุนทรสุขกุล, “ความสามารถในการต้านทานกระสุนระดับ 3A ของผนังคอนกรีตแบบหลายชั้นผลิตจากคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและแผ่นยางพารา,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 31, ฉบับที่ 3, หน้า 427-437, ก.ค.-ก.ย. 2564.



Class 3A Bullet Resistance of Multilayer Bulletproof Panels Made of Fibre Reinforced Concrete and Rubber Sheet

Buchit Maho*, Apisit Techaphatthanakon, 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

* Corresponding Author: Tel. 08 7136 8369, E-mail: b.m.civil.kmutnb@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.007

Received 20 April 2020; Revised 21 May 2020; Accepted 22 May 2020; Published online: 24 May 2021

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

In this research, the impact resistance of multilayer bulletproof concrete panels made of steel Fibre-Reinforced Concrete (FRC) and para-rubber sheets (R) subjected to class 3A bullet (.44 Magnum Semi Jacketed Hollow Point) in accordance with the National Institute of Justice (NIJ) Standard were investigated. The experimental procedure was divided into 2 parts. Part I involved the impact energy absorption test of Para-rubber sheet, Styrofoam sheet and FRC with different thicknesses, and FRC with different types of fibre and volume fractions. Part II, the information obtained from the first part was used in the designing and construction of multilayer bulletproof panels. To check the design validity, the multilayer panels were designed to have different degrees of impact energy absorption by using different configurations, such as material types or thicknesses. The result shows that the energy absorption of each material depends on thickness, fibre volume fraction and fibre types. For multilayer panels, 3-failure modes were observed: 1) Perforation, 2) Penetration with back spalling, and 3) Penetration without back spalling or without damage. In addition, the 3rd failure mode occurred when the energy absorption of multilayer panel was equal to 3172 Joule.

Keywords: Multilayer Bulletproof Concrete Panel, Steel Fibre Reinforced Concrete, Para-rubber Sheet, Class 3A Bullet

Please cite this article as: B. Maho, A. Techaphatthanakon, S. Jamnam, and P. Sukontasukkul, "Class 3A bullet resistance of multilayer bulletproof panels made of fibre reinforced concrete and rubber sheet," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 3, pp. 427-437, Jul.-Sep. 2021 (in Thai).

1. บทนำ

การพัฒนาผนังกันกระสุนโดยทั่วไปคำนึงถึงการป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการทะลุผ่านของกระสุนเพียงอย่างเดียว แต่ในความเป็นจริงความเสียหายอาจเกิดจากสาเหตุอื่น เช่น การสะท้อนกลับของกระสุน หรือการปลิวหลุดร่อนของวัสดุที่มีความเร็ว [1]

หนึ่งในวิธีการปรับปรุงความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกของคอนกรีต ทำโดยการใส่เส้นใยแบบสั้นลงไปกระจายตัวผสมกับคอนกรีต โดย ปิติ และคณะ [2] ได้ศึกษาการต้านทานแรงกระแทกของคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเส้นใย ซึ่งพบว่า เมื่อคอนกรีตถูกแรงกระแทกจะเกิดการวิบัติแบบเปราะ แยกออกเป็นชิ้น เมื่อผสมเส้นใยเข้าไปในกับคอนกรีต การวิบัติแบบเปราะจะหายไปและเกิดความเสียหายเฉพาะจุดแทน เช่น การกะเทาะ โดยเส้นใยทำหน้าที่ยึดรั้งชิ้นส่วนของคอนกรีตเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้คอนกรีตไม่แยกออกเป็นชิ้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Nili และคณะ [3] ศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กภายใต้การยิงด้วยกระสุนที่มีความเร็ว 600–1,300 เมตร/วินาที พบว่า คอนกรีตธรรมดาเมื่อถูกยิงเกิดความเสียหายมาก โดยแตกออกเป็นชิ้นและมีการปลิวหลุดร่อนของเศษชิ้นส่วนวัสดุ ส่วนคอนกรีตเสริมเส้นใยเกิดการวิบัติเฉพาะจุด (Local Failure) และมีการกะเทาะที่ลดลง Sovjak และคณะ [4] และ Kravanja และคณะ [5] พบว่า สัดส่วนผสมเส้นใยปริมาณ 2% โดยปริมาตรเหมาะสมในการป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้น เนื่องจากการปลิวหลุดร่อนของชิ้นส่วนคอนกรีตได้ดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาเหล่านี้ยังคงพบอันตรายที่เกิดจากการกะเทาะปลิวหลุดร่อนของเศษคอนกรีตหรือการสะท้อนกลับของกระสุน ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดในการนำเม็ดยางเข้ามาช่วยลดปัญหานี้ Noaman และคณะ [6] พบว่า การนำเม็ดยางมาผสมกับคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก สามารถดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกได้มากกว่าคอนกรีตธรรมดา

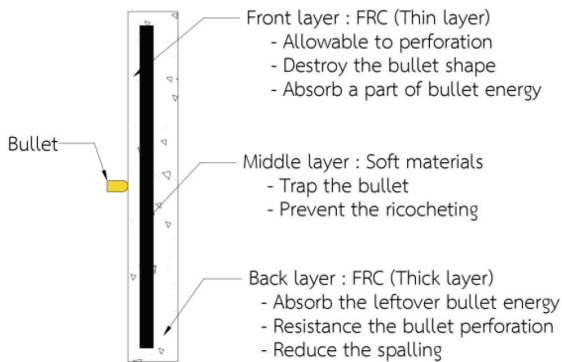
ปิติ และคณะ [7] พัฒนาผนังคอนกรีตกันกระสุนแบบ 2 ชั้น ที่ประกอบด้วยคอนกรีตผสมเม็ดยางและคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก โดยใช้แนวคิดของการนำเอาชั้นวัสดุคอนกรีตผสมเม็ดยางที่อ่อนนุ่มมาดูดซับพลังงานจลน์บางส่วนของ

กระสุน ผลการทดลองพบว่า ผนังแบบ 2 ชั้น นี้สามารถป้องกันการทะลุผ่านของกระสุนได้ แต่เนื่องจากผนังคอนกรีตผสมเม็ดยางยังมีความแข็งมากเกินไปทำให้ยังคงพบการสะท้อนกลับของกระสุนอยู่บางส่วน สิทธิศักดิ์ และคณะ [8] ได้เสนอผลการทดสอบเบื้องต้นของผนังคอนกรีตกันกระสุนแบบ 3 ชั้น และ 5 ชั้น จากเส้นใยเหล็กแผ่นโฟม และแผ่นยางพารา พบว่าสามารถป้องกันการทะลุและการสะท้อนกลับจากกระสุน 9 มิลลิเมตร ได้เป็นอย่างดี แต่ยังคงพบการกะเทาะที่ด้านหลังในผนังแบบ 3 ชั้น

ดังนั้นการศึกษานี้จึงเป็นการพัฒนาต่อยอดจากองค์ความรู้เดิม โดยการพัฒนามีผนังกันกระสุนแบบ 3 ชั้น ที่ประกอบด้วย คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กเป็นชั้นด้านหน้าและหลัง โดยมีแผ่นยางสอดแทรกอยู่กึ่งกลาง เพื่อทำหน้าที่ดักจับกระสุนป้องกันการทะลุผ่านและการสะท้อนกลับของกระสุน ให้ความสามารถในการต้านทานกระสุน .44 แม็กนัม ที่รุนแรงมากขึ้น โดยไม่เกิดการทะลุ และสะท้อนกลับของกระสุน รวมทั้งไม่เกิดการกะเทาะหลุดร่อนของเศษวัสดุอีกด้วย

2. แนวคิดการออกแบบผนังกันกระสุนแบบหลายชั้น

การศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) การศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของกระสุนปืนของวัสดุแต่ละชนิด (Kinetic Energy Absorption of Single Later Material) ด้วยการวัดอัตราเร็วของกระสุนก่อนและหลังการทะลุผ่านของกระสุน และ 2) การศึกษาความสามารถในการต้านทานกระสุนของผนังแบบหลายชั้น (Bullet Resistant of Multilayer Panels) โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากส่วนที่ 1 มาออกแบบผนังแบบ 3 ชั้น (รูปที่ 1) ประกอบด้วย ชั้นด้านหน้าทำจากคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กแบบบางที่ยอมให้กระสุนทะลุผ่าน เพื่อทำให้กระสุนเสียรูปและลดพลังงานของกระสุนบางส่วน ชั้นกึ่งกลางเป็นชั้นวัสดุอ่อนนุ่ม ที่ดักจับกระสุน ป้องกันการสะท้อนกลับ และชั้นสุดท้ายทำจากคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กแบบหนา ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานส่วนที่เหลือและป้องกันการทะลุผ่านของกระสุน



รูปที่ 1 การออกแบบผนังกันกระสุนแบบหลายชั้น

ส่วนที่ 1 เป็นการหาความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์จากแรงกระแทกของกระสุนปืนของวัสดุแต่ละชนิดที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน เช่น ความหนา ชนิดของเส้นใย และปริมาตรเส้นใย ในส่วนนี้วัสดุแต่ละชนิดถูกออกแบบให้กระสุนสามารถทะลุผ่านได้ เพื่อหาอัตราเร็วก่อนและหลังการทะลุ มาคำนวณเป็นความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ โดยมีสมมติฐาน 3 ประการ ได้แก่ 1) กระสุนไม่มีการสูญเสียน้ำหนักเมื่อเกิดการกระแทก 2) การสูญเสียพลังงานจลน์ของกระสุนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการยิงทดสอบสามารถวัดได้ในรูปของอัตราเร็วที่ลดลงหลังการกระแทก และ 3) พลังงานจลน์ที่กระสุนสูญเสียมีค่าเท่ากับพลังงานจลน์ที่วัสดุดูดซับไว้ ซึ่งจากสมมติฐานข้างต้น การสูญเสียพลังงานจลน์ของกระสุนสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1) และความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2)

$$E_L = \frac{m(v_{ini}^2 - v_{af}^2)}{2} \quad (1)$$

$$E_L = E_a \quad (2)$$

โดยที่ E_L คือ การสูญเสียพลังงานของกระสุน จากการกระแทก (J), m คือ มวลของกระสุน (kg), V_{ini} คือ ความเร็วกระสุนก่อนการทะลุ (m/s), V_{af} คือ ความเร็วกระสุนหลังการทะลุ (m/s) และ E_a คือ พลังงานจลน์ที่ดูดซับโดยวัสดุ (J)

ส่วนที่ 2 หลังจากได้ผลการทดลองในส่วนที่ 1 นำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบผนังแบบหลายชั้น โดยมีสมมติฐานว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานรวมของผนังแบบหลายชั้นเท่ากับผลรวมของความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุแต่ละชั้น [สมการที่ (3)] โดยในการออกแบบตัวอย่างผนังในการทดสอบในส่วนนี้ ได้ออกแบบให้ผนังมีการดูดซับพลังงานรวมแตกต่างกัน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์รวมของผนัง พลังงานจลน์ของกระสุน และรูปแบบความเสียหายของผนังหลังถูกยิง

$$E_T = \sum_{i=1}^n E_{a_i} \quad (3)$$

โดยที่ E_T คือ พลังงานจลน์รวมที่ผนังแบบหลายชั้นสามารถดูดซับได้ (J), $E_{(a_i)}$ คือ พลังงานจลน์ที่วัสดุแต่ละชั้นดูดซับได้ (J), n คือ จำนวนชั้นของวัสดุ

3. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุ

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
- 2) ทรายละเอียด ขนาด 1.19–0.297 มิลลิเมตร
- 3) น้ำสะอาด
- 4) แผ่นยางพารา มีคุณสมบัติดังตารางที่ 1
- 5) แผ่นโฟม มีคุณสมบัติดังตารางที่ 2
- 6) เส้นใยเหล็กชนิด Single Hooked-end (SHE) และ Double Hooked-end (DHE) ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของแผ่นยางพารา

| Properties | Details |
|------------------------|---------------------|
| Material | Natural rubber (NR) |
| Hardness (shore A) | 30–90 |
| Tensile strength (MPa) | 8.05 |
| Tensile yield strain | 2.05 |
| Elongation (%) | 105.55 |

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของแผ่นโฟม

| Properties | Details |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| Material | Expanded polystyrene foam (EPS) |
| Specific gravity (kg/m ³) | 32 |
| Tensile strength (MPa) | 0.38-0.48 |
| Flexural strength (MPa) | 0.43-0.49 |
| Compressive strength (MPa) | 0.20-0.25 |

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของเส้นใย

| Properties | SHE | DHE |
|---------------------------------|---------|-------|
| Material | Steel | |
| Number of hooked | 1 | 2 |
| Diameter (mm.) | 0.55 | 0.90 |
| Length (mm.) | 35 | 60 |
| Aspect ratio | 65 | 65 |
| Tensile strength (MPa) | 1,345 | 2,300 |
| Strain at ultimate strength (%) | 0.8 | 0.6 |
| Young's modulus (MPa) | 200,000 | |

*หมายเหตุ: คุณสมบัติของเส้นใยเป็นไปตามที่ผู้ผลิตระบุ

3.2 อุปกรณ์

- 1) ฐานรองรับเหล็กสำหรับจับยึดแผ่นผนังในการทดสอบ
- 2) เครื่องวัดอัตราเร็วกระสุน (Ballistic Precision Chronograph) ที่มีความสามารถวัดอัตราเร็วในช่วง 1.5-3,047 เมตร/วินาที
- 3) ปืนและกระสุน .44 แม็กนัม ตามมาตรฐาน U.S. NIJ.0101.06 ระดับ IIIA [9] โดยมีคุณสมบัติดังตารางที่ 4

3.3 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างของการทดสอบความสามารถในการดูดซับ

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของกระสุน .44 แม็กนัม

| Properties | Details |  |
|----------------|---------------------------------|---|
| Manufacture | Bullet master | |
| Bullet type | Semi jacket hollow point (SJHP) | |
| Case/Core | Brass/Lead | |
| Bullet dia. | 10.5 mm. | |
| Bullet weight | 15.6 g | |
| Velocity | 499 m/s | |
| Kinetic energy | 1,942 J | |

พลังงานจลน์ของวัสดุแต่ละชนิด ประกอบไปด้วย

- 1) วัสดุอ่อนนุ่ม ได้แก่ แผ่นยางพารา (R) และแผ่นโฟม (F) ที่ความหนา 5-20 มิลลิเมตร
- 2) คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กชนิด SHE (S) และ DHE (D) ที่ปริมาณเส้นใย 1% และ 2% ที่ความหนา 5-30 มิลลิเมตร

โดยรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบแสดงดังตารางที่ 5

การเตรียมตัวอย่างสำหรับคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กทำได้โดยผสมปูนซีเมนต์และทรายเข้าด้วยกัน เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นจึงเติมน้ำสะอาดและผสมให้เข้ากันอีก 3 นาที แล้วจึงใส่เส้นใยเหล็กลงไปผสมกับคอนกรีตอีกประมาณ 5 นาที (สัดส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 6) เมื่อผสมเข้ากันดีแล้วจึงเทใส่แบบหล่อขนาด 400x400 มิลลิเมตร และทำการจี้เขย่าด้วยโต๊ะสั่นคอนกรีต (Vibration Table) จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้คอนกรีตแข็งตัวประมาณ 1 วัน แล้วจึงแกะแบบ และบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน ก่อนทำการทดสอบ

กำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 และกำลังดัดตามมาตรฐาน ASTM C1609 ของคอนกรีตเสริมเส้นใยแสดงดังตารางที่ 7

3.4 วิธีการทดสอบ

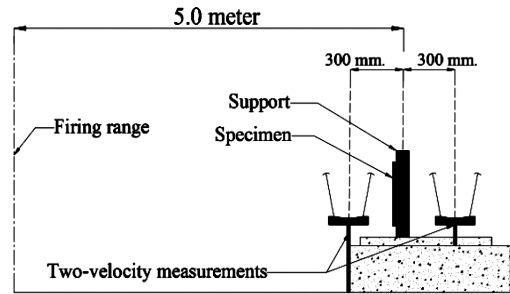
วิธีการทดสอบของทั้งสองส่วนทำได้โดยการติดตั้ง

ตารางที่ 5 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของวัสดุ

| Name | Mat. | Fibre Type | Fibre Content (%) | Thickness (mm.) |
|------|------|------------|-------------------|-----------------|
| R5 | R | None | - | 5 |
| R10 | | | - | 10 |
| R15 | | | - | 15 |
| F10 | F | None | - | 10 |
| F15 | | | - | 15 |
| F20 | | | - | 20 |
| 1S5 | SHE | - | 1 | 5 |
| 1S10 | | | | 10 |
| 1S15 | | | | 15 |
| 2S5 | | | 2 | 5 |
| 2S10 | | | | 10 |
| 2S15 | | | | 15 |
| 1D10 | FRC | 1 | - | 10 |
| 1D15 | | | | 15 |
| 1D20 | | | | 20 |
| 1D25 | | | | 25 |
| 1D30 | | | | 30 |
| 2D10 | | 2 | - | 10 |
| 2D15 | | | | 15 |
| 2D20 | | | | 20 |
| 2D25 | | | | 25 |
| 2D30 | | | | 30 |

ตารางที่ 6 สัดส่วนผสมคอนกรีตเสริมเส้นใย

| Proportion | 1% Fibre | 2% Fibre |
|------------|-----------------------------|----------|
| | Weight (kg/m ³) | |
| Cement | 800 | |
| Sand | 1,420 | |
| Water | 240 | |
| Fibre | 78 | 156 |



รูปที่ 2 วิธีการทดสอบ

ตารางที่ 7 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใย

| Type | Mechanical Properties | | |
|--------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|
| | Compressive Strength (MPa) | Flexural Strength (MPa) | Elastic Modulus (GPa) |
| 1% SHE | 87.10 | 5.99 | 33.78 |
| 2% SHE | 99.51 | 6.51 | 40.23 |
| 1% DHE | 92.52 | 10.17 | 39.46 |
| 2% DHE | 99.97 | 11.14 | 40.85 |

ตัวอย่างทดสอบเข้ากับฐานรองรับ และติดตั้งเครื่องวัดอัตราเร็วของกระสุนไว้ที่ด้านหน้าและด้านหลังของตัวอย่างทดสอบที่ระยะห่าง 300 มิลลิเมตร จากนั้นทำการยิงเข้าที่บริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างจากระยะ 5 เมตร จำนวน 1 นัด ในแนวตรง ดังรูปที่ 2

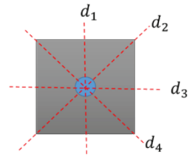
3.5 การเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล

3.5.1 ความสามารถในการดูดซับพลังงาน

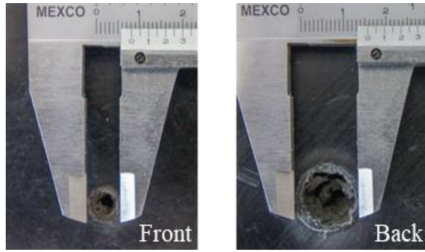
ความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุแต่ละชนิดทำได้โดยการวัดอัตราเร็วของกระสุนก่อนและหลังการทะลุมาคำนวณเป็นพลังงานจลน์ของกระสุนที่สูญเสียไป โดยสมมติว่ามวลของกระสุนไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังการทะลุ ดังสมการที่ (1)

3.5.2 เส้นผ่านศูนย์กลางความเสียหาย

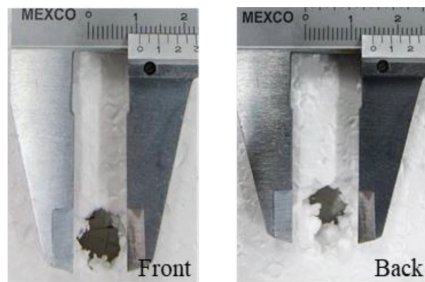
การหาเส้นผ่านศูนย์กลางความเสียหายทำได้โดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางการกะเทาะบริเวณด้านหลังของตัวอย่างทดสอบ หลังจากถูกยิงด้วยกระสุน .44 แม็กนัม โดยทำการวัดทั้งสิ้น 4 ทิศทาง แล้วจึงนำมาเฉลี่ย ดังรูปที่ 3



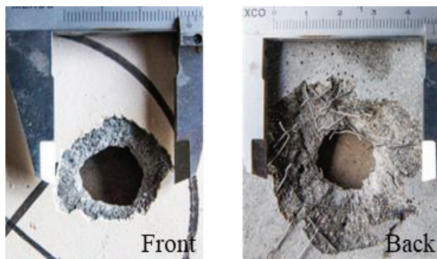
รูปที่ 3 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางความเสียหาย



(ก) แผ่นยางพารา



(ข) แผ่นโฟม



(ค) คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

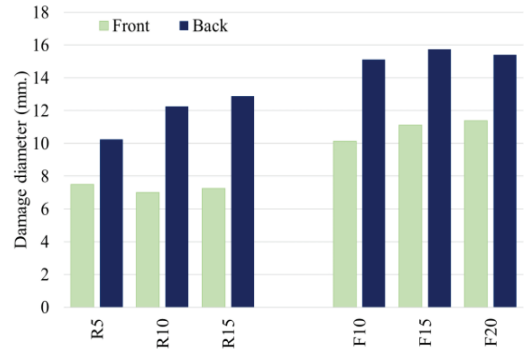
รูปที่ 4 ความเสียหาย

4. ผลการทดลอง

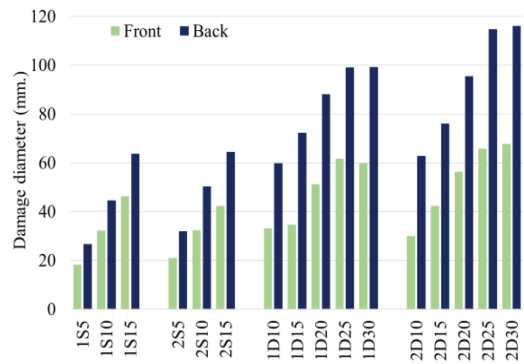
4.1 ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของวัสดุ (Kinetic Energy Absorption of Single Layer Material)

4.1.1 ความเสียหาย

ความเสียหายของวัสดุอ่อนนุ่ม ได้แก่ แผ่นยางพาราและแผ่นโฟม เมื่อถูกยิงด้วยกระสุน .44 แม็กนัม พบว่า เกิดการทะลุ ดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข) ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลาง



(ก) วัสดุอ่อนนุ่ม



(ข) คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

รูปที่ 5 เส้นผ่านศูนย์กลางความเสียหาย

ความเสียหายด้านหลังของวัสดุทั้งสองชนิดมีขนาดใหญ่กว่าด้านหน้า และเพิ่มขึ้นตามความหนา แต่เนื่องจากแผ่นยางพารามีความยืดหยุ่นมากกว่าแผ่นโฟมจึงทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางความเสียหายมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับที่ความหนาเท่ากันดังรูปที่ 5 (ก)

สำหรับคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กพบว่า เกิดความเสียหายแตกต่างจากวัสดุอ่อนนุ่ม กล่าวคือจะเกิดความเสียหายที่รุนแรง หรือเกิดการกะเทาะในขณะที่กระสุนปะทะ ดังรูปที่ 4 (ค) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยมีความสามารถในการต้านทานกระสุนมากกว่าวัสดุอ่อนนุ่ม เมื่อพิจารณาเส้นผ่านศูนย์กลางความเสียหายพบว่า เพิ่มขึ้นตามความหนาและปริมาณเส้นใยเหล็ก อีกทั้งคอนกรีตเสริมเส้นใยชนิด DHE ยังมีเส้นผ่านศูนย์กลางความเสียหายมากกว่าชนิด SHE ดังรูปที่ 5 (ข)

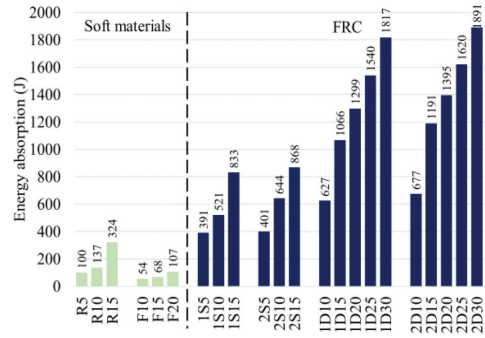
4.1.2 การดูดซับพลังงานจลน์

จากผลการทดสอบพบว่า ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของวัสดุแต่ละชนิดเพิ่มขึ้นตามความหนาของวัสดุ ดังรูปที่ 6 ในกรณีของวัสดุอ่อนนุ่มพบว่า แผ่นยางพารา มีความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์สูงกว่าแผ่นโฟม ประมาณ 2-3 เท่า ที่ความหนาเท่ากัน ซึ่งอยู่ในช่วง 100-324 จูล และ 54-107 จูล ตามลำดับ ในกรณีของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์จะขึ้นอยู่กับ ปริมาณเส้นใย ความหนา และชนิดของเส้นใย โดยการเพิ่มปริมาณเส้นใยจาก 1% เป็น 2% จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ที่ความหนาและชนิดของเส้นใยเหล็กเดียวกันเฉลี่ยร้อยละ 8.32 การเพิ่มความหนา ความหนาจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของคอนกรีตเสริมเส้นใยเฉลี่ยร้อยละ 36.91 อีกทั้งคอนกรีตที่เสริมเส้นใยชนิด DHE ยังมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้ดีกว่าชนิด SHE ที่ความหนาและปริมาณเส้นใยเท่ากันเฉลี่ยร้อยละ 22.66 เนื่องจากคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กชนิด DHE มีความแข็งแรงมากกว่าชนิด SHE

4.2 ความสามารถในการต้านทานกระสุนของผนังแบบหลายชั้น (Bullet Resistance of Multilayer Panels)

แนวคิดในการออกแบบผนังกันกระสุนแบบหลายชั้นคือการนำเอาวัสดุแต่ละชนิดมาประกอบรวมกัน ดังสมมติฐานในสมการที่ (3) ซึ่งเมื่อความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์รวมของผนังน้อยกว่าพลังงานจลน์ของกระสุน ($E_p < 1,942$ จูล) กระสุนน่าจะทะลุผ่านผนังไปได้ แต่เมื่อการดูดซับพลังงานจลน์รวมของผนังมากกว่าพลังงานจลน์ของกระสุน ($E_p > 1,942$ จูล) กระสุนควรที่จะไม่ทะลุผ่านผนัง ดังนั้นเพื่อเป็นการทดสอบสมมติฐานนี้จึงได้ออกแบบผนังให้มีพลังงานจลน์รวมอยู่ในช่วง 1,800 ถึง 3,532 จูล

การออกแบบได้ออกแบบผนังแบ่งออกเป็น 3 ชั้น โดยชั้นด้านหน้าออกแบบให้กระสุนทะลุผ่านได้ จึงเลือกใช้เป็นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กชนิด SHE (S) ชั้นกึ่งกลางได้เลือกวัสดุอ่อนนุ่มเป็นยางพารา (R) เพราะสามารถดูดซับพลังงานจลน์ของกระสุนได้สูงกว่าแผ่นโฟมที่ความหนาเดียวกัน อีกทั้งเกิดความเสียหายน้อยกว่าแผ่นโฟม และชั้นด้านหลังทำหน้าที่ป้องกันการทะลุผ่านของกระสุน ได้เลือกใช้เป็นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กชนิด DHE (D) ดังตารางที่ 8



รูปที่ 6 ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์

ตารางที่ 8 ตัวอย่างทดสอบผนังกันกระสุนแบบหลายชั้น

| Name | Total Energy Absorption, E_p (J) |
|---------------|------------------------------------|
| 2S10/R10/2D15 | 1,800 |
| 2S5/R10/2D20 | 1,828 |
| 1S10/R5/1D20 | 1,913 |
| 2S5/R15/2D20 | 1,924 |
| 1S10/R10/1D20 | 2,009 |
| 2S10/R5/2D20 | 2,037 |
| 1S10/R15/1D20 | 2,105 |
| 2S10/R10/2D20 | 2,133 |
| 2S5/R10/2D25 | 2,161 |
| 2S10/R15/2D20 | 2,229 |
| 2S10/R5/2D25 | 2,370 |
| 2S10/R10/2D25 | 2,466 |
| 2S5/R10/2D30 | 2,494 |
| 2S10/R15/2D25 | 2,562 |
| 2S10/R5/2D30 | 2,703 |
| 2S10/R10/2D30 | 2,799 |
| 2S10/R15/2D30 | 2,895 |
| 2S20/R15/2D25 | 3,172 |
| 2S15/R15/2D30 | 3,200 |
| 2S20/R15/2D30 | 3,504 |
| 2S15/R15/2D35 | 3,532 |

จากการทดสอบความสามารถในการต้านทานกระสุนของผนังแบบหลายชั้นข้างต้น สามารถแบ่งรูปแบบความเสียหายออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

รูปแบบที่ 1 กระสุนทะลุผ่าน (Perforation) คือ กระสุนทะลุผ่านผนังและด้านหลังเกิดการกะเทาะ โดยเส้นผ่านศูนย์กลางการกะเทาะด้านหลังใหญ่กว่าด้านหน้า ดังรูปที่ 7 (ก)

รูปแบบที่ 2 กระสุนไม่ทะลุผ่าน แต่เกิดการกะเทาะด้านหลัง (Penetration with Back Spalling) คือ กระสุนทะลุผ่านชั้นด้านหน้า และฝังอยู่ด้านในผนัง ไม่เกิดการสะท้อนกลับ บริเวณด้านหลังเกิดการกะเทาะเป็นวงกว้าง ดังรูปที่ 7 (ข)

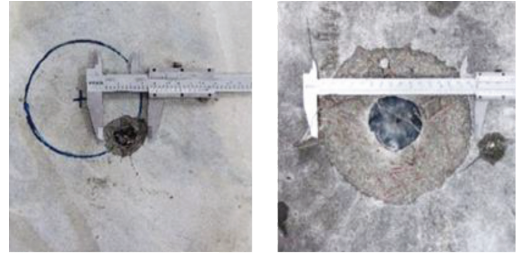
รูปแบบที่ 3 กระสุนไม่ทะลุผ่าน ด้านหลังไม่กะเทาะ (Penetration without Back Spalling or without Damage) คือ กระสุนทะลุผ่านชั้นด้านหน้า และฝังอยู่ในผนัง ด้านหลังไม่เกิดการกะเทาะหรือไม่เกิดความเสียหาย ดังรูปที่ 7 (ค)

ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์รวมของผนัง และรูปแบบความเสียหายสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9

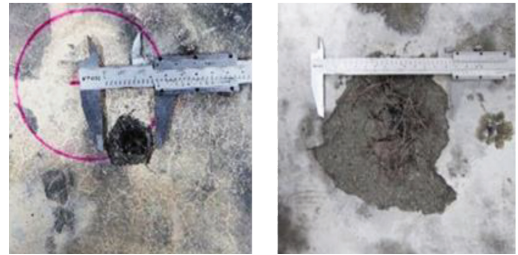
ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์รวมของผนัง และรูปแบบความเสียหาย

| Damage Pattern | Total Energy Absorption, E_p (J) |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| Perforation | $\leq 2,370$ |
| Penetration with Back Spalling | 2,466–2,895 |
| Penetration without Back Spalling | $\geq 3,172$ |

การทะลุผ่านของกระสุนเกิดขึ้นเมื่อความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์รวมของผนังน้อยกว่า 2,370 จูล และเมื่อความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์อยู่ในช่วง 2,466–2,895 จูล จึงจะสามารถต้านทานการทะลุผ่านของ



(ก) กระสุนทะลุผ่าน



(ข) กระสุนไม่ทะลุผ่าน แต่เกิดการกะเทาะด้านหลัง



(ค) กระสุนไม่ทะลุผ่าน ด้านหลังไม่กะเทาะ

รูปที่ 7 ความเสียหายของผนังแบบหลายชั้น

กระสุนปืนได้ แต่ด้านหลังของผนังยังคงเกิดความเสียหาย เมื่อความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์มากกว่า 3,172 จูล จึงจะสามารถป้องกันความเสียหายด้านหลังของผนังได้ โดยที่กระสุนยังคงฝังอยู่ในผนัง

ตามทฤษฎีแล้วการทะลุควรจะเกิดขึ้นเมื่อความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์รวมของผนังน้อยกว่าพลังงานของกระสุน (1,942 จูล) และกระสุนไม่ควรจะเกิดการทะลุเมื่อการดูดซับพลังงานจลน์รวมของผนังมากกว่าพลังงานของกระสุน อย่างไรก็ตาม ในกรณีของกระสุน .44 แม็กนัม ผนังต้องมีความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์สูงถึง 2,466 หรือสูงกว่ากระสุนประมาณ 27% จึงจะสามารถ

ด้านทานกระสุนได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลักษณะของหัวกระสุนแบบ SJHP (Semi Jacketed Hollow Point) ที่ออกแบบมาให้แตกตัวออกเมื่อปะทะกับเป้าหมาย และสร้างแรงกระแทกในวงกว้างมากกว่าเจาะทะลุ ซึ่งเมื่อปะทะที่เป้าหมายทำให้เกิดแรงกระแทกวงกว้างและความเสียหายที่รุนแรงแตกต่างจากกระสุนประเภท FMJ (Full Metal Jacket) ที่มีขนาดเล็ก ออกแบบมาเพื่อเจาะทะลุและสร้างความเสียหายเฉพาะจุด [10] ด้วยเหตุนี้เองในการออกแบบด้วยวิธีนี้ หากต้องการให้ผนังสามารถป้องกันการทะลุผ่านของกระสุนได้ ควรออกแบบให้ผนังมีความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์สูงกว่าพลังงานจลน์ของกระสุนประมาณ 27%

5. สรุป

ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของวัสดุแต่ละชนิดเพิ่มขึ้นตามความหนาของวัสดุ และในกรณีคอนกรีตเสริมเส้นใยความสามารถในการดูดซับพลังงานยังขึ้นกับปริมาณเส้นใยและชนิดของเส้นใยอีกด้วย อีกทั้งคอนกรีตเสริมเส้นใยยังมีความสามารถในการดูดซับพลังงานที่สูงกว่าวัสดุอ่อนนุ่มมาก และเกิดความเสียหายที่รุนแรงกว่า แสดงให้เห็นว่ารูปแบบความเสียหายนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกของวัสดุ

สำหรับผนังแบบหลายชั้น ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์รวมของผนังขึ้นอยู่กับความหนาและชนิดของวัสดุที่นำมาเรียงกัน ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ผนังที่มีความสามารถดูดซับพลังงานจลน์น้อยกว่า 2,370 จูล จะเกิดการทะลุ แต่เมื่อการดูดซับพลังงานเท่ากับ 2,466 จูล กระสุนจะฝังติดอยู่ในผนัง แต่จะเกิดการกระเทาะด้านหลัง และเมื่อการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นสูงถึง 3,172 จูล จึงจะไม่พบการกระเทาะที่ด้านหลัง จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเสริมแผ่นยางพารา มีประสิทธิภาพดีเยี่ยมในการดักจับกระสุน ซึ่งทำให้ผนังกันกระสุนแบบหลายชั้นนี้สามารถป้องกันการเกิดอันตรายจากการสะท้อนกลับของกระสุนได้

6. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการพัฒนา

นักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ภายใต้สัญญาเลขที่ PHD5910023 และขอขอบคุณบริษัท S.R. Fiber co.ltd ที่สนับสนุนเส้นใย และหน่วยบัญชาการรักษาดินแดนที่อนุเคราะห์สถานที่และกระสุนในการทดสอบ รวมทั้งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่สนับสนุนสถานที่ในการเตรียมตัวอย่างด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] X. Xu, T. Ma, and J. Ning, "Failure mechanism of reinforced concrete subjected to projectile impact loading," *Engineering Failure Analysis*, vol. 96, pp 468–483, 2019.
- [2] P. Sukontasukkul, S. Mindess, and N. Banthia, "Penetration resistance of hybrid fibre reinforced concrete under low velocity impact loading," presented at Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec, Canada, 2002.
- [3] M. Nili, A.H. Ghorbankhani, A. AlaviNia, and M. Zolfaghari, "Assessing the impact strength of steel fibre-reinforced concrete under quasi-static and high velocity dynamic impacts," *Construction and Building Materials*, vol. 107, pp. 264–271, 2016.
- [4] R. Sovjak, T. Vavrinik, J. Zatloukal, P. Maca, T. Micunek, and M. Frydryn, "Resistance of slim UHPFRC targets to projectile impact using in-service bullets," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 76, pp. 166–177, 2015.
- [5] S. Kravanja, R. Sovjak, P. Konrad, and J. Zatloukal, "Penetration resistance of semi-infinite UHPFRC targets with various fiber volume fractions against projectile impact," *Procedia Engineering*, vol. 193, pp. 112–119, 2017.



- [6] A. T. Noaman, B. H. Abu Bakar, and H. M. Akil, "The effect of combination between crumb rubber and steel fiber on impact energy of concrete beams," *Procedia Engineering*, vol. 125, pp. 825–831, 2015.
- [7] P. Sukontasukkul, S. Jamnam, K. Rodsin, and N. Banthia, "Use of rubberized concrete as a cushion layer in bulletproof fiber reinforced concrete panels," *Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 801–811, 2013.
- [8] S. Jamnam, B. Maho, P. Sukontasukkul, K. Fujikake, and N. Banthia "Energy absorption and failure pattern of multilayer bulletproof concrete panel made of steel fiber, styrofoam and para-rubber," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 3, pp. 515–524, 2018 (in Thai).
- [9] Ballistic Resistance of Body Armor, NIJ standard-0101.06, 2006.
- [10] B. Maho, P. Sukontasukkul, S. Jamnam, E. Yamaguchi, K. Fujikake, and N. Banthia, "Effect of rubber insertion on impact behavior of multilayer steel fiber reinforced concrete bulletproof panel," *Construction and Building Materials*, vol. 216, pp. 476–484, 2019.