



## การดูดซับพลังงาน และรูปแบบการวิบัติของผนังคอนกรีตกันกระสุนแบบหลายชั้นจากเส้นใยเหล็ก แผ่นโฟม และยางพารา

สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม\* บุชิต มาให้ และ ปิติ สุคนธสุขกุล

ศูนย์วิจัยวัสดุอาคารและงานก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Kazunori Fujikake

Department of Civil and Environmental Engineering, National Defense Academy of Japan, Yokosuka, Japan

Nemkumar Banthia

Department of Civil Engineering, Faculty of Applied Science, University of British Columbia, Vancouver, Canada

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 8126 อีเมล: sittisak.j@eng.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.05.003

รับเมื่อ 21 กรกฎาคม 2560 ตอรับเมื่อ 15 กันยายน 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 7 พฤษภาคม 2561

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอผลการทดสอบเบื้องต้นจากโครงการแผ่นคอนกรีตกันกระสุนแบบหลายชั้น แผ่นคอนกรีตที่นำมาทดสอบประกอบไปด้วยแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก แผ่นยางพารา และแผ่นโฟม งานวิจัยนี้ได้ศึกษารูปแบบการวิบัติและการดูดซับพลังงานของแต่ละวัสดุที่มีความหนาแตกต่างกัน ข้อมูลจากการทดสอบจะถูกนำไปใช้ออกแบบแผ่นคอนกรีตแบบหลายชั้นจากผลรวมของการดูดซับพลังงานแต่ละวัสดุ ผลการทดสอบพบว่า การดูดซับพลังงานของแต่ละวัสดุเพิ่มขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้น สำหรับคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก การดูดซับพลังงานขึ้นกับชนิดและปริมาณเส้นใยเหล็ก เมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาที่เท่ากันจะพบว่า คอนกรีตผสมเส้นใยมีประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานมากที่สุด รองลงมาคือ แผ่นยางพารา และแผ่นโฟมตามลำดับ

**คำสำคัญ:** ผนังคอนกรีตกันกระสุน, คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก, ผนังแบบหลายชั้น, แผ่นยางพาราและแผ่นโฟม, การทะลุผ่าน และสะท้อนกลับ

การอ้างอิงบทความ: สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม บุชิต มาให้ ปิติ สุคนธสุขกุล Kazunori Fujikake และ Nemkumar Banthia, "การดูดซับพลังงาน และรูปแบบการวิบัติของผนังคอนกรีตกันกระสุนแบบหลายชั้นจากเส้นใยเหล็ก แผ่นโฟม และยางพารา," วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 28, ฉบับที่ 3, หน้า 515-524, ก.ค.-ก.ย. 2561.

## Energy Absorption and Failure Patterns of Multilayer Bulletproof Concrete Panel Made of Steel Fiber, Styrofoam and Para-rubber

Sittisak Jamnam\*, Buchit Maho 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

Kazunori Fujikake

Department of Civil and Environmental Engineering, National Defense Academy of Japan, Yokosuka, Japan

Nemkumar Banthia

Department of Civil Engineering, Faculty of Applied Science, University of British Columbia, Vancouver, Canada

\* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext. 8126, E-mail: [sittisak.j@eng.kmutnb.ac.th](mailto:sittisak.j@eng.kmutnb.ac.th) DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.05.003

Received 21 July 2017; Accepted 15 September 2017; Published online: 7 May 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This study presents the preliminary test results from the multilayer bulletproof concrete panel project. The tested multilayer panel consisted of steel fiber reinforced concrete (SFRC), Para-rubber and Styrofoam sheet. In this study, the focus was on the investigation of the failure patterns and energy absorption of each material with different thickness subjected to direct fire arm with 9 mm bullets. The obtained information will later be used in designing the multilayer bulletproof concrete panel based on combination of energy absorption. The results showed that the energy absorption of each material increased with the increasing thickness. In case of SFRC, the energy absorption also depended on fiber type and volume fractions. Comparing at the same thickness, SFRC was the most effective energy absorption followed by Para-rubber and Styrofoam sheet respectively.

**Keywords:** Bulletproof Concrete Panel, Steel Fiber Reinforced Concrete, Multilayer Panel, Styrofoam and Para-rubber Sheet, Ricocheting and Perforation

Please cite this article as: S. Jamnam, B. Maho, P. Sukontasukkul, K. Fujikake, and N. Banthia, "Energy absorption and failure patterns of multilayer bulletproof concrete panel made of steel fiber, styrofoam and para-rubber," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 3, pp. 515-524, Jul.-Sep. 2018 (in Thai).



## 1. บทนำ

ความเสียหายอันเกิดจากกระสุนปืนยิงเข้าสู่ผนังอาคาร มีด้วยกันอยู่หลายรูปแบบ เช่น การทะลุผ่านผนังของกระสุนปืน เข้าไปโดนผู้ที่อยู่ภายในอาคาร หรือเกิดการสะท้อนกลับของกระสุนซึ่งทำให้เกิดอันตรายแก่ผู้ที่อยู่ใกล้เคียง รวมถึงการปลิวหลุดร่อนของเศษวัสดุคอนกรีตเนื่องจากกระสุนปืนปะทะ โดยความเสียหายเหล่านี้ล้วนนำมาซึ่งการบาดเจ็บ การเสียชีวิต และความเสียหายต่อทรัพย์สินได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคอนกรีตเป็นวัสดุเปราะ เมื่อถูกกระทำด้วยแรงกระแทก คอนกรีตจะเกิดการแตกหักและแยกออกจากกันเป็นหลายชิ้น เมื่อนำเส้นใยเหล็กมาผสมกับคอนกรีตพบว่า เมื่อคอนกรีตถูกกระทำด้วยแรงกระแทก คอนกรีตจะเกิดรอยร้าวเล็กๆ จำนวนมากแต่ไม่แยกออกจากกันเพราะเส้นใยเหล็กทำหน้าที่ยึดรั้งรอยแตกระหว่างชิ้นส่วนคอนกรีตเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้คอนกรีตมีความเหนียวมากขึ้น [1]-[5]

จากผลการวิจัยข้างต้น Sukontasukkul *et al.* [6] ได้พัฒนาผนังคอนกรีตกันกระสุนแบบสองชั้น โดยผลิตจากคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (ชั้นหลัง) และคอนกรีตผสมเม็ดยาง (ชั้นแรก) และทำการทดสอบการยิงด้วยกระสุนปืน ขนาด 9 มม. และ 11 มม. พบว่า ผนังคอนกรีตแบบสองชั้นสามารถป้องกันการทะลุผ่านของกระสุนปืน แต่ยังคงเกิดการแตกร้าวและการหลุดร่อนของคอนกรีตที่ผิวด้านหน้าและด้านหลัง นอกจากนี้ยังพบการสะท้อนกลับของกระสุนปืน เนื่องจากคอนกรีตผสมเม็ดยางยังไม่สามารถลดความเร็วของกระสุนได้มากพอก่อนที่กระสุนปืนจะปะทะคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก ในชั้นที่สอง อีกทั้งคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีความแข็งที่สูง จึงทำให้พบการสะท้อนกลับของกระสุนปืนในบางครั้ง ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการพัฒนาผนังคอนกรีตกันกระสุนเพื่อลดการทะลุผ่านและการสะท้อนกลับของกระสุนปืน โดยมีแนวคิดที่นำวัสดุอ่อนนุ่ม เช่น แผ่นยางพาราหรือโฟมมาใช้ โดยออกแบบให้เป็นผนังหลายชั้นผนัง โดยชั้นแรกจะเป็นชั้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่สามารถให้กระสุนทะลุผ่านไปได้และสามารถลดพลังงานจลน์ของกระสุนให้มากที่สุด ส่วนชั้นถัดไปเป็นชั้นของวัสดุอ่อนนุ่ม มีหน้าที่ดูดซับ

พลังงานจลน์ของกระสุนที่เหลือจากชั้นแรก และในชั้นถัดไปจะเป็นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสลับกับชั้นของวัสดุอ่อนนุ่ม เพื่อป้องกันการทะลุผ่านและการหลุดร่อนของเศษวัสดุ

## 2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การศึกษาการดูดซับพลังงานจลน์ของวัสดุที่มีความหนาต่างๆ จากการยิงด้วยกระสุนปืน และการศึกษาารูปแบบการวิบัติผนังกันกระสุนแบบหลายชั้น (3 ชั้นและ 5 ชั้น)



### 2.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

- ปูนซีเมนต์ น้ำสะอาด ทราย (ผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และค้ำตะแกรงเบอร์ 50), w/c เท่ากับ 0.3 และอัตราส่วนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 : 2 โดยปริมาตร

- เส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย Single Hooked-end (SHE) และ Double Hooked-end (DHE) และสัดส่วนผสมเส้นใยเหล็กในปริมาณ 1% และ 2% โดยปริมาตรรวมคุณสมบัติดังตารางที่ 1

- ยางพาราแผ่นหนา 0.5, 1 และ 1.5 ซม. มีคุณสมบัติดังตารางที่ 2 และโฟม EPS ชนิดไม่ลามไฟ (F-Grade) หนา 1, 1.5 และ 2 ซม. มีคุณสมบัติดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก

| Name | Shape   | Length mm | Dia. mm | Aspect Ratio l/d | Tensile Strength N/mm <sup>2</sup> |
|------|---|-----------|---------|------------------|------------------------------------|
| SHE  |  | 35        | 0.55    | 64               | 1,000                              |
| DHE  |  | 60        | 0.90    | 65               | 2,300                              |

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของแผ่นยางพารา

| Shore A | Tensile Strength (Kpa) | Elongation (%) | Temperature (°C) |
|---------|------------------------|----------------|------------------|
| 30-90   | 3,450-20,680           | 300-900        | -55 to +70       |

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของแผ่นโฟม EPS

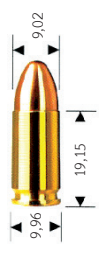
| Specific Gravity (kg/m <sup>3</sup> ) | Tensile Strength (Kpa) | Compressive Strength (Kpa) | Flexural Strength (Kpa) |
|---------------------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 32                                    | 380-480                | 200-500                    | 430-490                 |



รูปที่ 1 เครื่องวัดอัตราเร็วกระสุน

- กระสุนปืนขนาด 9 mm มีคุณสมบัติดังตารางที่ 4
- เครื่องวัดอัตราเร็วกระสุน ยี่ห้อ Caldwell สามารถวัดอัตราเร็วได้อยู่ในช่วง 1.5 ถึง 3,047 m/s แสดงดังรูปที่ 1

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของกระสุนปืน

|  | Technical Information   |                 |
|---|-------------------------|-----------------|
|   | Caliber                 | 9 mm Winchester |
| Bullet Weight   | 115 Grains (7.45 g)     |                 |
| Bullet Style  | Full Metal Jacket (FMJ) |                 |
| Case Type   | Brass                   |                 |
| Ballistic Information   |                         |                 |
| Muzzle Velocity   | 1190 fps                | 362 m/s         |
| Muzzle Energy   | 362 ft.lbs              | 492 N.m         |

## 2.2 การเตรียมตัวอย่างและรูปแบบตัวอย่างทดสอบ

ดังที่ได้กล่าวข้างต้น การศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการเตรียมตัวอย่างแบบชั้นเดียว โดยแปรผันความหนาของวัสดุที่ใช้ ตัวอย่างทดสอบดังตารางที่ 5

ส่วนที่ 2 เป็นการเตรียมตัวอย่างแบบ 3 ชั้นและ 5 ชั้น โดยชั้นเลขที่ (1, 3 และ 5) เป็นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (SFRC) และชั้นเลขคู่ (2 และ 4) จะเป็นวัสดุอ่อนนุ่ม ได้แก่ แผ่นยางพาราและแผ่นโฟม โดยทำการแปรผันความหนาที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2 โดยการเตรียมตัวอย่างให้เริ่มจากหล่อชั้นคอนกรีตผสมเส้นใยชั้นหลังสุดก่อน โดยชั้นตอนแรก

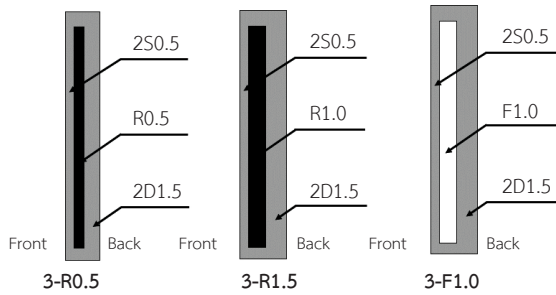
จะทำการหล่อคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก รอจนคอนกรีตแข็งเริ่มแข็งตัว จากนั้นปักเส้นใยเหล็กชนิด SHE ให้ห่างจากขอบประมาณ 2 ซม. และห่างกัน 2 ซม. เพื่อให้คอนกรีตยึดเกาะกับคอนกรีตชั้นถัดไป จากนั้นทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จึงทำการนำแผ่นยางหรือแผ่นโม่มาวางดังรูปที่ 3 แล้วจึงหล่อชั้นถัดไปจนครบตามจำนวน เมื่อทำการหล่อตัวอย่างเสร็จสมบูรณ์แล้วทิ้งให้คอนกรีตแข็งตัวเป็นเวลา 1 วัน จึงทำการถอดแบบและบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน เพื่อการพัฒนากำลังของคอนกรีตที่สมบูรณ์ จากนั้นจึงนำขึ้นจากน้ำ ทำการชั่งน้ำหนัก วัดขนาดแล้วทำการทดสอบต่อไป

ตารางที่ 5 ตัวอย่างทดสอบการดูดซับพลังงานจลน์

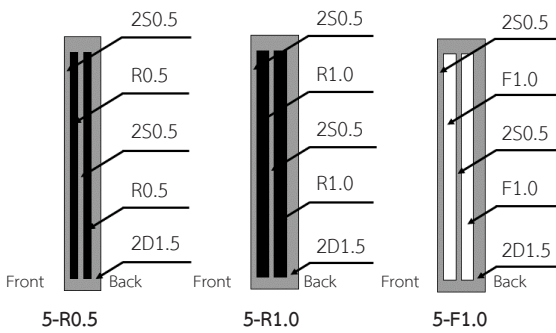
| Name  | Mat.        | Fiber Content | Fiber Type | Thickness (mm) |
|-------|-------------|---------------|------------|----------------|
| R0.5  | Para-rubber |               |            | 5              |
| R1.0  | Para-rubber |               |            | 10             |
| R1.5  | Para-rubber |               |            | 15             |
| F1.0  | EPS         |               |            | 10             |
| F1.5  | EPS         |               |            | 15             |
| F2.0  | EPS         |               |            | 20             |
| 1S0.5 | SFRC        | 1             | SHE        | 5              |
| 1S1.0 | SFRC        | 1             | SHE        | 10             |
| 1S1.5 | SFRC        | 1             | SHE        | 15             |
| 2S0.5 | SFRC        | 2             | SHE        | 5              |
| 2S1.0 | SFRC        | 2             | SHE        | 10             |
| 2S1.5 | SFRC        | 2             | SHE        | 15             |
| 1D1.0 | SFRC        | 1             | DHE        | 10             |
| 1D1.5 | SFRC        | 1             | DHE        | 15             |
| 1D2.0 | SFRC        | 1             | DHE        | 20             |
| 2D1.0 | SFRC        | 2             | DHE        | 10             |
| 2D1.5 | SFRC        | 2             | DHE        | 15             |
| 2D2.0 | SFRC        | 2             | DHE        | 20             |

## 2.3 วิธีการทดสอบ

การทดสอบการยิงกระสุนปืน เริ่มด้วยติดตั้งแผ่นคอนกรีตตัวอย่างบนฐานเหล็กและติดตั้งเครื่องวัดอัตราเร็วกระสุนไว้ที่ด้านหน้าและด้านหลังตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 4 จากนั้นทำการยิงที่ด้วยกระสุนขนาด 9 มม. ที่ระยะ



(ก) ผนังกระสุนแบบ 3 ชั้น



(ข) ผนังกระสุนแบบ 5 ชั้น

รูปที่ 2 รูปแบบผนังกันกระสุนแบบ 3 ชั้น และ 5 ชั้น



รูปที่ 3 การหล่อตัวอย่างทดสอบ

10 เมตร เข้าที่บริเวณกึ่งกลางแผ่นดังรูปที่ 5 แล้วทำการบันทึกความเร็วของกระสุนก่อนและหลังการปะทะ รวมทั้งรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบ

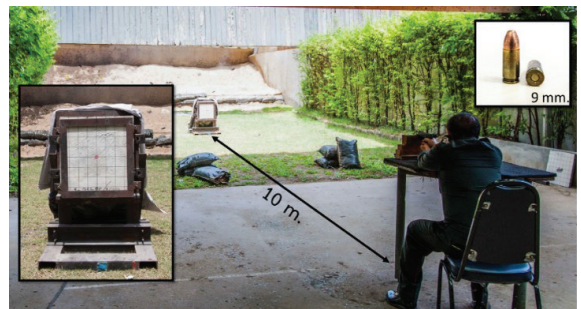
## 2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

### 2.4.1 การคำนวณการดูดซับพลังงานจลน์

ระหว่างการทดสอบ ค่าความเร็วกระสุนก่อนและหลังปะทะจะถูกบันทึกไว้ โดยที่ค่าพลังงานจลน์ของกระสุนปืน



รูปที่ 4 การติดตั้งเครื่องวัดอัตราเร็วกระสุน



รูปที่ 5 การทดสอบผนังกันกระสุนแบบหลายชั้น

ก่อนการปะทะของกระสุนปืน 9 มม. เท่ากับ 492 จูล จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าพลังงานจลน์ที่ดูดซับจากสมการที่ (1)

$$E = \frac{1}{2}m(V_1^2 - V_2^2) \quad (1)$$

$E$  คือ ค่าการดูดซับพลังงานของวัสดุ ( $J$ )

$V_1$  คือ ความเร็วกระสุนก่อนปะทะ ( $m/s$ )

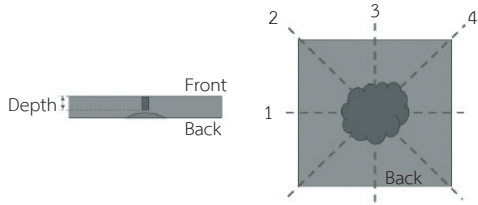
$V_2$  คือ ความเร็วกระสุนหลังปะทะ ( $m/s$ )

$m$  คือ น้ำหนักหัวกระสุน (9 มม. = 0.00745 kg)

### 2.4.2 การประเมินการวิบัติ

แผ่นคอนกรีตที่ทำการทดสอบแล้วจะทำการวัดค่าความลึกของการทะลุผ่านของกระสุนปืนและวงการกะเทาะเฉลี่ยจากเส้นผ่านศูนย์กลางวงกะเทาะที่ด้านหลังตัวอย่างทดสอบ โดยวิธีการวัดจะเป็นการเฉลี่ยทั้ง 4 ทิศทางดังรูปที่ 6

สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม และคณะ, “การดูดซับพลังงาน และรูปแบบการวิบัติของผนังคอนกรีตกันกระสุนแบบหลายชั้นจากเส้นใยเหล็ก แผ่นโม่ และยางพารา.”



รูปที่ 6 การวัดความลึกและวงการกระเทาะ

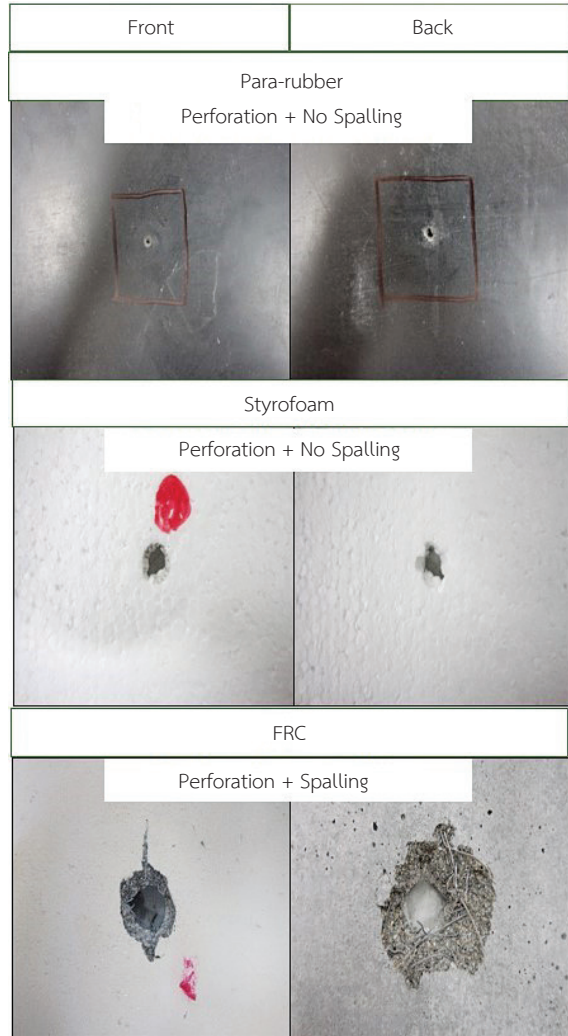
### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 ผลการทดสอบแผ่นวัสดุทดสอบ

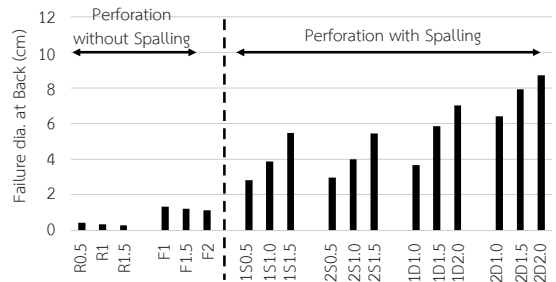
ในส่วนแรกเป็นการยิงทดสอบแผ่นวัสดุชนิดต่างๆ ได้แก่ แผ่นยางพารา แผ่นโม่ และแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ที่ความหนาแตกต่างกัน ผลการทดสอบเป็นดังนี้

##### 3.1.1 รูปแบบการวิบัติ

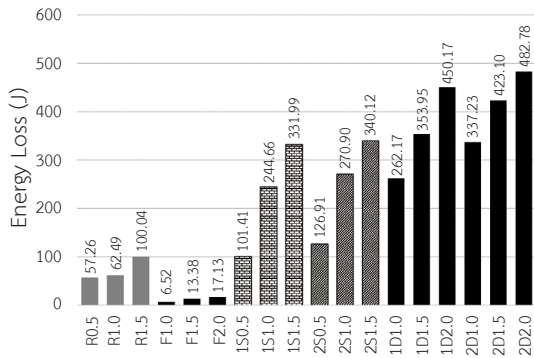
จากการทดสอบ พบว่า โดยภาพรวมของรูปแบบการวิบัติของแผ่นวัสดุทดสอบทุกชนิดเป็นแบบการทะลุผ่าน (Perforation) กล่าวคือ กระสุนปืนสามารถทะลุผ่านแผ่นวัสดุทดสอบได้ โดยที่แผ่นยางพาราและโม่ไม่เกิดการกระเทาะที่ด้านหลัง (No Spalling) แต่แผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กเกิดการกระเทาะที่ด้านหลัง (Spalling) ดังรูปที่ 7 จากการวัดวงการกระเทาะเฉลี่ยที่ด้านหลังของแผ่นวัสดุทดสอบ พบว่า แผ่นยางพาราและแผ่นโม่ที่ถูกยิงด้วยกระสุนปืน 9 มม. มีแนวโน้มวงการกระเทาะลดลงตามความหนาที่เพิ่มขึ้น โดยที่แผ่นยางพารามีขนาดวงการกระเทาะที่เล็กกว่าแผ่นโม่ เนื่องจากคุณลักษณะของแผ่นยางพาราที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นกว่าแผ่นโม่ สำหรับกรณีแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กทั้งชนิด SHE และ DHE พบว่า วงการกระเทาะเฉลี่ยที่เกิดจากกระสุนปืนเพิ่มขึ้นตามความหนาและปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับ Sukontasukkul *et al.* [6] และพบว่าคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กชนิด DHE มีขนาดวงการกระเทาะมากกว่าคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กชนิด SHE แสดงดังรูปที่ 8 ทั้งนี้เนื่องมาจากกระสุนปืนทำให้เกิดการวิบัติเฉพาะจุด (Local Failure) ดังนั้นการเส้นใยเหล็กชนิด SHE มีความยาวที่สั้นกว่าชนิด DHE จะสามารถยึดรั้งรอยแตกที่เกิดขึ้นของแผ่นคอนกรีตได้ดีกว่าชนิด DHE ที่มีความยาวมากกว่า พิจารณาดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 รูปแบบการวิบัติของแผ่นยาง โม่ และคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก



รูปที่ 8 เส้นผ่านศูนย์กลางการวิบัติ



รูปที่ 9 การดูดซับพลังงานจลน์

### 3.1.2 การดูดซับพลังงานจลน์

จากการทดสอบ เมื่อคำนวณการดูดซับพลังงานจลน์โดยใช้สมการที่ (1) พบว่า แผ่นวัสดุทดสอบทุกชนิดมีแนวโน้มดูดซับพลังงานจลน์จากกระสุนปืนได้เพิ่มขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับพลังงานจลน์ของแผ่นวัสดุแต่ละชนิด จะพบว่าแผ่นยางพารามีการดูดซับพลังงานจลน์ได้มากกว่าแผ่นโฟม เนื่องจากแผ่นยางพารา มีความยืดหยุ่นและเหนียวมากกว่าแผ่นโฟม โดยที่แผ่นที่มีความหนามากกว่าจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานจลน์ที่ดีกว่า สำหรับแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กพบว่า การดูดซับพลังงานจลน์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็กและความหนาที่เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิด DHE จะมีการดูดซับพลังงานจลน์ได้มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กชนิด SHE เนื่องจากเส้นใยเหล็กชนิด DHE มีกำลังรับแรงดึงที่มากกว่าและมีรูปทรงดัดงอที่มากกว่าทำให้เกิดแรงเสียดทานที่มากกว่าเส้นใยเหล็กชนิด SHE นอกจากนี้ การเพิ่มความหนาของแผ่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กจะทำให้สามารถดูดซับพลังงานจลน์ได้เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sovjak *et al.* [4] ที่พบว่า การเพิ่มความหนาของแผ่นคอนกรีตและปริมาณเส้นใยเหล็กสามารถลดพลังงานจลน์ของกระสุนปืนได้

### 3.2 ผลการทดสอบแผ่นคอนกรีตแบบหลายชั้น

ในส่วนนี้จะนำผลการทดสอบในส่วนแรกมาออกแบบ

เป็นแผ่นคอนกรีตแบบหลายชั้น โดยหลักการออกแบบเป็นการนำค่าการดูดซับพลังงานจลน์ของวัสดุแต่ละชนิดมารวมกัน ให้มากกว่าค่าพลังงานจลน์ตั้งต้นของกระสุนปืน 9 มม. เพื่อให้แผ่นที่ออกแบบสามารถดูดซับพลังงานจลน์ไว้ได้หมด โดยไม่เกิดการทะลุออก ซึ่งตัวอย่างแผ่นคอนกรีตทดสอบแสดงในหัวข้อ 2.2 ที่ได้กล่าวข้างต้น ซึ่งผลการทดสอบเป็นดังนี้

#### 3.2.1 รูปแบบการวิบัติ

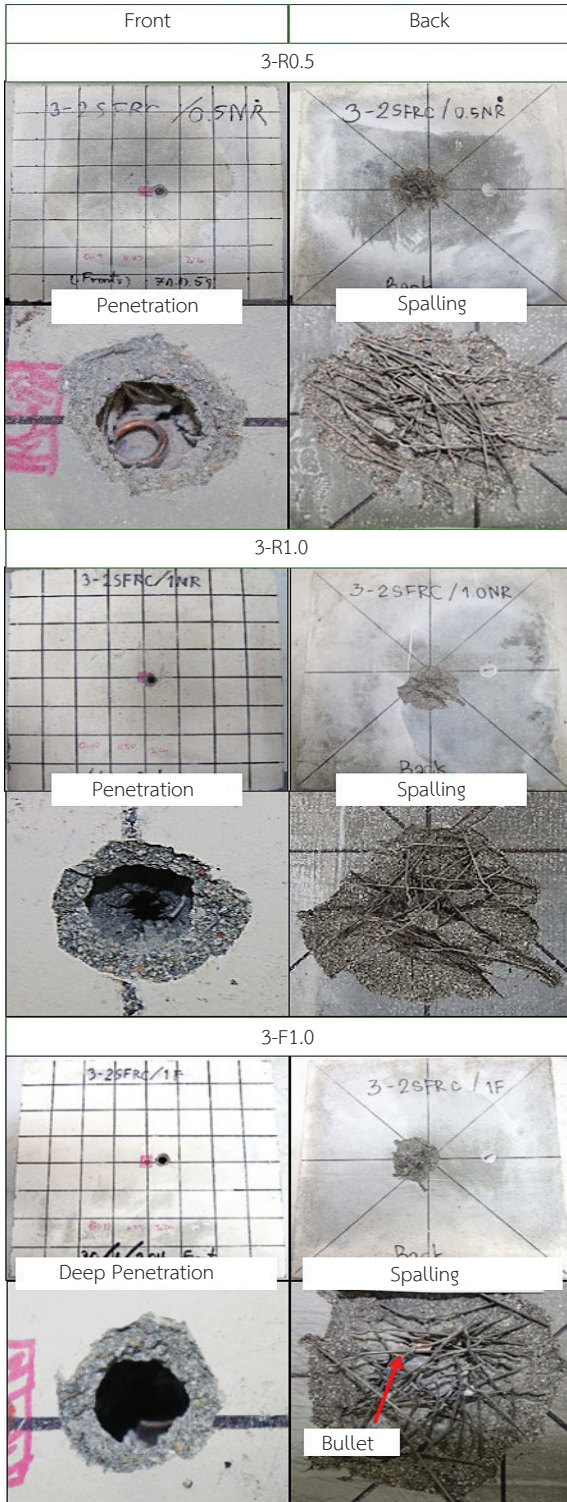
จากผลกรายทดสอบพบว่า แผ่นคอนกรีตทั้งแบบ 3 ชั้น และ 5 ชั้น ไม่พบการทะลุและการสะท้อนกลับของกระสุนปืน โดยการวิบัติส่วนใหญ่ที่พบ กระสุนปืนฝังอยู่ที่ด้านในแผ่นคอนกรีต (Penetration) และด้านหลังเกิดการกะเทาะ (Spalling) โดยแผ่นคอนกรีตแบบ 3 ชั้น ที่มีแผ่นโฟมเกิดความเสียหายมากกว่าแผ่นคอนกรีตที่ทำแผ่นยาง แสดงดังรูปที่ 10 สำหรับแผ่นคอนกรีตแบบ 5 ชั้น ที่ทำจากแผ่นยางพาราหนา 0.5 ซม. จะเกิดการกะเทาะที่ด้านหลัง และเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นแผ่นยางพาราเป็น 1 ซม. จะไม่พบการกะเทาะที่ด้านหลังเช่นเดียวกับการใช้แผ่นโฟมหนา 1 ซม. เช่นกัน พิจารณาดังรูปที่ 11

#### 3.2.2 วงการกะเทาะ และความลึกของการทะลุ

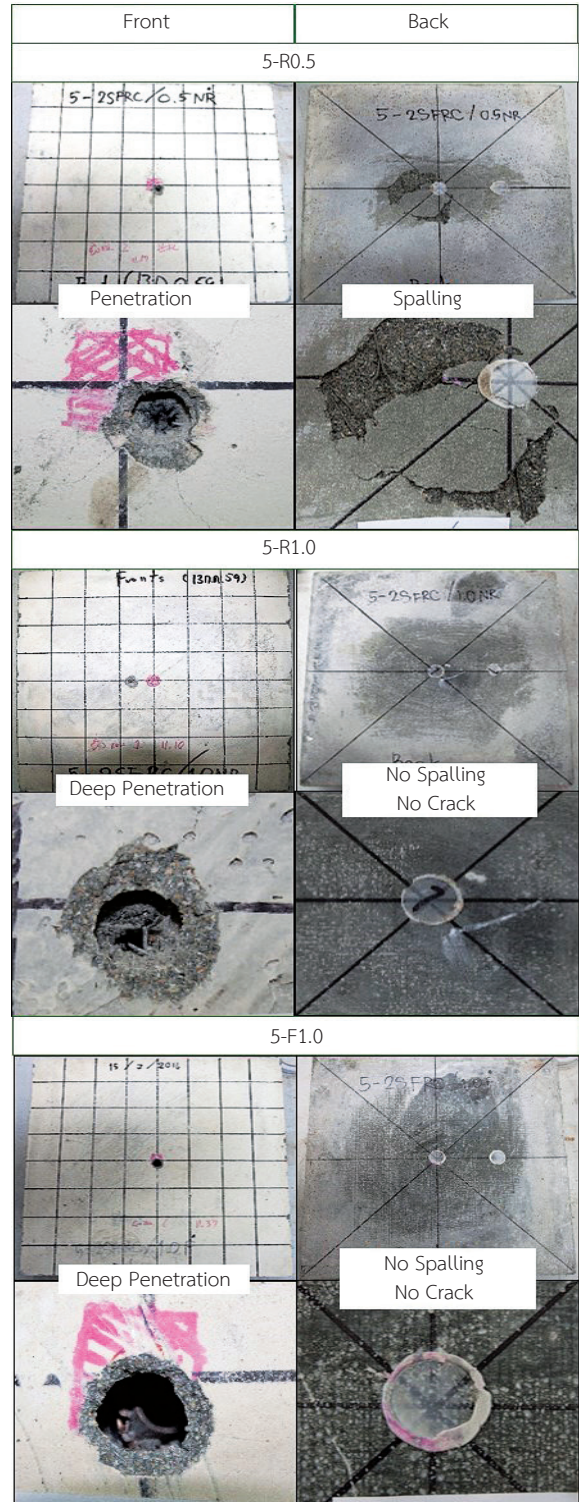
เมื่อวัดขนาดวงการกะเทาะและความลึกของการทะลุของแผ่นคอนกรีตทดสอบพบว่า แผ่นคอนกรีตแบบ 3 ชั้น จะมีขนาดวงการกะเทาะเฉลี่ยและความลึกของการทะลุลดลงตามความหนาของแผ่นยางพาราที่เพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการใช้แผ่นยางพาราและแผ่นโฟมที่มีความหนา 1 ซม. เท่ากัน จะพบว่าแผ่นคอนกรีตที่ทำจากแผ่นโฟมจะมีวงการกะเทาะน้อยกว่าแผ่นยางพารา แต่จะมีความลึกของการทะลุที่มากกว่าแผ่นยางพารา เมื่อพิจารณาแผ่นคอนกรีตแบบ 5 ชั้น พบว่า การใช้แผ่นยางพาราหนา 0.5 ซม. พบวงการกะเทาะเกิดขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความหนาเป็น 1 ซม. ไม่พบวงการกะเทาะเช่นเดียวกับการใช้แผ่นโฟม นอกจากนี้ ความลึกของการทะลุจะลดลงตามความหนาของแผ่นยางพาราที่เพิ่ม โดยแผ่นยางพาราจะมีความลึกของการทะลุที่น้อยกว่าแผ่นโฟม แสดงดังรูปที่ 12 และ 13

สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม และคณะ, “การดูดซับพลังงาน และรูปแบบการวิบัติของผนังคอนกรีตกันกระสุนแบบหลายชั้นจากเส้นใยเหล็ก แผ่นโพลีเอทิลีน และยางพารา.”

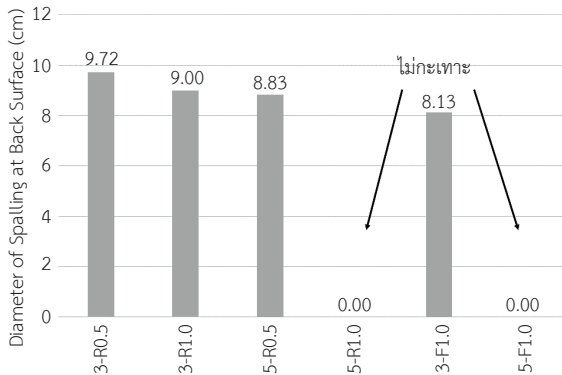


รูปที่ 10 ผนังกันกระสุนแบบ 3 ชั้น

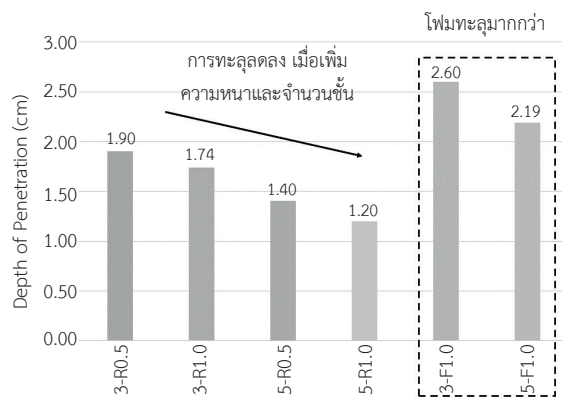


รูปที่ 11 ผนังกันกระสุนแบบ 5 ชั้น





รูปที่ 12 เส้นผ่านศูนย์กลางการกะเทาะที่ด้านหลังผนังกันกระสุน



รูปที่ 13 ความลึกการทะลุของผนังกันกระสุน

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ข้างต้นกับงานวิจัยของ Sukontasukkul *et al.* [6] ซึ่งได้ศึกษาผนังคอนกรีตแบบ 2 ชั้น ทำจากคอนกรีตผสมเม็ดยางและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กชนิด SHE พบว่าวงการกะเทาะของผนังคอนกรีตแบบ 3 ชั้น และ 5 ชั้น มีขนาดเล็กกว่าผนังคอนกรีตแบบ 2 ชั้น เนื่องจากผนังแบบ 3 ชั้น และ 5 ชั้น ยอมให้กระสุนปืนทะลุผ่านชั้นแรกเข้าไปได้ แต่ผนังคอนกรีตแบบ 2 ชั้น มีผิวหน้าเป็นคอนกรีตผสมเม็ดยางเมื่อกระสุนปะทะจึงเกิดการกะเทาะออกเป็นวงกว้างและเกิดการสะท้อนออกของกระสุนเนื่องจากชั้นที่สองเป็นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่แข็ง ดังนั้นผนังคอนกรีตแบบ 3 ชั้น และ 5 ชั้น

ที่ทำจากแผ่นยาง แผ่นโฟม และคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสามารถลดการสะท้อนของกระสุนได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับผนังคอนกรีตแบบ 2 ชั้น จากงานวิจัยที่ผ่านมา [6]

#### 4. สรุป

จากการศึกษาการดูดซับพลังงานจลน์ของวัสดุแต่ละชนิดพบว่า แผ่นยางและโฟมเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น เมื่อถูกยิงจึงไม่เกิดการกะเทาะที่ด้านหลัง ซึ่งแตกต่างกับคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กเมื่อถูกยิงจะมีการกะเทาะ โดยขนาดวงการกะเทาะและการดูดซับพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นตามความหนาและปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น

การศึกษารูปแบบการวิบัติของผนังกันกระสุนแบบหลายชั้นโดยนำผลการดูดซับพลังงานจลน์จากส่วนแรกมาออกแบบ พบว่าผนังทุกรูปแบบมีประสิทธิภาพในการป้องกันการทะลุและการสะท้อนกลับได้เป็นอย่างดี ซึ่งรูปแบบการวิบัติจะเป็นแบบกระสุนฝังอยู่ในแผ่นคอนกรีต และด้านหลังของแผ่นคอนกรีตแบบ 3 ชั้น เกิดการกะเทาะแต่ในแผ่นคอนกรีตแบบ 5 ชั้น ที่ทำจากแผ่นยางและโฟมหนา 1 ซม. ไม่พบการกะเทาะ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผ่นคอนกรีตแบบหลายชั้นมีประสิทธิภาพในการป้องกันการสะท้อนกลับและทะลุออกได้เป็นอย่างดี

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ PHD59I0023 และทุนงบประมาณแผ่นดิน KMUTNB-60-GOV-003 ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยบริษัท S.R. Fiber ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนเส้นใยเหล็ก รวมถึงภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Banthia, S. Mindess, and C. Yan, "Fracture toughness of concrete under impact loading," *Cement and Concrete Research*, vol. 17, no. 2,

- pp. 321–341, 2004.
- [2] P. Sukontasukkul, P. Nimityongskul, and S. Mindess, “Effect of loading rate on damage of concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 11, pp. 2127–2134, 2004.
- [3] M. Nili, A. H. Ghorbankhani, A. AlaviNia, and M. Zolfaghari, “Assessing the impact strength of steel fiber-reinforced concrete under quasi-static and high velocity dynamic impacts,” *Construction and Building Materials*, vol. 107, pp. 264–271, 2016.
- [4] R. Sovjak, T. Vavriník, J. Zatloukal, P. Maca, T. Micunek, and M. Frydrýn, “Resistance of slim UHPFRC targets to projectile impact using in-service bullets,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 76, pp. 166–177, 2015.
- [5] P. Sukontasukkul, S. Mindess, and N. Banthia, “Penetration Resistance of Hybrid Fiber Reinforced Concrete under Low Velocity Impact Loading,” *Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, Montreal, Quebec, Canada, Jun. 5–8, 2002.
- [6] 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.