

การพัฒนาคอนกรีตประสิทธิภาพสูงสำหรับกำแพงป้องกันกระสุน Development of high performance concrete for bulletproof wall panel application

ปิยพงษ์ สุวรรณณิโชติ^{1,2}, พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง^{2,3,*}, ประเทือง โมรราย⁴, ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด⁵, ธนากร พิระพันธุ์⁶

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

²หน่วยวิจัยเพื่อนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

³ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

⁴ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

⁵ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

⁶ภาควิชาวิศวกรรมโยธา กองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโยธา กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ

*Corresponding author e-mail: pop_civil@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาคอนกรีตประสิทธิภาพสูงเพื่อใช้ป้องกันกระสุน โดยสนใจความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของคอนกรีตปกติ (NC) คอนกรีตกำลังสูง (HSC) คอนกรีตผสมเส้นใยพอลิเมอร์ (PFRC) และคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (SFRC) โดยหล่อแผ่นคอนกรีตขนาด 40x40 เซนติเมตรหนา 57.5 และ 10 เซนติเมตร ใช้กระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร ยิงแผ่นคอนกรีต ยิงตรง ตั้งฉาก ห่างจากผิวตัวอย่าง 200 เมตร วัดความเร็วของกระสุนก่อนและหลังกระแทกแผ่นคอนกรีต รวมไปถึงพิจารณาการแตกร้าวและการทดสอบปรากฏว่า คอนกรีตกำลังสูงสามารถดูดซับพลังงานจลน์ของกระสุนได้ดี แต่เสียหายค่อนข้างมาก โดยผนังหนา 5 เซนติเมตร ดูดซับพลังงานจลน์เทียบเท่ากับคอนกรีต NC และ PFRC ที่หนา 7.5 เซนติเมตร เส้นใยในคอนกรีต SFRC ช่วยให้คอนกรีตเหนียวขึ้น และป้องกันแรงกระแทกจากกระสุนได้ดี โดยผิวคอนกรีตบางส่วนกะเทาะออก

คำสำคัญ: ผนังกันกระสุน, คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก, คอนกรีตผสมเส้นใยพอลิเมอร์, คอนกรีตกำลังสูง, ความเร็วกระสุน

Abstract

The main objective of this work is to develop high performance concrete for bulletproof application. The bullet energy adsorption efficiency of four concrete categories including normal concrete (NC), high strength concrete (HSC), polymer fiber reinforced concrete (PFRC) and steel fiber reinforced concrete (SFRC) were studied. The dimensions of the panels are 40x40 cm with the thickness of 5, 7.5 and 10 cm for energy adsorption test. The 7.62-mm bullet was shot from the distance 200 m and perpendicular to the surface. The bullet speed before and after impact through a plate were measured. This study suggested that the HSC specimens show highest energy adsorption while they reveal a lot of damage. The 5 cm. thick specimens of HSC showed energy adsorb ability equal to the NC or PFRC plate with 7.5 cm thick. Steel fiber reinforcement increased the concrete ductility and bullet resistance ability of concrete.

Keywords: Bulletproof Wall Panel, Steel Fiber Reinforced Concrete, Polymer Fiber Reinforced Concrete, High Strength Concrete, Bullet velocity

1. บทนำ

ปัญหาความไม่สงบในสามจังหวัดชายแดนใต้ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของประเทศ แม้ที่ผ่านมาหน่วยงานรัฐทุ่มทรัพยากรเพื่อแก้ปัญหา แต่ยังไม่มีความคืบหน้าในเวลานี้ ใกล้เคียง กองทัพจึงเป็นหน่วยงานหลักในการแก้ปัญหาอย่างต่อเนื่อง เหตุการณ์ในช่วงปี พ.ศ. 2547-2557 ต้องสูญเสีย

เจ้าหน้าที่ตำรวจ ทหาร ไปแล้วอย่างน้อย 4,399 นาย ประชาชนบาดเจ็บ 5,782 ราย เสียชีวิต 3,786 ราย [1] หนทางหนึ่งในการลดความสูญเสียและปกป้องเจ้าหน้าที่ในสามจังหวัดชายแดนใต้ คือ สร้างอาคารที่สามารถทนทานแรงปะทะจากกระสุน อาวุธปืน หรือแรงระเบิด โดยทั่วไป นิยมสร้างอาคารถาวรเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งสามารถรับ

น้ำหนักได้สูง แต่ไม่ได้ออกแบบเพื่อรับการโจมตีด้วยอาวุธดังกล่าว จึงจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติเฉพาะ เช่น จะต้องคำนึงถึงพลังงานและแรงปะทะของกระสุนไม่ให้ทะลุผ่านคอนกรีต เมื่อกระสุนปืนตกกระทบคอนกรีตจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานกัน หากคอนกรีตสามารถถ่ายเทพลังงานจลน์จากลูกกระสุนจนหมด กระสุนก็จะไม่สามารถทะลุผ่านคอนกรีต กลไกสำคัญในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทพลังงานจากกระสุนมาที่คอนกรีตก็คือ การเพิ่มสมบัติทางด้านความเหนียวของวัสดุในประเด็นการรับแรงดึงและแรงกระแทก ซึ่งคอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถรับกำลังอัดสูงแต่มีความเหนียวต่ำมาก ทำให้ความสามารถในการลดพลังงานของกระสุนปืนมีค่าต่ำ การปรับปรุงสมบัติทางด้านความเหนียวของคอนกรีตสามารถทำได้โดยการเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใย เช่น เส้นใยแก้ว (fiberglass) เส้นใยพอลิเมอร์ (polymer fiber) [2, 3] หรือ เส้นใยเหล็ก (steel fiber) [4, 5]

Banthia และคณะ [6] ศึกษาการนำ crimped steel fiber ที่ยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ มาปรับปรุงสมบัติความเหนียวของคอนกรีต โดย crimped steel fiber ที่นำมาใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังคอนกรีตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสามขนาด แบ่งเป็นสองกลุ่ม คือ crimped steel fiber ขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.80 มิลลิเมตร) และ crimped steel fiber ขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 และ 0.40 มิลลิเมตร) ปกติคอนกรีตที่ผสมเส้นใยขนาดเล็กมีกำลังดึงสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยขนาดใหญ่ เนื่องจากเส้นใยขนาดเล็กทำให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (micro cracks) ขณะที่เส้นใยขนาดใหญ่เกิดรอยร้าวขนาดใหญ่ (macro cracks) เส้นใยขนาดใหญ่มีราคาสูงกว่าเส้นใยขนาดเล็ก ดังนั้น งานวิจัยของ Banthia จึงศึกษา flexural toughness factor ของคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย crimped steel fiber ขนาดใหญ่ และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ flexural toughness factor เนื่องจากการผสม crimped steel fiber ขนาดเล็ก ผลศึกษาสรุปได้ว่าการผสม crimped steel fiber เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กกับคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย crimped steel fiber ขนาดใหญ่ ช่วยให้ flexural toughness factor ของตัวอย่างเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่า flexural toughness factor ของตัวอย่างที่ผสม crimped steel fiber ขนาดเล็ก ร่วมกับ crimped steel fiber ขนาดใหญ่ ในสัดส่วนต่างๆ มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย crimped steel fiber ขนาดเล็กเพียงอย่างเดียว

Tassew และคณะ [7] ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ ceramic concrete โดยเสริมกำลังด้วย chopped glass fiber โดย ceramic concrete ที่นำมาเสริมกำลังมี 2 ประเภท ได้แก่ ประเภท L (คอนกรีตมวลเบาที่ใช้ expanded clay เป็นส่วนประกอบของมวลรวม) และประเภท S (คอนกรีตที่ใช้ well-graded sand เป็นส่วนประกอบของมวลรวม) และคอนกรีตแต่ละประเภทเสริมกำลังโดยใช้ chopped

glass fiber ที่มีความยาวแตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ Lf13 (chopped glass fiber ยาว 13 มิลลิเมตร) และ Lf19 (chopped glass fiber ยาว 19 มิลลิเมตร) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การเสริมกำลังคอนกรีตด้วย chopped glass fiber ส่งผลให้ compression toughness index เพิ่มขึ้นทุกส่วนผสมและทุกความยาวของ chopped glass fiber ความยาวของ chopped glass fiber ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ compression toughness index เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลของปริมาณเส้นใย สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณของเส้นใยส่งผลต่อลักษณะเชิงกลมากกว่าปัจจัยเนื่องจากความยาวของเส้นใย เมื่อทดสอบ load-displacement ภายใต้การรับแรงดัดพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ chopped glass fiber ส่งผลให้ flexural toughness มีค่าเพิ่มขึ้นทุกตัวอย่าง ตัวอย่างจาก ceramic concrete ประเภท L มีแนวโน้มของค่า flexural toughness ต่ำกว่า ceramic concrete ประเภท S เนื่องจากเกิดรอยแตกในส่วนที่เป็นมอร์ตาร์และมวลรวมเบา

Sukontasukkul และคณะ [8] ศึกษาการเพิ่มความสามารถในการกันกระสุนของผนังคอนกรีตโดยเสริมกำลังด้วย hooked end steel fiber และ crumb rubber โดยแบ่งประเภทของคอนกรีตออกเป็นสามกลุ่ม คือ ผนังคอนกรีตชั้นเดียวที่เสริมกำลังด้วย hooked end steel fiber (SFRC) ในอัตราส่วนร้อยละ 2 3 และ 4 โดยปริมาตร ผนังคอนกรีตชั้นเดียวที่เสริมกำลังด้วย crumb rubber (RC) โดยแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 50 75 และ 100 โดยปริมาตร และผนังคอนกรีตสองชั้น โดยผิวหน้าเป็นชั้นของคอนกรีตเสริมเหล็กมีความหนาแน่นระหว่าง 5-15 มิลลิเมตร และชั้นที่สองเป็นชั้นของ SFRC มีความหนาแน่นระหว่าง 15-25 มิลลิเมตร ทดสอบโดยยิงกระสุนปืนขนาด 9 มิลลิเมตร ที่ระยะห่าง 10 เมตร ใส่แผ่นคอนกรีตในโครงเหล็ก โดยยึดที่มุมทั้งสี่ของแผ่นคอนกรีต และติดตั้งเครื่องวัดความเร่ง (accelerometer) เพื่อวัดความเร่งของกระสุนหลังจากตกกระทบแผ่นคอนกรีต ผลทดสอบสรุปได้ว่า แผ่นคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย hooked end steel fiber เพียงอย่างเดียวกันกระสุนได้ทุกตัวอย่าง แผ่นคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย crumb rubber เพียงอย่างเดียวป้องกันกระสุนไม่ได้ คอนกรีตที่หล่อสองชั้นส่วนมากกันกระสุนได้ อย่างไรก็ตาม ระบบป้องกันกระสุนแบบสองชั้น ลดความเร่งของกระสุนได้ดีกว่าระบบแผ่นคอนกรีตแบบชั้นเดียว

แม้ว่าปัจจุบันจะมีงานวิจัยพัฒนาคอนกรีตสำหรับกันกระสุนอยู่บ้าง แต่มีน้อยมากเนื่องจากเป็นการวิจัยเพื่อทางการทหารโดยเฉพาะ และที่สำคัญการทดสอบความสามารถในการป้องกันกระสุนมักไม่ได้ทดสอบตามมาตรฐานการป้องกันกระสุนใด ดังนั้น จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะพัฒนาคอนกรีตสำหรับป้องกันกระสุน โดยสนใจสมบัติด้านความสามารถในการรับกำลังอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานของกระสุน ตามมาตรฐาน Ballistic Resistance

of Body Armor NIJ Standard-0101.06 Type III; (Rifles)
[9]

2. วัสดุและกระบวนการทดสอบ

2.1 วัสดุประกอบการวิจัย

วัสดุประกอบการวิจัยประกอบด้วยสองส่วน ดังนี้
ส่วนที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีตประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทรายแม่น้ำ หินปูน หรือหินแอนดีไซต์ (แล้วแต่ประเภทคอนกรีต) และสารลดน้ำพิเศษ
ส่วนที่ 2 วัสดุเสริมกำลัง ได้แก่ เส้นใยพอลิเมอร์ (polymer fiber) ประเภท polypropylene ตามมาตรฐาน ASTM C1116-02 [10] และเส้นใยเหล็ก (steel fiber) ตามมาตรฐาน ASTM A820 [11] ซึ่งมีสมบัติตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของเส้นใย

ประเภท	ถพ.	รูปร่าง	l (mm)	d (mm)	l/d	กำลังดึง (MPa)
เหล็ก	7.80	งอปลาย	60	0.90	65	1,160
พอลิเมอร์	0.91	เส้นตรง	12	18×10^{-3}	650	300-400

2.2 ประเภทคอนกรีต

การวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการป้องกันและการดูดซับแรงปะทะของกระสุนในคอนกรีต 4 ประเภท ดังนี้

ประเภทที่ 1 คอนกรีตปกติ (NC) เป็นคอนกรีตทั่วไป คือ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย และ หินปูน โดยใช้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40

ประเภทที่ 2 คอนกรีตกำลังสูง (HSC) เป็นคอนกรีตที่ใช้ วัสดุคล้ายคอนกรีตปกติ แต่เปลี่ยนหินปูนเป็นหินแอนดีไซต์ซึ่ง มีความแข็งแรงสูงกว่าหินปูน และลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 เพื่อให้มี กำลังสูงกว่าคอนกรีต NC และมีความสามารถทำงานได้

ประเภทที่ 3 คอนกรีตผสมเส้นใยพอลิเมอร์ (PFRC) เป็น คอนกรีตที่มีรูปแบบส่วนผสมเหมือนคอนกรีตปกติ แต่เติมเส้นใยพอลิเมอร์ลงไปในคอนกรีต โดยใช้เส้นใยพอลิเมอร์เสริมกำลังร้อยละ 0.6 โดยปริมาตร

ประเภทที่ 4 คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (SFRC) เป็น คอนกรีตที่มีรูปแบบส่วนผสมเหมือนคอนกรีตปกติ แต่เติมเส้นใยเหล็กลงไปคอนกรีต โดยใช้เส้นใยเหล็กเสริมกำลังร้อยละ 3.0 โดยปริมาตร

หล่อคอนกรีตทั้งสี่ประเภทในแบบหล่อรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร เพื่อทดสอบกำลังอัด และหล่อแผ่นคอนกรีตขนาด 40x40 เซนติเมตรหนา 5 7.5 และ 10 เซนติเมตร ควบคุมการยุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วง 10 ± 2.5 เซนติเมตร โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ หลังจากหล่อคอนกรีต 24 ชั่วโมง ถอดแบบหล่อ และบ่มคอนกรีตในน้ำสะอาด 28 วัน จึงเริ่มทดสอบ

2.3 รูปแบบการทดสอบ

ทดสอบสมบัติของวัสดุ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และทดสอบความสามารถต้านทานการสึกกร่อนของหินโดยเครื่องลอสมองเจลลิส

ทดสอบสมบัติทางกายภาพของคอนกรีต ได้แก่ ความหนาแน่น และกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

ทดสอบความสามารถดูดซับพลังงานและต้านทานการปะทะของกระสุน

การวิจัยนี้เลือกศึกษาความสามารถในการป้องกันกระสุน ตามมาตรฐาน NIJ Standard-0101.06 Type III; (Rifles) [9] ซึ่งมีข้อกำหนดรายละเอียดของกระสุนเป็นขนาด 7.62 มิลลิเมตร มวล 9.6 กรัม ความเร็วขณะตกกระทบตัวอย่าง 847 ± 9.1 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าพลังงานจลน์ประมาณ 3,275 จูล

การทดสอบความสามารถคอนกรีตทั้งสี่ประเภท ทำโดย วางแผ่นคอนกรีตไว้กึ่งกลางของเครื่องวัดอัตราเร็วกระสุนสองเครื่อง ยิงกระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร ผ่านเครื่องวัดอัตราเร็วกระสุนเครื่องแรกซึ่งจะทราบอัตราเร็วของกระสุน ก่อนตกกระทบแผ่นคอนกรีต (v_i) หลังจากนั้นกระสุนจะทะลุผ่านคอนกรีตและลอดผ่านเครื่องวัดอัตราเร็วกระสุนเครื่องที่สอง ทำให้ทราบอัตราเร็วของกระสุนหลังทะลุผ่านคอนกรีต (v_f) ดังรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีต

ประเภท คอนกรีต	W/C	ส่วนผสมคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)							
		ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย	สารลดน้ำ พิเศษ	มวลรวมหยาบ		เส้นใย	
						หินปูน	หินแอนดีไซต์	เหล็ก	พอลิเมอร์
NC	0.40	449	175	749	2.70	1,072	-	-	-
HSC	0.30	522	149	749	6.78	-	1,082	-	-
PFRC	0.40	449	175	749	2.70	1,072	-	-	0.60
SFRC	0.40	449	175	749	3.14	1,072	-	30	-

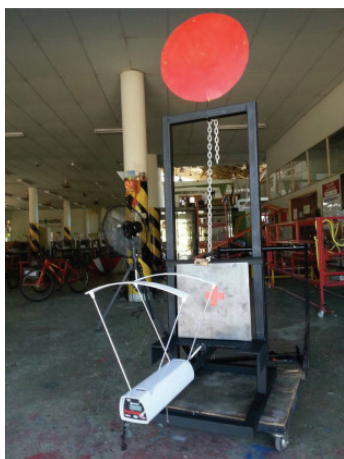


รูปที่ 1 ภาพจำลองการทดสอบความสามารถของแผ่นคอนกรีต ในการดูดซับแรงกระแทกของกระสุน

พลังงานจลน์ของกระสุนที่ดูดกลืนโดยแผ่นคอนกรีต (E_{ads}) แสดงดังสมการที่ (1)

$$E_{ads} = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 \quad (1)$$

แผ่นคอนกรีตทั้งสี่ประเภท ทดสอบที่ความหนา 5, 7.5 และ 10 เซนติเมตร โดยแต่ละกรณีจะทดสอบสามครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย คอนกรีตหนา 5 และ 7.5 เซนติเมตร จะยิงเพียงนัดเดียวเพื่อทดสอบการดูดซับพลังงาน ขณะที่ความหนา 10 เซนติเมตร จะยิงซ้ำตำแหน่งเดิมจนกระทั่งคอนกรีตวิบัติ เพื่อพิจารณาความสามารถต้านทานกระสุน



รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์ทดสอบความสามารถดูดซับแรงกระแทกของกระสุน

3. ผลวิจัยและวิเคราะห์ผล

3.1 ผลทดสอบสมบัติหินปูน หินแอนดิสไซต์ และทราย

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบสมบัติของวัสดุ ผลทดสอบความสามารถต้านทานการสึกกร่อนของหินแอนดิสไซต์สูญเสียน้ำหนักร้อยละ 11.09 หินปูนสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 22.41 จึงใช้หินแอนดิสไซต์เป็นมวลรวมหายาสำหรับคอนกรีตกำลังสูง อย่างไรก็ตาม หินทั้งสองประเภทต่างก็ผ่านมาตรฐาน ASTM C33 ที่กำหนดค่าการสูญเสียน้ำหนักของมวลรวมหายาสำหรับคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 [12]

3.2 ผลทดสอบความหนาแน่นและกำลังอัด

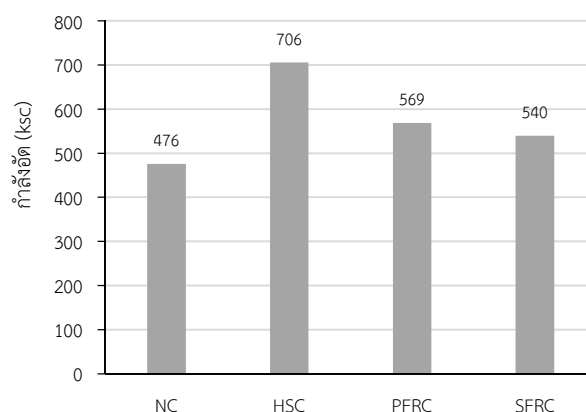
ความสามารถในการรับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน (รูปที่ 3) แสดงว่า $w/c = 0.40$ คอนกรีต NC สามารถรับแรงอัดต่ำที่สุด

ส่วนคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพิเศษ (PFRC และ SFRC) สามารถรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตประเภท NC ร้อยละ 120 และ 113 ตามลำดับ คอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยช่วยเพิ่มความสามารถรับกำลังอัด [13-15] ในขณะที่คอนกรีตประเภท HSC มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตประเภท NC ร้อยละ 148 เนื่องจาก w/c ที่ต่ำกว่าคอนกรีต NC และการใช้หินแอนดิสไซต์ที่มีความแข็งแรงมากกว่าหินปูน

ตารางที่ 3 ผลทดสอบสมบัติของหิน

สมบัติ	หินปูน	หินแอนดิสไซต์	ทราย
ความถ่วงจำเพาะ	2.82	2.94	2.60
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	0.52	0.17	0.95
โมดูลัสความละเอียด	7.53	6.86	2.54
การต้านทานการสึกกร่อนของหิน โดยเครื่องลอสมองเจลลิส (ร้อยละ)	22.41	11.09	-

ความหนาแน่นของคอนกรีตทุกประเภทต่างกันเล็กน้อย โดยคอนกรีตประเภท NC SFRC HSC และ PFRC มีความหนาแน่น 2,474 2,479 2,520 และ 2,548 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ



รูปที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีต

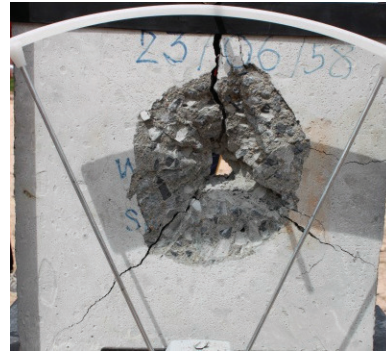
3.3 รูปแบบการวิบัติของแผ่นคอนกรีต

3.3.1 คอนกรีตปกติ NC

แผ่นคอนกรีตปกติ NC วิบัติเป็นรูเจาะขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกระสุนปืน คอนกรีตรอบรูเจาะกะเทาะออกทั้งด้านหน้าและด้านหลังเป็นวงกลม โดยด้านหลังกะเทาะออกมากกว่า ดังรูปที่ 4 (ก) เนื่องจากความเปราะของคอนกรีตทำให้เกิดรอยแตกร้าวบนแผ่นคอนกรีตจนแยกออกเป็นสามเสี่ยง กระสุนสามารถทะลุแผ่นคอนกรีต NC หนา 5 และ 7.5 เซนติเมตร โดยการยิงเพียงหนึ่งนัด ในขณะที่ความหนา 10 เซนติเมตร จะต้องยิงซ้ำจุดเดิมถึงสองนัด กระสุนจึงทะลุผ่านแผ่นคอนกรีต



ด้านหน้า



ด้านหลัง

(ก) NC



ด้านหน้า

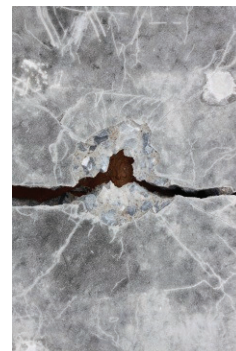


ด้านหลัง

(ข) HSC



ด้านหน้า



ด้านหลัง

(ค) PFRC



ด้านหน้า



ด้านหลัง

(ง) SFRC

รูปที่ 4 ลักษณะการวิบัติของแผ่นคอนกรีตหนา 5 เซนติเมตร



(ก) HSC



(ข) SFRC

รูปที่ 5 ความเสียหายของแผ่นคอนกรีตหนา 7.5 เซนติเมตร

3.3.2 คอนกรีตกำลังสูง HSC

คอนกรีตกำลังสูงเสียหายรุนแรงกว่าคอนกรีตปกติ โดยรอยบนแผ่นคอนกรีตและรอยกะเทาะของผิวคอนกรีตทั้งสองด้านกว้างกว่า (รูปที่ 4-ข) เพราะคอนกรีต HSC มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต NC จึงมีความเปราะมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากรอยแตกร้าวที่ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน ทำให้แผ่นคอนกรีตแยกออกเป็นสามเสี่ยงคล้ายกับคอนกรีต NC กระสุนทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตหนา 5 เซนติเมตร โดยยิงเพียงนัดเดียว ส่วนแผ่นคอนกรีตหนา 7.5 เซนติเมตร ยิงเพียงหนึ่งนัด กระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตได้ ด้านหน้าของแผ่นคอนกรีตกะเทาะออกเล็กน้อยและปรากฏรอยร้าวในแนวราบ (รูปที่ 5-ก) คอนกรีตกำลังสูงหนา 10 เซนติเมตร ต้องยิงกระสุนจำนวนสามนัดที่ตำแหน่งเดิมจึงวิบัติ ซึ่งต้องใช้จำนวนกระสุนที่มากกว่ากรณีคอนกรีต NC ที่หนา 10 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่า กำลังของคอนกรีตมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงของกระสุนปืน

3.3.3 คอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิเมอร์ PFRC

รูปที่ 4 (ค) แสดงการวิบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิเมอร์ PFRC หนา 5 เซนติเมตร ผิวหน้ารอบรูเจาะกะเทาะออกและปรากฏรอยแตกร้าวขนาดเล็กวิ่งผ่านรูที่เกิดจากกระสุนในแนวนอน ความเสียหายน้อยกว่าคอนกรีตสองประเภทแรกเนื่องจากเส้นใยพอลิเมอร์มีส่วนช่วยลดรอยแตกร้าว กระสุนเจาะทะลุแผ่นคอนกรีตหนา 5 และ 7.5 เซนติเมตร ด้วยการยิงเพียงนัดเดียว ส่วนคอนกรีตหนา 10 เซนติเมตร ต้องยิงสามนัดที่จุดเดิม กระสุนจึงสามารถทะลุแผ่นคอนกรีต ซึ่งใช้จำนวนกระสุนเท่ากับคอนกรีต HSC

3.3.4 คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก SFRC

คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก SFRC วิบัติแตกต่างจากคอนกรีตประเภทอื่น คือ ผิวหน้าของแผ่นคอนกรีตกะเทาะออกและเสียหายเฉพาะบริเวณที่กระสุนกระทบ เนื้อคอนกรีตมีเส้นใยเหล็กช่วยพยุงไว้ จึงไม่แตกร้าวโดยรอบเหมือนคอนกรีตทั้งสามประเภทข้างต้น (รูปที่ 4-ง) ด้านหลังของแผ่นคอนกรีตกะเทาะเป็นเศษชิ้นเล็กใหญ่ปะปนกัน ส่วนใหญ่ยังติดอยู่กับผิวคอนกรีตเนื่องจากแสดงถึงประสิทธิภาพเส้นใยลดการแตกร้าว ซึ่งช่วยป้องกันอันตรายจากสะเก็ดได้ คอนกรีต SFRC หนา 5

เซนติเมตร วิบัติจากกระสุนหนึ่งนัด ขณะที่ความหนา 7.5 เซนติเมตร แรงกระแทกของกระสุนเพียงทำให้ผิวหน้ากะเทาะเล็กน้อย (รูปที่ 5-ข) ส่วนความหนา 10 เซนติเมตร จะต้องยิงซ้ำตำแหน่งเดิมถึง 5 นัดจึงวิบัติ ซึ่งมากสุดในการวิจัยนี้

ตารางที่ 3 จำนวนกระสุนที่ใช้และรูปแบบการวิบัติของคอนกรีต

ประเภทคอนกรีต	ความหนา (cm)	กระสุนที่ยิงจนวิบัติ (นัด)	ลักษณะวิบัติ
NC	5.0	1	เจาะทะลุ
	7.5	1	เจาะทะลุ
	10.0	2	เจาะทะลุ
HSC	5.0	1	เจาะทะลุ
	7.5	1	วิบัติแต่ไม่ทะลุ
	10.0	3	เจาะทะลุ
PFRC	5.0	1	เจาะทะลุ
	7.5	1	เจาะทะลุ
	10.0	3	เจาะทะลุ
SFRC	5.0	1	เจาะทะลุ
	7.5	1	ยิงเพียงนัดเดียว (ไม่ทะลุ)
	10.0	5	กะเทาะทั้งหน้าและหลัง

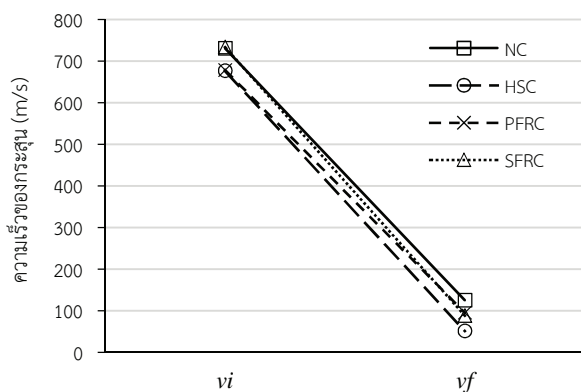
3.4 ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์และต้านทานการปะทะของกระสุน

การวัดอัตราเร็วของลูกกระสุนก่อน (v_i) และหลัง (v_f) กระแทกแผ่นคอนกรีต เพื่อคำนวณการดูดซับพลังงานจลน์ของแผ่นคอนกรีตตามสมการที่ (1) ความเร็วของลูกกระสุนก่อนกระแทกแผ่นคอนกรีตความหนา 5 เซนติเมตร มีค่าระหว่าง 650-750 เมตรต่อวินาที หลังจากกระสุนทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตแต่ละประเภทแล้ว ความเร็วลดลงเหลือ 25-160 เมตรต่อวินาที (รูปที่ 6)

3.4.1 คอนกรีตหนา 5 เซนติเมตร

กระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร สามารถเจาะทะลุแผ่นคอนกรีตทุกประเภทโดยยิงเพียงหนึ่งนัด คอนกรีต HSC มีความสามารถดูดซับพลังงานเท่ากับร้อยละ 99.4 (รูปที่ 7) ซึ่งมากกว่าคอนกรีต NC (ร้อยละ 96.9) แสดงว่า กำลังอัดของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่ต้านทานแรงกระแทกของกระสุน

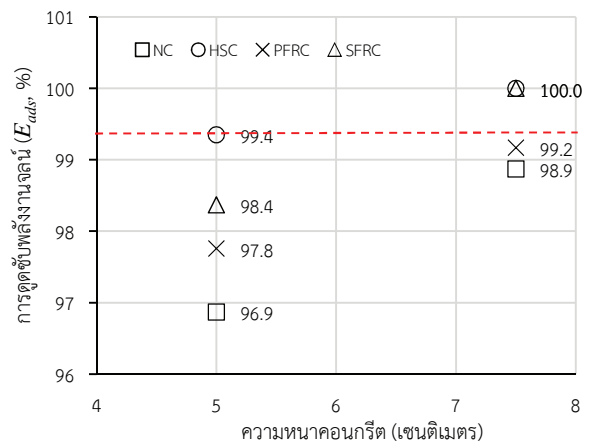
ขณะเดียวกันความเสียหายที่เกิดบนแผ่นคอนกรีต HSC มีมากกว่าคอนกรีต NC (รูปที่ 4) ซึ่งเป็นผลจากความเปราะของคอนกรีต คอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยเส้นใย เส้นใยหลักมีประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานจลน์ดีกว่าเส้นใยพอลิเมอร์ เพราะเส้นใยแข็งแรงกว่า โดยคอนกรีต SFRC และ PFRC ดูดซับพลังงานจลน์ร้อยละ 98.4 และ 97.8 ตามลำดับ สรุปได้ว่าคอนกรีต HSC มีประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานจลน์สูงสุด แต่เกิดความเสียหายมากที่สุดเช่นกัน คอนกรีต SFRC มีร่องรอยความเสียหายน้อยสุด ดังนั้น แนวความคิดในการใช้เส้นใยหลักเสริมคอนกรีตกำลังสูง จะช่วยลดการวิบัติบนแผ่นคอนกรีตและขณะเดียวกันเพิ่มความสามารถดูดซับพลังงานจลน์ ส่วนคอนกรีตที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์น้อยที่สุดคือ คอนกรีต NC



รูปที่ 6 ความเร็วของกระสุนปืนก่อนและหลังกระแทกแผ่นคอนกรีตความหนา 5 เซนติเมตร

3.4.2 คอนกรีตหนา 7.5 เซนติเมตร

ลูกกระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นคอนกรีต HSC และ SFRC หนา 7.5 เซนติเมตร แต่สามารถเจาะทะลุผ่านแผ่นคอนกรีต NC และ PFRC ได้ โดยยิงเพียงนัดเดียว คอนกรีต NC และ PFRC ดูดซับพลังงานกระสุนได้ร้อยละ 98.9 และ 99.2 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับคอนกรีต HSC หนา 5 เซนติเมตร (รูปที่ 7) ดังนั้น การเลือกใช้คอนกรีต HSC จะลดความหนาของผนังคอนกรีตได้อย่างน้อย 2.5 เซนติเมตร เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการใช้คอนกรีตปกติและคอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิเมอร์ ความหนาของผนังลดลงทำให้น้ำหนักผนังเบาลงสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกและรวดเร็ว



รูปที่ 7 ความสามารถดูดซับพลังงานจลน์ของคอนกรีตหนา 5 และ 7.5 เซนติเมตร

3.4.3 คอนกรีตหนา 10 เซนติเมตร

กระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตทุกประเภทที่หนา 10 เซนติเมตร โดยการยิงเพียงนัดเดียว ดังนั้น คอนกรีต NC กระสุนทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตในนัดที่สอง โดยแผ่นคอนกรีตดูดซับพลังงานกระสุนได้ร้อยละ 99.7 คอนกรีต HSC และ PFRC กระสุนทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตในนัดที่สาม โดยดูดกลืนพลังงานกระสุนในนัดที่สาม ร้อยละ 24.9 และ 97.4 ตามลำดับ คอนกรีต HSC จึงสามารถดูดซับพลังงานได้น้อยมากเมื่อคอนกรีตใกล้จะวิบัติ เพราะคอนกรีต HSC มีความเปราะมากทำให้เกิดรอยร้าวและความเสียหายขนาดใหญ่ ยิ่งกระสุนนัดที่สามทำให้คอนกรีตดูดซับพลังงานจลน์ได้น้อยลง ส่วนคอนกรีต SFRC กระสุนทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตในนัดที่ห้า แสดงความเหนียวของแผ่นคอนกรีตที่เสริมเส้นใยหลัก โดยเครื่องวัดอัตราเร็วไม่สามารถตรวจจับความเร็วของกระสุนหลังทะลุผ่านได้

4 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

การพัฒนาคอนกรีตประสิทธิภาพสูงเพื่อใช้ในการป้องกันกระสุนสามารถสรุปและเสนอแนะได้ว่า

4.1 สรุปผลวิจัย

- 1) กรณีผนังคอนกรีตหนา 5 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังสูง HSC ด้านทานแรงกระแทกจากกระสุนและดูดซับพลังงานจลน์ได้สูงที่สุด
- 2) การเสริมกำลังด้วยเส้นใยหลัก ช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถป้องกันกระสุนได้ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งผนังหนา 7.5 และ 10 เซนติเมตร รูปแบบการวิบัติของคอนกรีต SFRC จะเป็นการกระแทกที่ผิวหน้าและด้านหลังบางส่วน ซึ่งป้องกันไม่ให้เศษคอนกรีตกระเด็นไปทำอันตรายต่อผู้อื่นได้
- 3) การใช้คอนกรีต HSC และ SFRC ป้องกันกระสุนสามารถลดความหนาของผนังลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ โดยที่ประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานยังคงเท่าเดิม

ส่งผลให้ผนังมีน้ำหนักเบา สะดวกและรวดเร็วในการประยุกต์ใช้ในสนามจริง

4.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรทดลองหล่อคอนกรีตกำลังสูงผสมเส้นใยเหล็กเพื่อศึกษาประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นในประเด็นการดูดซับพลังงานจลน์

2) งานวิจัยขั้นต่อไป ควรหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อประยุกต์ใช้งานจริง ซึ่งมีปัจจัยความเหนียวและกำลังของเหล็กเส้น

5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) โครงการวิจัยทางด้านยุทธโธปกรณ์เพื่อพัฒนาศักยภาพของกองทัพและการป้องกันประเทศ ภายใต้โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษา และการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ขอขอบคุณสำนักงานวิจัยและพัฒนาการทางทหารกองทัพบกในการสนับสนุนการวิจัยในด้านต่างๆ ขอขอบคุณกรมพิเศษที่ 4 ค่ายสุรสีห์เสนา ในการให้อาคารสถานที่ทดสอบ เจ้าหน้าที่ และยุทธภัณฑ์ ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรในการเอื้อเฟื้อสถานที่ทำการวิจัยและอุปกรณ์ประกอบการวิจัย

6 เอกสารอ้างอิง

[1] รุ่งรวี เอลิมศรีภิญโญรัช และกองบรรณาธิการโรงเรียนนักข่าวชายแดนใต้. (2555). ถอดความคิดขบวนการเอกราชปาตานี. โรงเรียนนักข่าวชายแดนใต้. สืบค้นจาก: <http://www.deepsouthwatch.org/dsj/3676>

[2] Yang, H., Song, H., & Zhang, S. (2015). Experimental investigation of the behavior of aramid fiber reinforced polymer confined concrete subjected to high strain-rate compression. *Construction and Building Materials*, 95, 143-151.

[3] Alberti, M. G., Enfedaque, A., & Gálvez, J. C. (2015). Comparison between polyolefin fibre reinforced vibrated conventional concrete and self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 85, 182-194.

[4] Mertol, H. C., Baran, E., & Bello, H. J. (2015). Flexural behavior of lightly and heavily reinforced steel fiber concrete beams. *Construction and Building Materials*, 98, 185-193.

[5] Zamanzadeh, Z., Lourenço, L., & Barros, J. (2015). Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete failing in bending and in shear. *Construction and Building Materials*, 85, 195-207.

[6] Banthia, N., & Sappakittipakorn, M. (2007). Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and Concrete Research*, 37(9), 1366-1372.

[7] Tassew, S. T., & Lubell, A. S. (2014). Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete. *Construction and Building Materials*, 51, 215-224.

[8] Sukontasukkul, P., Jamnam, S., Rodsin, K., & Banthia, N. (2013). Use of rubberized concrete as a cushion layer in bulletproof fiber reinforced concrete panels. *Construction and Building Materials*, 41, 801-811.

[9] Office of Law Enforcement Standards (OLES), & United States of America. (2008). Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06.

[10] ASTM Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete. ASTM C 1116-91. (1991). West Conshohocken, PA: ASTM.

[11] ASTM Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete, ASTM A820 / A820M – 11. (1991). West Conshohocken, Pa: ASTM.

[12] ASTM Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM C33/ C33M-13, ASTM. (1991). West Conshohocken, Pa: ASTM.

[13] Medina, N. F., Barluenga, G., & Hernández-Olivares, F. (2014). Enhancement of durability of concrete composites containing natural pozzolans blended cement through the use of Polypropylene fibers. *Composites Part B: Engineering*, 61, 214-221.

[14] Bagherzadeh, R., Pakravan, H. R., Sadeghi, A. H., Latifi, M., & Merati, A. A. (2012). An investigation on adding polypropylene fibers to reinforce lightweight cement composites (LWC). *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 7(4), 13-21.

[15] Ferro, G., Tulliani, J. M., Jagdale, P., & Restuccia, L. (2014). New Concepts for Next Generation of High Performance Concretes. *Procedia Materials Science*, 3, 1760-1766.