

ผลกระทบของการจัดเรียงแนวเส้นใยที่มีต่อความแข็งแรง ของแผ่นเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากใยแก้วผ้าทอ

Effect of Fiber Alignments on the Strength of Bulletproof Armor Plates Produced from Fiberglass Fabrics

ปฐมาภรณ์ ชัยกุล^{1*} อภิพัฒน์ สกุนตนา¹ นันทวัฒน์ จันทร์เพ็ง¹ และ วีรวัฒน์ เหล่านภากุล²

Patamaporn Chaikool^{1*}, Aphiphat Sakuntanak¹, Nontawat Junpeng¹ and Teerawat Laonapakul²

Received: 16 October 2023, Revised: 9 June 2024, Accepted: 12 June 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับผลกระทบของการจัดเรียงแนวเส้นใยต่อความแข็งแรงของแผ่นเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ใยแก้วผ้าทอเป็นตัวเสริมแรงห่อหุ้มด้วยโพลีเอสเตอร์รีซิน การจัดเรียงแนวเส้นใยของแผ่นใยแก้วมีสองลักษณะคือ แบบวางเรียงซ้อนกันตามแนวเส้นใยทำมุม 0 องศา และแบบวางเรียงสลับแนวเส้นใยทำมุม 45 องศา จากการทดสอบความแข็งแรงของแผ่นเกราะเมื่อถูกแรงดึงและแรงกระแทกกระทำ พบว่า แผ่นเกราะที่วางเรียงเส้นใยแบบสลับแนวทำมุม 45 องศา มีความต้านทานต่อแรงดึงน้อยกว่าแผ่นเกราะที่วางเรียงเส้นใยแบบตามแนวทำมุม 0 องศา แต่สามารถต้านทานแรงกระแทกได้มากกว่า นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบแผ่นเกราะกับกระสุนปืนจริงขนาด .357 Magnum ระยะยิง 5 เมตร ตามมาตรฐาน NIJ (National Institute of Justice) Standard-0101.06 สำหรับเสื้อเกราะระดับ 2 และทำการทดสอบแรงปะทะที่เกิดขึ้นด้านหลังแผ่นเกราะที่เกิดจากการถูกยิง (Back Face Signature: BFS) จากการทดสอบพบว่าแผ่นเกราะที่ใช้ใยแก้วผ้าทอ 30 ชั้น ทั้งแบบวางเรียงเส้นใยตามแนวทำมุม 0 องศา และแบบวางเรียงเส้นใยสลับแนวทำมุม 45 องศา สามารถหยุดหัวกระสุนไม่ให้ทะลุผ่านได้ โดยสามารถวัดค่าเฉลี่ยการยุบตัวของดินที่เป็นวัสดุหนุนรองด้านหลังแผ่นเกราะได้เท่ากับ 8 มิลลิเมตร และ 6.33 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

คำสำคัญ: เสื้อเกราะกันกระสุน, แผ่นเกราะ, มาตรฐานเอ็นไอเจ, ใยแก้วผ้าทอ

¹ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Muang, Khon Kaen 40000, Thailand.

² สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Muang, Khon Kaen 40000, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): patamaporn.ch@rmuti.ac.th

ABSTRACT

This research aims to experimentally investigate the impact of fiber orientation on the strength of bulletproof armor made from composite materials, using fiberglass fabrics as reinforcement encased in polyester resin. The fiber orientation of the woven fiberglass sheets was arranged in two configurations: aligned at 0 degrees and alternately arranged at 45 degrees. Tensile and impact tests revealed that armor with fibers arranged at 45 degrees exhibited lower tensile strength but higher impact resistance compared to armor with fibers aligned at 0 degrees. Additionally, the armor plates were tested against .357 Magnum bullets fired from a distance of 5 meters, following the NIJ (National Institute of Justice) Standard-0101.06 for Level II body armor. The Back Face Signature (BFS) was also measured to assess the impact force on the back of the armor upon bullet impact. The results showed that the armor made from 30 layers of woven fiberglass sheets, both aligned at 0 degrees and alternately arranged at 45 degrees, successfully stopped the bullets without penetration. The average deformation depth of the backing material behind the armor was 8 mm and 6.33 mm, respectively, which is within the standard limits.

Key words: bulletproof vest, armor plate, NIJ Standard, fiberglass fabric

บทนำ

เสื้อเกราะกันกระสุนเป็นอุปกรณ์ป้องกันภัยส่วนบุคคลที่ใช้สำหรับป้องกันอันตรายที่เกิดจากกระสุนปืน ซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับเจ้าหน้าที่ทหารและตำรวจที่ปฏิบัติงานป้องกันและปราบปรามอาชญากรรม เสื้อเกราะกันกระสุนที่นิยมใช้โดยมากมักผลิตจากวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ใยแก้วเป็นวัสดุเสริมแรง เนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีความเหนียว และสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดี

มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่นำมาใช้สำหรับทำเป็นเสื้อเกราะกันกระสุน ทั้งที่ผลิตจากวัสดุคอมโพสิตที่เป็นโลหะ เซรามิกส์ โพลีเมอร์ เส้นใยสังเคราะห์ รวมถึงวัสดุจากธรรมชาติอย่างรังไหม เกล็ดปลา หรือยางพารา รวมทั้งศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันกระสุนของแผ่นเกราะ ตัวอย่างเช่น Amatariyakul and Amatariyakul (2016) พัฒนาแผ่นเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากสแตนเลสเกรด 304 และอลูมิเนียมเกรด

5083 ที่ผ่านกระบวนการอบชุบ สามารถป้องกันกระสุนปืนขนาด 9 มิลลิเมตร ที่ระยะยิง 5 เมตร และกระสุนปืน M16A1 ที่ระยะยิง 25 เมตร มีการยุบตัวของแผ่นเกราะ 5.56 มิลลิเมตร โดยเสื้อเกราะที่พัฒนาขึ้นมีน้ำหนัก 10.5 กิโลกรัม Jearanaisilawong and Phungsara (2020) ศึกษาผลของการเรียงตัวของแผ่นเกราะต่อประสิทธิภาพการกันกระสุน โดยใช้แผ่นเกราะที่ทำจากเหล็กกล้าประเภท Armox500T และทดสอบยิงด้วยกระสุนตามมาตรฐาน National Institute of Justice (NIJ) ระดับ III ผลการศึกษาพบว่าแผ่นเกราะที่ทำจากเหล็กกล้าสองชั้นมีความสามารถในการลดพลังงานการกระแทกของกระสุนได้มากกว่าเหล็กกล้าชั้นเดียวที่ความหนาเท่ากัน Saicharoen *et al.* (2022) วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนผิวเกราะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทดสอบการยิงกระสุนตามมาตรฐาน NIJ ระดับ III วัสดุที่ใช้ทำแผ่นเกราะมี 2 ชนิด คือ SKD11 และ

อะลูมิเนียม AL-7075T6 ผลจากการจำลองแสดงให้เห็นว่าความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุนที่เพิ่มขึ้นและมุมในการยิงที่มากขึ้นส่งผลให้สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้มากขึ้น Kangwantrakool (2010) ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุอะลูมินา-โครเมียม ด้วยอนุภาคเซอร์โคเนีย โดยสามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกลด้านความทนต่อการดัดโค้งและค่าความเหนียวของชิ้นงานได้ ในขณะที่การลดความหนาของวัสดุส่งผลให้ความต้านทานการเจาะทะลุลดลง ทดสอบโดยใช้อาวุธปืน M16A1 กระสุนขนาด 5.56 x 45 มิลลิเมตร ความเร็วประมาณ 900 เมตรต่อวินาที ที่ระยะยิง 15 เมตร ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ III Sungkapun (2013) ศึกษาและพัฒนาการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนจากวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์เซรามิกซ์ โดยกระบวนการหล่ออัดขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของเหลว ทำให้แผ่นเกราะมีน้ำหนักลดลง ทดสอบการยิงโดยใช้กระสุนขนาด 7.62 x 51 มิลลิเมตร และผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ ระดับ III นำไปประกอบเป็นเรือลาดตระเวนของกองทัพเรือไทย Xianglin *et al.* (2017) วิจัยเชิงทดลองเกี่ยวกับความต้านทานกระสุนของแผ่นลามิเนตโพลีเมอร์-อะลูมิเนียม โดยใช้แผ่นเกราะ 7 รูปแบบที่ผลิตจากโพลีคาร์บอเนต โพลีเมทิลเมทาคริเลต และอะลูมิเนียมอัลลอยด์ AA2024-T4 ที่ความหนาต่างกัน พบว่าความแตกต่างของวัสดุโพลีเมอร์มีผลต่อประสิทธิภาพของแผ่นลามิเนต แผ่นลามิเนตที่มีโพลีคาร์บอเนตอยู่ด้านหน้าสามารถรองรับแรงกระแทกได้ดีกว่ารูปแบบอื่น Zhu *et al.* (2024) นำเสนอเทคนิคการจับภาพเชิงดิจิทัลสามมิติเพื่อศึกษาการตอบสนองด้านหลังแผ่นเกราะกับร่างกาย ของแผ่นเกราะคอมโพสิตเซรามิกโพลีเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ (ultra-high molecular weight polyethylene) ซึ่งถูกยิงด้วยกระสุนปืนไรเฟิลขนาด 7.62 มิลลิเมตร ทำให้ทราบ

ประสิทธิภาพในการต้านทานกระสุนปืนและการบาดเจ็บจากแรงปะทะบนร่างกายด้านหลังแผ่นเกราะ Pumkaew *et al.* (2011) ออกแบบเกราะกันกระสุนโดยใช้เซรามิกส์ เส้นใย และโลหะ วางเรียงซ้อนกัน และศึกษาความหนาที่เหมาะสมของแผ่นเกราะแต่ละชั้น ทดสอบยิงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ III สามารถป้องกันกระสุนปืน M16 และ AK-47 ได้ โดยมีน้ำหนักรวมของแผ่นเกราะคือ 7 กิโลกรัม Khojimet *et al.* (2010) พัฒนาและผลิตเกราะอ่อนที่สามารถป้องกันอันตรายจากสะเก็ดระเบิดสังหารบุคคลโดยใช้เส้นใยสังเคราะห์เรียงตัวกันจำนวน 17 ชั้น เป็นชนิด TWARON FABRIC T-750 จำนวน 5 ชั้น อยู่ด้านนอก และ UHMWPE จำนวน 12 ชั้น อยู่ด้านใน ทดลองยิงด้วยกระสุนขนาด 0.22 นิ้ว น้ำหนัก 40 เกรน ที่ความเร็วปะทะเฉลี่ย 330 เมตรต่อวินาที ระยะการยิง 5 เมตร Parsapratet *et al.* (2010) ศึกษาการผลิตเสื้อเกราะกันกระสุนจากผ้าใยประดิษฐ์เพื่อนำไปใช้ผลิตในเชิงพาณิชย์ โดยผลิตเป็นแผ่นเกราะจากผ้าทอผ้าถักแนวเส้นยืน ผ้าทอ 3 มิติ และแผ่นเกราะจากผ้าไม่ทอ ซึ่งทุกตัวอย่างผ่านการทดสอบการยิงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ IIIa Sikarwar *et al.* (2014) ศึกษาผลกระทบของการวางเรียงแนวเส้นใยและความหนาของเส้นใยต่อความสามารถในการป้องกันกระสุนปืนและการดูดซับพลังงานของแผ่นเกราะที่ทำจากใยแก้วและอีพ็อกซีด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป ทดสอบโดยใช้ปืนลมและกระสุนขนาด 9.5 มิลลิเมตร มวล 7.5 กรัม พบว่าการเรียงแนวเส้นใยแบบ 0/90 มีความต้านทานต่อแรงกระแทกมากที่สุด โดยความสามารถในการป้องกันและดูดซับพลังงานจะขึ้นอยู่กับค่ามอดูลัสของยังและความเครียดของชิ้นงาน Wang *et al.* (2023) นำเสนอวิธีการปรับปรุงผ้าเส้นใยอะรามิดด้วยโพลีเอทิลีน (LDPE) และกราฟีน/โพลีเอทิลีน (GR/LDPE) ทำให้สามารถต้านทานกระสุนปืนที่มีความเร็วเพิ่มขึ้น 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับผ้า

เส้นใยอะรามิดแบบเดิม การปรับปรุงนี้ไม่ได้เปลี่ยนแปลงความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสของยังมากนัก แต่ช่วยเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างเส้นด้ายของผ้าอย่างมาก จึงทำให้สามารถต้านทานกระสุนปืนที่มีความเร็วเพิ่มขึ้นและผลิตสะเก็ดที่มีน้ำหนักเบาลง อย่างไรก็ตาม แรงเสียดทานระหว่างเส้นด้ายที่มากเกินไปอาจนำไปสู่ความเสียหายที่เร็วกว่าปกติ Prakash *et al.* (2023) ศึกษาการตอบสนองของแบบจำลองเกราะคอมโพสิตต่อกระสุนความเร็วสูงโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยใช้แผ่นเกราะที่ทำจากโบรอนคาร์ไบด์และเคฟลาร์อีพ็อกซี่ที่ถูกยึดเข้าด้วยกัน เพื่อพัฒนาแผ่นเกราะที่มีน้ำหนักเบาและสามารถต้านทานกระสุนเจาะเกราะขนาด 7.62 AP ที่ความเร็ว 1500 เมตรต่อวินาที การศึกษาพบว่าแบบจำลองคอมโพสิตสามารถดูดซับพลังงานและทนต่อแรงกระแทกสูงมากได้ Bangkokbiznews (2020) นำเสนอข่าวนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ได้พัฒนาแผ่นเกราะที่สามารถรับแรงของกระสุนปืน M16 ขนาด 5.56 มิลลิเมตร โดยผลิตจากรังไหมที่มีความยืดหยุ่น น้ำหนักเบา ต้านทานแรงกระแทกได้ดี และเพิ่มวัสดุที่สามารถรับและกระจายแรงเข้าไป พร้อมทั้งพัฒนาน้ำยาชนิดพิเศษเพื่อให้วัสดุต่าง ๆ ยึดเกาะกันมีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถหยุดกระสุนไม่ให้เฉลไปโดนอวัยวะอื่น หรือผู้อื่นที่อยู่ข้างเคียง โดยมี 2 รุ่น ได้แก่ รุ่นน้ำหนักประมาณ 2 กิโลกรัม และรุ่นน้ำหนักประมาณ 1.6 กิโลกรัม Chokchalerm and Sriseubsai (2017) พัฒนาวัสดุเชิงประกอบโพลีเอสเตอร์เรซินโดยใช้เกล็ดปลาเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับเสื้อเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ ระดับ I ผลการศึกษาพบว่าโพลีเอสเตอร์เรซินกับจำนวนชั้นของเกล็ดปลามีความสัมพันธ์กับความทนทานต่อแรงกระแทก โดยการเสริมแรงด้วยเกล็ดปลา 2 ชั้น สามารถรับแรงกระแทกได้ดีที่สุด โดยมีความหนารวมของแผ่นเกราะคือ 10 มิลลิเมตร

Jongpairajcosit *et al.* (2020) ศึกษาผลกระทบเชิงพฤติกรรมการป้องกันกระสุนโดยแผ่นยางพาราและยางพาราเสริมเส้นใยเคฟลาร์ ในลักษณะโครงสร้างวัสดุผสมแบบแซนด์วิช (Sandwich Composite Structure) ด้วยการจำลองการวิเคราะห์และวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ผลการยิงกระสุน M193 ใส่ยางหนา 30 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่ากระสุนทะลุผ่านยางไปได้โดยง่ายและก่อความเสียหายต่ออย่างมาก ในขณะที่ยางที่มีเคฟลาร์แทรกระหว่างกลาง กระสุนสามารถทะลุขึ้นงานได้โดยยางและเคฟลาร์เกิดการแยกชั้นกันอย่างชัดเจน

งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นล้วนแล้วแต่มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของเสื้อเกราะให้มีความสามารถในการต้านทานหัวกระสุนปืนลักษณะต่าง ๆ ลดความอันตรายต่อผู้สวมใส่ ลดภาระค่าน้ำหนัก รวมทั้งลดราคาค่าใช้จ่ายในการผลิต อย่างไรก็ตามก็ดีเสื้อเกราะที่ได้มาตรฐานยังมีราคาสูงเกินไปสำหรับเจ้าหน้าที่ตำรวจที่ปฏิบัติงานในเขตเมือง เนื่องจากมีการใช้วัสดุชนิดพิเศษและมีขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อน เจ้าหน้าที่ตำรวจส่วนมากในปัจจุบันจึงมักนิยมซื้อแผ่นเกราะที่ผลิตจากสแตนเลสแผ่นมาใช้งานแทน ถึงแม้แผ่นเกราะที่ผลิตจากสแตนเลสจะมีราคาถูกแต่ก็มีความเสี่ยงที่จะได้รับอันตรายหากถูกยิง เนื่องจากหัวกระสุนที่ยิงมาจะไม่ฝังลงบนแผ่นเกราะแต่อาจจะเฉลไปโดนอวัยวะส่วนอื่นของร่างกายหรือผู้ปฏิบัติงานที่อยู่ใกล้เคียงจนทำให้ได้รับบาดเจ็บ รวมไปถึงอันตรายที่เกิดจากการยุบตัวของแผ่นเกราะจนไปโดนอวัยวะสำคัญในร่างกายทำให้เกิดอาการฟกช้ำตามร่างกายของผู้สวมใส่ได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตวัสดุที่นำมาใช้เป็นแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีราคาถูก ขั้นตอนการผลิตไม่ซับซ้อน สามารถป้องกันอันตรายจากปืนพกสั้นได้ เพื่อให้เจ้าหน้าที่ตำรวจที่ปฏิบัติงาน

ในเขตเมืองมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น โดยมุ่งเน้น
ศึกษาการใช้ใยแก้วผ้าทอเป็นวัสดุเสริมแรง และ
ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของการจัดเรียงเส้นใยแก้วที่
มีต่อความแข็งแรงและความสามารถในการดูดซับ
แรงกระแทกบนแผ่นเกราะกันกระสุน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมแผ่นเกราะกันกระสุน

แผ่นเกราะกันกระสุนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผลิต
จากวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ใยแก้วผ้าทอ หรือใยผ้าสาน

เบอร์ 400 Class-E เป็นตัวเสริมแรง ซึ่งหาซื้อได้ง่าย
และนิยมใช้ในงานหล่อไฟเบอร์กลาสและงาน
ก่อสร้าง มีลักษณะคล้ายงานจักรสาน โดยเส้นใยจะ
ทำมุมต่อกัน 90 องศา ทำให้มีเส้นแนวการรับแรงได้
2 ทิศทาง ดังแสดงใน Figure 1 ในการผลิตเป็นแผ่น
เกราะ จะทำการวางแผ่นใยแก้วซ้อนกันโดยจัดเรียง
แนวเส้นใยให้มีความแตกต่างกัน 2 ลักษณะ คือ (1)
ลักษณะการวางให้เส้นใยซ้อนไปในแนวทางเดียวกัน
และ (2) ลักษณะการวางให้เส้นใยซ้อนสลับแนวทำ
มุมกัน 45 องศา ดังแสดงใน Figure 2



Figure 1 Fiberglass fabric

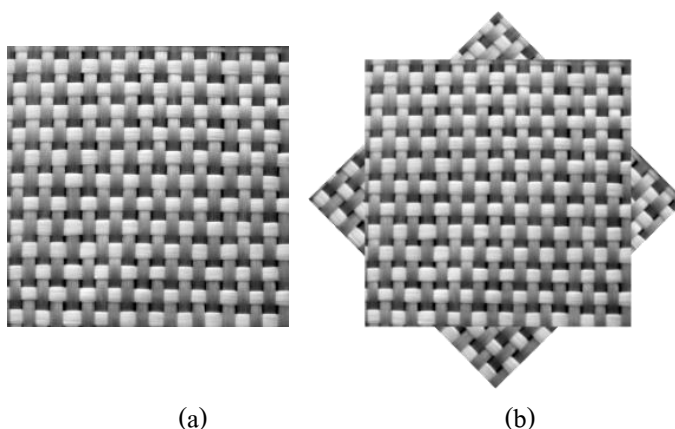


Figure 2 Fiberglass fabrics alignments (a) 0-degree (b) 45-degree

ส่วนเมทริกซ์ที่ใช้ห่อหุ้มใยแก้วเป็น โพลีเอสเตอร์เรซินสำหรับงานหล่อไฟเบอร์กลาส ของบริษัท 3M รุ่น 355e โดยหลังจากวางเรียงแผ่นใยแก้วแต่ละชั้นลงในแม่พิมพ์ จะใช้แปรงจุ่มน้ำยาเรซินที่ผสมตัวทำปฏิกิริยาแล้วทาลงบนแผ่นใยแก้วแต่ละ

แผ่นจนทั่ว แล้วใช้ลูกกลิ้งกดทับรีดให้ทั่วชิ้นงานจนได้จำนวนชั้นตามที่ต้องการ แล้วจึงปล่อยให้แห้งและนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการทดสอบต่อไป Table 1 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยแก้ว Class-E และโพลีเอสเตอร์เรซิน

Table 1 Mechanical properties of class-E fiber glass and polyester resin (Bagherpour, 2012)

	E-Glass	Polyesters resin
Density (gr/cm ³)	2.58	1.1 – 1.4
Tensile strength (at 23°C) (MPa)	3445	40 – 45
Modulus of elasticity (at 23°C) (GPa)	72.3	1.3 – 4.5
Elongation (%)	4.8	5

งานวิจัยนี้ใช้แผ่นเกราะที่มีจำนวนแผ่นใยแก้ววางเรียงซ้อนกัน ตั้งแต่ 25 ชั้น ไปจนถึง 40 ชั้น ทั้งแบบวางเส้นใยซ้อนไปในแนวทางเดียวกัน และแบบวางเส้นใยซ้อนสลับแนวทำมุมกัน 45 องศา ใน การทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของแผ่นเกราะ และทดสอบความสามารถในการป้องกัน

กระสุนปืนจริง โดยแผ่นเกราะขนาดความหนา 25 ชั้นจะใช้สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกล และแผ่นเกราะที่มีความหนา 30 35 และ 40 ชั้น จะใช้สำหรับการทดสอบยิงด้วยกระสุนปืนจริง ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Test conditions

	No. of fiber glass sheets	Equipment	Standard
Tensile strength	25	Tensile strength test	ASTM D3039
Impact strength	25	Charpy impact test	ASTM D4812
Ballistic resistance	40	.357 magnum JHP bullet, .357 magnum AP bullet, 9 mm FMJ bullet	-
Damage of armor plate	35	.357 Magnum FMJ bullets	NIJ
Backface signature	30	.357 Magnum FMJ bullets	NIJ

2. การทดสอบคุณสมบัติทางกลของแผ่นเกราะ

แผ่นเกราะกันกระสุนที่หล่อขึ้นรูปแล้วทั้ง 2 แบบ คือ แบบวางเรียงเส้นใยตามแนว และแบบวางเรียงเส้นใยสลับแนวทำมุม 45 องศา ถูกนำมาตัดเป็น

ชิ้นงานสำหรับทดสอบขนาดประมาณ 20 x 200 ตารางมิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง ต่อ 1 การทดสอบ ดังแสดงใน Figure 3 เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกล ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Strength Test)

และเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy Impact Test)

การทดสอบความแข็งแรงของแผ่นเกราะเมื่อถูกแรงค้ำมากระทำ ดำเนินการโดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM D3039 ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Strength Test) แบบไฮดรอลิกส์ ของบริษัท Dartec Ltd. รุ่น PC1653.1 น้ำหนักโหลดเซลล์สูงสุด 100 กิโลนิวตัน ดึงด้วยอัตราความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ส่วนการทดสอบความแข็งแรงของ

แผ่นเกราะเมื่อถูกแรงกระแทกมากระทำ ดำเนินการโดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM D4812 ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact Test) ของบริษัท Otto Wolpert-Werke GmbH รุ่น PW30/15K โดยจะทำการตีกระแทกชิ้นงานที่ทดสอบหนึ่งครั้งด้วยการเหวี่ยงให้หัก ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานที่ทดสอบสามารถคำนวณได้ดังสมการ (1)

$$\text{Impact strength} = \frac{\text{Impact energy}}{\text{Cross section area}} \quad (1)$$

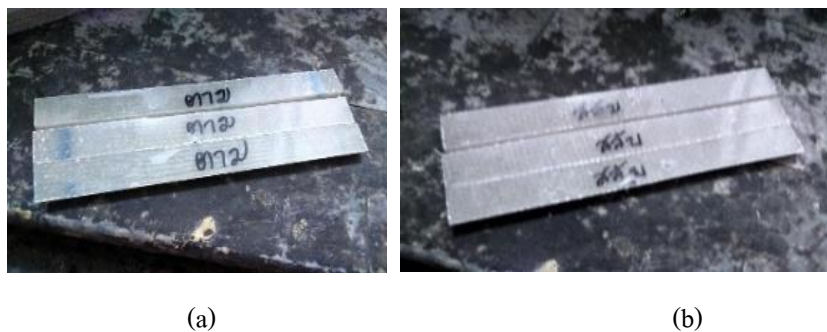


Figure 3 Specimens for tensile and impact tests (a) 0-degree alignment and (b) 45-degree alignment

3. การทดสอบโดยการยิงด้วยกระสุนปืนจริง

NIJ Standard-0101.06 (National Institute of Justice, 2008) ได้แบ่งประเภท ของเสื้อเกราะกันกระสุน ตั้งแต่ Level I จนถึง Level IV ตามความสามารถในการป้องกันกระสุนปืนชนิดต่าง ๆ แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาแผ่นเกราะสำหรับเจ้าหน้าที่ตำรวจที่ปฏิบัติงานในเขตเมือง จึงเลือกใช้กระสุนปืนสำหรับปืนพกสั้นมาใช้ในการทดสอบ ซึ่งเทียบเท่ากับมาตรฐานเสื้อเกราะ Level II ตามมาตรฐาน NIJ

Table 3 แสดงน้ำหนัก ความเร็ว และพลังงานจลน์ของหัวกระสุนสำหรับปืนพกสั้นที่พบ

ได้มากในประเทศไทย จาก Table 3 กระสุนปืนขนาด .357 Magnum มีแรงปะทะเมื่อพุ่งเข้าชนกับแผ่นเกราะมากที่สุดเมื่อเทียบกับกระสุนปืนพกสั้นชนิดอื่น ๆ เนื่องจากหัวกระสุนมีความเร็วและมีน้ำหนักมาก ในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้กระสุนปืนขนาด .357 Magnum เป็นกระสุนปืนหลักในการทดสอบแผ่นเกราะกันกระสุน นอกจากนี้ยังมีการใช้กระสุนปืนขนาด 9 มิลลิเมตร ในการทดสอบด้วยบางส่วน เนื่องจากเป็นกระสุนปืนสำหรับทดสอบเสื้อเกราะ Level II ตามมาตรฐาน NIJ ด้วยเช่นกัน แต่เป็นที่นิยมนมากกว่าขนาด .357 Magnum

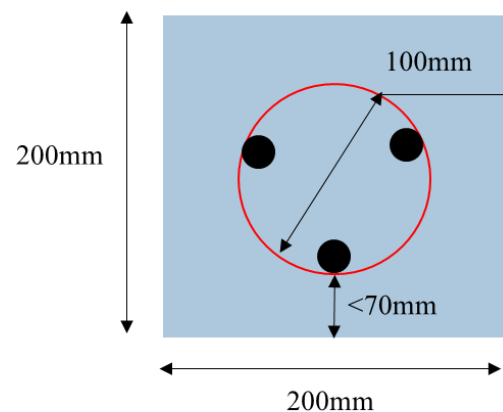
Table 3 Comparative calculation of bullet kinetic energies commonly used in urban areas (National Institute of Justice, 2008)

Bullet Type	Mass [g]	Velocity [m/s] ± 9.1 m/s	Kinetic Energy [J]
.38 Special	10.2	259	342.11
.45 ACP	14.9	302	679.47
9 mm. FMJ	8	398	633.62
.357 Magnum JSP	10.2	436	969.49

3.1 การตรวจสอบความเสียหายของแผ่นเกราะเมื่อถูกยิง

NIJ Standard-0101.06 กำหนดหลักเกณฑ์และตำแหน่งการยิงทดสอบเสื้อเกราะกันกระสุนสำหรับเสื้อเกราะ Level II ที่ระยะยิง 5 เมตร จำนวน 6 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งที่ 1-3 เป็นการยิงบริเวณขอบของแผ่นเกราะ (shot-to-edge) กระสุนแต่ละนัดมีระยะห่างจากขอบไม่เกิน 70 มิลลิเมตร ส่วนตำแหน่งที่ 4-6 เป็นการยิงบริเวณกึ่งกลางแผ่นเกราะ (shot-to-shot) โดยกลุ่มของกระสุนทั้ง 3 นัด ต้องกระจายตัวอยู่ในวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 100 มิลลิเมตร

เนื่องจากแผ่นเกราะที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 200 x 200 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งเล็กกว่าเสื้อเกราะกันกระสุนจริงตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ผู้วิจัยจึงได้กำหนดวิธีการทดสอบขึ้นใหม่โดยให้ใกล้เคียงกับมาตรฐานมากที่สุด กล่าวคือ เป็นการยิงจากระยะ 5 เมตร จำนวน 3 นัด โดยทั้ง 3 นัด ต้องอยู่ภายในวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 100 มิลลิเมตร และต้องมีอย่างน้อย 1 นัด ที่ห่างจากขอบของแผ่นเกราะไม่เกิน 70 มิลลิเมตร เพื่อให้ครอบคลุมทั้งการทดสอบแบบ shot-to-edge และ shot-to-shot ดังแสดงใน Figure 4

**Figure 4** Impact locations

3.2 การตรวจสอบแรงปะทะด้านหลังแผ่นเกราะที่ถูกยิง

แม้ว่าหัวกระสุนจะไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นเกราะได้ แต่แรงปะทะที่เกิดขึ้นด้านหลังแผ่นเกราะยังสามารถทำอันตรายต่อผู้สวมใส่เสื้อเกราะได้เช่นกัน เนื่องจากเมื่อถูกยิงด้วยกระสุนปืน เสื้อเกราะจะเกิดการยุบตัวจนกระแทกโดนอวัยวะสำคัญในร่างกาย ทำให้เกิดอาการฟกช้ำจากแรงปะทะของกระสุนปืน ซึ่งเรียกว่า บลันท์ทรอมา (Blunt Trauma)

การทดสอบหาแรงปะทะที่เกิดจากกระสุนปืนตาม NIJ Standard-0101.06 ทำได้โดยการวัดความลึกของหลุมที่เกิดบนดินเหนียวที่นำมาหุนรองด้านหลังของแผ่นเกราะ ซึ่งเรียกว่า แบ็กเฟซซิกเนเจอร์ (Backface signature: BFS) ซึ่งกำหนดไว้ว่า เสื้อเกราะที่ผ่านมาตรฐานจะต้องมีรอยยุบตัวของวัสดุหุนรอง

ด้านหลังแผ่นเกราะที่มีค่าความลึกไม่เกิน 44 มิลลิเมตร (National Institute of Justice, 2008)

ดินที่นำมาเป็นวัสดุหนุนรองด้านหลังของแผ่นเกราะในงานวิจัยนี้ เป็นดินสำหรับงานป่นซึ่งผ่านการทดสอบการยุบตัวด้วยการทิ้งลูกเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 มิลลิเมตร ± 0.05 มิลลิเมตร น้ำหนัก 1043 กรัม ± 5 กรัม จากระยะความสูง 2 เมตร และมีค่าการยุบตัวของดินเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด คือ ไม่เกิน 19 มิลลิเมตร ± 2 มิลลิเมตร

Figure 5 แสดงลักษณะการติดตั้งแผ่นเกราะเข้ากับชุดทดสอบ โดยแผ่นเกราะที่ทำจากใยแก้วผ้าทอความหนา 30 ชั้น ทั้งแบบวางเรียงตามแนว และแบบวางเรียงสลับแนวทำมุม 45 องศา จะถูกนำไปวางและยึดไว้ด้านหลังของกล่องไม้ขนาด 250 x 250 x 100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ที่ด้านในบรรจุดินที่มีค่าการยุบตัวตามมาตรฐาน จากนั้นจึงยิงทดสอบด้วยกระสุนปืนขนาด .357 Magnum FMJ ในระยะ 5 เมตร

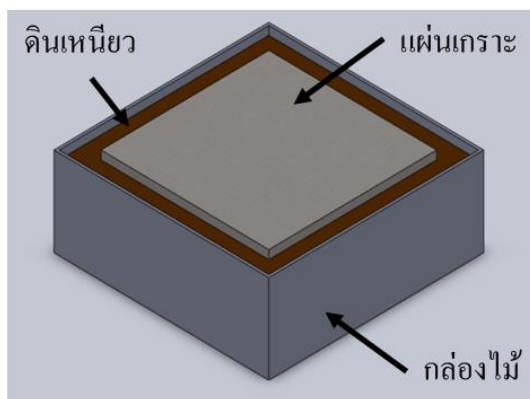


Figure 5 Installation model of armor plate and test box

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของแผ่นเกราะ

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงและเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี แสดงดัง Figure 6 และ Table 4

จากผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบเมื่อถูกแรงดึงมากระทำพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเฉลี่ยของตัวอย่างแต่ละแบบมีทิศทางไปในแนวทางเดียวกัน ดังแสดงใน Figure 6 และมีการกระจายตัวของข้อมูลค่อนข้างน้อย แสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของการเตรียมชิ้นงานในแต่ละรูปแบบ จาก Table 4 ค่าเฉลี่ยความเค้นสูงสุด (Average ultimate strength) ของชิ้นงานทดสอบแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนวและสลับแนว มีค่า 197.42 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และ 161.57 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากชิ้นงานทดสอบแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนวมีจำนวนเส้นใยที่รับแรงในทิศทางของแรงดึงที่มากกว่าชิ้นงานทดสอบแบบสลับแนว จึงมีความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่า

จากผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบเมื่อถูกแรงกระแทกมากระทำ ดังแสดงใน Table 4 พบว่าค่าต้านทานต่อแรงกระแทกเฉลี่ย (Average impact strength) ของชิ้นงานทดสอบแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนวและสลับแนว มีค่า 0.807 จูลต่อตารางมิลลิเมตร และ 0.894 จูลต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากชิ้นงานทดสอบแบบจัดเรียงเส้นใยสลับแนวมีการจัดวางแผ่นใยแก้วผ้าทอแต่ละแผ่นทำมุมต่อกัน 45 องศา ทำให้เส้นใยมีการเรียงตัวในทิศทางที่หลากหลาย จึงสามารถกระจายแรงและต้านทานแรงกระแทกได้ดีกว่า

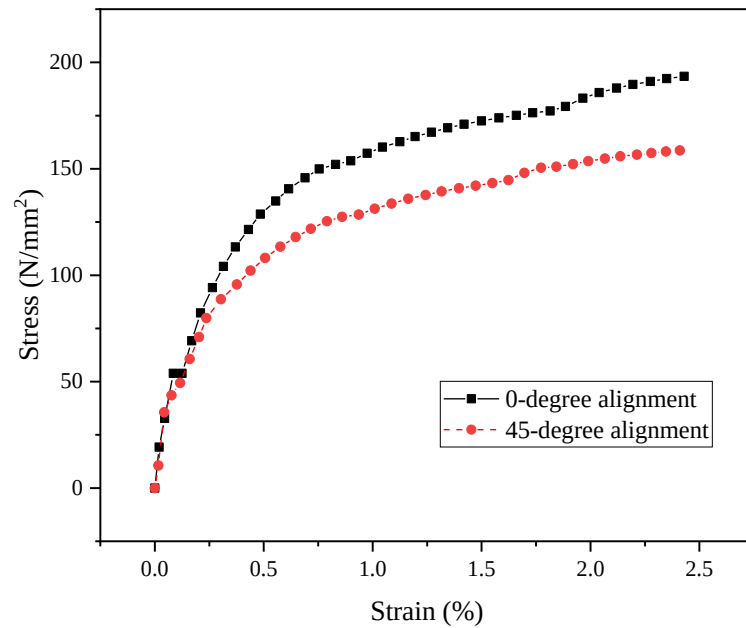


Figure 6 Relationship between average stress and strain

Table 4 Results of tensile and impact tests

		Density [g/mm ³]	Yield Strength [N/mm ²]	Ultimate Strength [N/mm ²]	Impact Strength [J/mm ²]
0-degree alignment	Average	1.60 x 10 ⁻³	53.93	197.42	0.807
	S.D.	11.55	10.89	3.07	0.005
45-degree alignment	Average	1.53 x 10 ⁻³	49.39	161.57	0.895
	S.D.	10.83	3.74	5.26	0.001

2. ความเสียหายของแผ่นเกราะเมื่อถูกยิง

Figure 7 แสดงลักษณะของแผ่นเกราะที่ผลิตจากใยแก้วผ้าทอวางเรียงซ้อนกันจำนวน 40 ชั้น ทั้งแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนว และแบบจัดเรียงเส้นใยสลับแนวทำมุม 45 องศา เมื่อถูกยิงด้วยกระสุนปืน 3 ชนิด คือ (1) กระสุนปืนขนาด .357 Magnum JHP

(กระสุนหัวรู) (2) กระสุนปืนขนาด .357 Magnum AP (กระสุนหัวแหลมหรือหัวเจาะเกราะ) และ (3) กระสุนปืนขนาด 9 มิลลิเมตร FMJ (กระสุนหัวบอล) เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถเบื้องต้นในการหยุดยั้งหัวกระสุน และสังเกตลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะเมื่อได้รับแรงปะทะจากกระสุนปืน

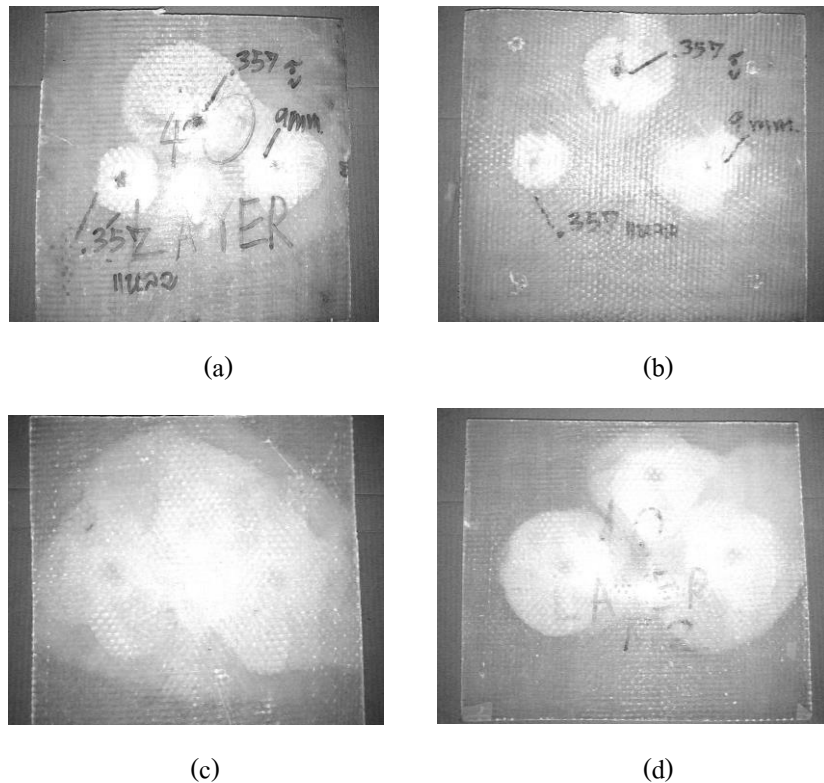


Figure 7 Characteristics of 40-layers armor plates after hit by various types of bullets (a) 0-degree alignment (front) (b) 45-degree alignment (front) (c) 0-degree alignment (back) (d) 45-degree alignment (back)

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าแผ่นเกราะที่ผลิตจากใยแก้วผ้าทอทั้ง 2 แบบ สามารถต้านทานและหยุดยั้งหัวกระสุนไม่ให้ทะลุผ่านได้ โดยหัวกระสุนทั้ง 3 นัด จมฝังอยู่ในแผ่นเกราะ และไม่มีร่องรอยการแหลมออกด้านข้าง แต่พบการแตกร่อนของเรซินที่ประสานแผ่นใยแก้วแต่ละชั้นเข้าด้วยกันบริเวณโดยรอบหัวกระสุนที่ฝังอยู่ โดยมีลักษณะเป็นวงกลมสีขาว เกิดขึ้นจากแรงปะทะของกระสุนปืนที่กระจายออกไปตามแนวเส้นใย จากการสังเกต แผ่นเกราะที่วางใยแก้วผ้าทอแบบสลับแนวทอมุม 45 องศา มีพื้นที่ที่แสดงถึงความเสียหายจากแรงปะทะที่มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับแผ่นเกราะที่ผลิตจากใยแก้วผ้าทอแบบวางเรียงตามแนวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบแรงกระแทกในหัวข้อก่อนหน้านี้ ที่พบว่าการจัดเรียงเส้นใยสลับแนวทอมุม

45 องศา สามารถรับพลังงานจากการกระแทกต่อหน่วยพื้นที่ได้ดีกว่า เนื่องจากแนวเส้นใยที่มีการเรียงตัวในทิศทางหลากหลายมากกว่า

Figure 8 แสดงแผ่นเกราะใยแก้วผ้าทอความหนา 35 ชั้น ทั้งแบบวางเรียงตามแนว และแบบวางเรียงสลับแนวทอมุม 45 องศา ที่ถูกยิงด้วยกระสุนปืนขนาด .357 Magnum FMJ ซึ่งมีราคาถูก และถูกนำมาใช้แพร่หลายกว่า ผลการทดสอบพบว่าหัวกระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นเกราะได้ และพบการเสียหายของแผ่นเกราะโดยรอบหัวกระสุน อันเนื่องมาจากแรงปะทะที่กระจายออกตามแนวเส้นใย ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 92.667 มิลลิเมตร และ 83.667 มิลลิเมตร สำหรับแผ่นเกราะแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนวและแบบจัดเรียงเส้นใยสลับแนว ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 5

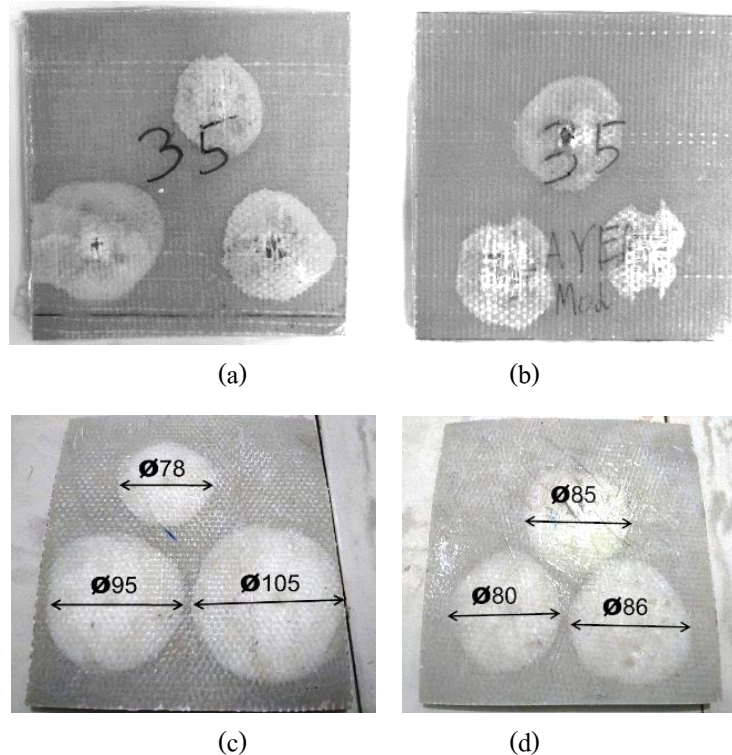


Figure 8 Characteristics of 35-layers armor plates after hit by .357 Magnum FMJ bullets (a) 0-degree alignment (front) (b) 45-degree alignment (front) (c) 0-degree alignment (back) (d) 45-degree alignment (back)

Table 5 Sizes of average damage area around the bullets

Type	Diameter [mm]			Average [mm]
0-degree alignment	78	95	105	92.667
45-degree alignment	80	85	86	83.667

3. แรงปะทะด้านหลังแผ่นเกราะที่ถูกยิง

Figure 9 แสดงผลการทดสอบรอยยุบที่เกิดขึ้นบนวัสดุหนุนรองด้านหลังแผ่นเกราะใยแก้วผ้าทอความหนา 30 ชั้น ที่ถูกยิงด้วยกระสุนปืนขนาด .357 Magnum FMJ พบว่าหัวกระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นเกราะได้ โดยสามารถวัดค่าเฉลี่ยการยุบตัวของดินที่เป็นวัสดุหนุนรองด้านหลังแผ่นเกราะได้เท่ากับ 6.33 มิลลิเมตร และ 8 มิลลิเมตร สำหรับแผ่นเกราะแบบวางเรียงเส้นใยตามแนวและแบบวางเรียงเส้นใยสลับแนว

ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 6 ซึ่งความลึกที่น้อยกว่า 44 มิลลิเมตร จัดว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ผลการทดลองนี้สอดคล้องกันกับผลการทดลองก่อนหน้านี้ที่แสดงให้เห็นว่าแผ่นเกราะแบบจัดเรียงเส้นใยสลับแนวทำมุม 45 องศา สามารถซึมซับแรงกระแทกได้ดีกว่าเนื่องจากสามารถกระจายแรงไปตามทิศทางของแนวเส้นใยที่มีการเรียงตัวในทิศทางที่หลากหลายกว่า จึงมีค่าการยุบตัวของดินด้านหลังแผ่นเกราะน้อยกว่าแผ่นเกราะแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนว



Figure 9 Indentations of backing materials behind 30-layers armor plates after hit by .357 Magnum FMJ bullets
(a) 0-degree alignment (b) 45-degree alignment

Table 6 Average indentations in the backing material

Type	Depth [mm]			Average [mm]
0-degree alignment	8	8	8	8.00
45-degree alignment	7	6	6	6.33

สรุป

จากการศึกษาผลกระทบของการจัดเรียงแนวเส้นใยที่มีต่อความแข็งแรงของแผ่นเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากการวางซ้อนกันของใยแก้วผ้าทอแล้วหล่อขึ้นรูปด้วยเรซิน โดยมีลักษณะการวางซ้อนกันของแผ่นใยแก้ว 2 ลักษณะ คือ การวางเรียงซ้อนกันตามแนวเส้นใย และการวางเส้นใยสลับแนวทำมุมกัน 45 องศา เมื่อนำตัวอย่างมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงพบว่า ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนวมีค่าเฉลี่ยความเค้นสูงสุดมากกว่าแบบจัดเรียงเส้นใยสลับแนวคิดเป็น 22.19% ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแนวการจัดเรียงเส้นใยส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงในแนวแกนของแผ่นเกราะ ซึ่งขึ้นงานทดสอบแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนวมีจำนวนเส้นใยที่รับแรงในทิศทางของแรงดึงมากกว่า จึงทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่า อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ป พบว่าขึ้นงานทดสอบแบบจัดเรียงเส้นใยสลับแนวมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเฉลี่ยมากกว่า

ขึ้นงานแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนวคิดเป็น 10.78% การจัดเรียงเส้นใยสลับแนวสามารถรับพลังงานจากการกระแทกต่อหน่วยพื้นที่ได้ดีกว่า อาจมีผลมาจากการกระจายแรงที่ดี เนื่องจากแนวเส้นใยที่มีการเรียงตัวในทิศทางหลากหลายกว่าการจัดเรียงเส้นใยตามแนว จึงทำให้มีค่าความต้านทานแรงกระแทกมากกว่า นอกจากนี้ เมื่อทำการทดสอบยิงแผ่นเกราะด้วยกระสุนปืนสำหรับมาตรฐานเสื้อเกราะ Level II พบว่าหัวกระสุนฝังอยู่ในแผ่นเกราะไม่สามารถทะลุผ่านได้ แต่พบการแตกร่อนของเรซินโดยรอบหัวกระสุนที่ฝังอยู่ซึ่งเกิดจากแรงปะทะของหัวกระสุนโดยแผ่นเกราะที่จัดเรียงแนวเส้นใยแบบสลับแนวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของความเสียหายโดยรอบหัวกระสุนเล็กกว่าแบบวางเรียงตามแนวคิดเป็น 9.71% และเมื่อพิจารณารอยยุบตัวบนวัสดุหนุนรองด้านหลังแผ่นเกราะพบว่ารอยยุบตัวเฉลี่ยของดินด้านหลังแผ่นเกราะที่วางเรียงเส้นใยแบบสลับแนวมีค่าความลึกน้อยกว่าแผ่นเกราะแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนวคิดเป็น 20.88% สอดคล้องกันกับผลการ

ทดลองก่อนหน้าที่แสดงให้เห็นว่าแผ่นเกราะแบบจัดเรียงเส้นใยสลับแนวทำมุม 45 องศา สามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่า จึงมีการยวบตัวของดินด้านหลังแผ่นเกราะน้อยกว่าแผ่นเกราะแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนว ทั้งนี้ แม้ว่าการทดสอบคุณสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึงของแผ่นเกราะ จะให้ผลการทดลองที่สอดคล้องไปในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยที่เสนอโดย Sikarwar *et al.* (2014) แต่ความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกและขนาดของความเสียหายโดยรอบหัวกระสุน ยังคงมีความขัดแย้งกันในบางประเด็น ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากวิธีดำเนินการทดลองที่แตกต่างกันและการควบคุมกระบวนการผลิตแผ่นเกราะ อย่างไรก็ดี จากผลการทดสอบ การจัดเรียงแนวเส้นใยของแผ่นใยแก้วผ้าทอส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการต้านทานแรงปะทะของแผ่นเกราะกันกระสุน การวางแผ่นใยแก้วแบบสลับแนวทำมุมกัน 45 องศา ทำให้แผ่นเกราะสามารถรองรับแรงกระทำของกระสุนปืนได้ดีขึ้น โดยแผ่นเกราะที่ผลิตจากแผ่นใยแก้วผ้าทอจำนวน 30 ชั้น เป็นแผ่นเกราะที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน เนื่องจากมีน้ำหนักไม่มากเกินไปนัก โดยแผ่นเกราะจะมีความหนาประมาณ 13 มิลลิเมตร หากผลิตเป็นแผ่นเกราะขนาด 267 x 300 ตารางมิลลิเมตร จะมีน้ำหนักประมาณ 2 กิโลกรัมต่อแผ่น และมีราคาประมาณ 2,000 บาทต่อแผ่น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยแผ่นเกราะกันกระสุนอื่น ๆ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น แผ่นเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากใยแก้วผ้าทอที่จัดวางเส้นใยสลับแนวทำมุมกัน 45 องศา นั้นมีจุดเด่นที่สำคัญคือการใช้วัสดุที่หาซื้อได้ง่าย ขั้นตอนการผลิตไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีราคาถูก น้ำหนักเบาสามารถป้องกันอันตรายจากอาวุธปืนพกสั้นตามมาตรฐาน NIJ ระดับ II รวมทั้งสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดี และไม่มีการแตกของหัวกระสุน จึงไม่ทำอันตรายต่อผู้สวมใส่และผู้ปฏิบัติงานใกล้เคียง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณสนามยิงปืนตำรวจภูธรภาค 4 ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการยิงทดสอบขอขอบพระคุณ ด.ต.วิหค รัชโพธิ์ ครูฝึกประจำสนามยิงปืนฯ ที่กรุณาอำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ตลอดการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Amatariyakul, J. and Amatariyakul, W. 2016. Analysis of the Material for Making Bulletproof Vest Armor Efficient Level II. **RMUTI Journal** 9(2): 161-176. (in Thai)
- Bagherpour, S. 2012. Fiber Reinforced Polyester Composites, pp. 135-166. *In* Saleh, H., eds. **Polyester**. IntechOpen, London.
- Bangkokbiznews. 2020. **Khon Kaen University shows a silk cocoon-based armor plate that can withstand M16 rifle bullets without penetration**. Bangkokbiznews. Available Source: <https://www.bangkokbiznews.com/tech/896119>, June 5, 2024. (in Thai)
- Chokchalerm, D. and Sriseubsai, W. 2017. Feasibility Study on The Development of Bulletproof Vest with Fish Scale by Dart Impact Method. **Ladkrabang Engineering Journal** 34(3): 9-14. (in Thai)
- Jearanaisilawong, P. and Phungsara, B. 2020. Effects of Layer Arrangements on Bullet Protection Capability of Armor Plate. **Defence Technology Academic Journal** 2(6): 56-65. (in Thai)
- Jongpairajcosit, N., Julniphitwong, A., Charoenpon, A., Lekthamrong, C., Hutacharoen, N. and Ridluan, A. 2020. The Analysis of Military

- Tire Concept using Sandwich Composite Structure made from Kevlar and Natural Rubber Using Finite Element Method and Experiment. **Defence Technology Academic Journal** 2(5): 90-99. (in Thai)
- Kangwantrakool, S. 2010. **Research Report on Improvement of Mechanical Properties of Alumina-Chromia with Zirconia Particles.** University of Technology, Nakhon Ratchasima. (in Thai)
- Khojitmet, S., Kiatprajak, J., Ruangrit, D. and Timsuwan, A. 2010. Development of Protective Body-Shield Against Explosive Fractions and Shrapnel of Small Bomb. **Journal of Engineering RMUTT** 1: 9-18. (in Thai)
- National Institute of Justice. 2008. **Ballistic Resistance of Body Armor: NIJ Standard-0101.06.** U.S. Department of Justice, Washington, DC, USA.
- Parsapratet, S. , Amornsakchai, T. , Sungnoo, S. , Suppitaksakul, C. , Kwankhao, B. and Chaiyalak, C. 2010. A Study of Producing Bullet Proof Vest from Man Made Fiber for Commercial Purposes. **Journal of Engineering RMUTT** 1: 19-27. (in Thai)
- Prakash, A., Fasil, M. and Anandavalli, N. 2023. Ballistic performance of optimized light weight composite armour. **Forces in Mechanics** 12: 100216.
- Pumkaew, M., Srikunwong, C. and Watanasriyakul, S. 2011. Development of Ceramic/ Fabric/ Metal Composite Armor System, AEC14, pp. nd. *In The 25th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand.* Thai Society of Mechanical Engineers, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Saicharoen, A., Tinprabath, P. and Chartpuk, P. 2022. Parameter Analysis that Affects the Ability to Resistance Penetration of Ammunition on the Aluminum Armor Surface Using Finite Element Method. **RMUTP Research Journal** 16(1): 177-191. (in Thai)
- Sikarwar, R.S., Velmurugan, R. and Gupta, N.K. 2014. Influence of fiber orientation and thickness on the response of glass/epoxy composites subjected to impact loading. **Composites Part B: Engineering** 60: 627-636.
- Sungkapun, T. 2013. Development and production of armor from aluminum matrix composite. Master Thesis of Engineering, Prince of Songkla University. (in Thai)
- Wang, Z., Zhang, H., Dong, Y., Zhou, H. and Huang, G. 2023. Ballistic performance and protection mechanism of aramid fabric modified with polyethylene and graphene. **International Journal of Mechanical Sciences** 237: 107772.
- Xianglin, H., Wei, Z., Yunfei, D. and Xiongwen, J. 2017. Experimental investigation on the ballistic resistance of polymer-aluminum laminated plates. **International Journal of Impact Engineering** 113: 212-221.
- Zhu, Y., Ma, J., Fan, Z., Wen, Y., Xu, C. and Xia, M. 2024. Ballistic impact performance and blunt injury assessment of ceramic/UHMWPE laminate composite body armor. **Journal of Materials Research and Technology** 29: 1703-1728.