

อิทธิพลของความหนาวัสดุด้านการแทงจากเส้นใยพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งที่มีต่อความลึกกรอยแทง

Impact of Anti-stabbing Material Thickness from Ultra-high Molecular Weight Polyethylene Fabric on Penetration Depth

ศศิริดี จันทลี¹ ปกรณ์ จันทะยาสาคร² และ ไชยยันต์ ไชยยะ^{1*}

Sasiradee Jantasee¹ Pakorn Chantayasakorn² and Chaiyan Chaiya^{1*}

Received: 22 April 2023, Revised: 26 July 2023, Accepted: 3 August 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถด้านการแทงของเส้นใยพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่ง (Ultra-high molecular weight polyethylene; UHMWPE) ที่ถูกขึ้นรูปเป็นแผ่นบางด้วยกระบวนการอัดร้อน (Hot compression molding) โดยมีเทอร์โมพลาสติกเรซินเป็นตัวประสาน ซึ่งมีชื่อเรียกในงานวิจัยนี้คือ “UPE” แผ่นด้านการแทงที่เตรียมได้จะถูกนำมาประกบกันหลายแผ่นจนมีความหนาหลายระดับตามที่กำหนดไว้ ก่อนนำไปทดสอบความต้านการแทงตามมาตรฐาน National Institute of Justice (NIJ)-0115.00 ด้วยใบมีด 2 ชนิด ได้แก่ ใบมีด 1 ซม. ซึ่งเป็นใบมีดขนาดเล็ก และใบมีด 2 ซม. หรือมีดคอมมานโด ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าใบมีด 1 ซม. มีดทั้ง 2 ชนิดมีชื่อเรียกตามมาตรฐาน NIJ คือ P1 และ S1 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลพบว่าแผ่น UPE มีค่าความความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าความต้านทานการฉีกขาดเท่ากับ 162.50 MPa และ 360.74 N/mm ตามลำดับ โดย UPE ที่เรียงตัวจำนวน 20 แผ่น หรือความหนา 4.8 mm เป็นความหนาขั้นต่ำสุดที่สามารถต้านการแทงที่ระดับพลังงาน E1 (Energy level 1) ได้ทั้งจากใบมีดชนิด P1 และ S1 โดยที่ระดับพลังงาน E1 มีค่าพลังงานเท่ากับ 24 ± 0.50 J เป็นระดับพลังงานแรกที่ใช้ในการทดสอบการต้านการแทงตามมาตรฐาน NIJ ดังนั้น UPE ที่เรียงตัวจำนวน 20 แผ่น จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุด้านการแทง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุด้านการแทงจากงานวิจัยอื่นพบว่าที่ระยะความลึกกรอยแทงเท่ากัน UPE มีความหนาและความหนาแน่นเชิงพื้นที่ต่ำกว่าวัสดุจาก

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

¹ Department of Chemical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong Luang, Pathum Thani 12110, Thailand.

² บริษัท แกรนด์ พาราгон จำกัด เขตพญาไท กรุงเทพมหานคร 10400

² Grand Paragon Company Limited, Phaya Thai, Bangkok 10400, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): chaiyan_c@rmutt.ac.th

งานวิจัยอื่น แสดงให้เห็นว่า UPE มีความเบาและบางกว่าวัสดุด้านการแทงจากงานวิจัยอื่น ซึ่งความเบาและบางถือเป็นจุดเด่นที่สำคัญของ UPE ในการพัฒนาเป็นชุดเกราะด้านการแทง

คำสำคัญ: วัสดุด้านการแทง, พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่ง, การอัดรีด

ABSTRACT

The purpose of this research is to investigate the stab-resistant performance of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fabric molded into a sheet using a hot compression molding process with a thermoplastic resin, referred to as "UPE" in this study. The stab-resistant sheets were layered to the various specified thickness and tested for stab resistance performance using two types of blades: P1, a typical small knife, and S1, a commando-style blade or larger kitchen knife, following the National Institute of Justice (NIJ)-0115.00 standard. Mechanical properties characterizations revealed that the UPE sheet had maximum tensile and tear strengths of 162.50 MPa and 360.74 N/mm, respectively. The minimal thickness that could withstand stabs at E1 (Energy level 1) for both P1 and S1 type blades was 20 layers of UPE, or thickness of 4.8 mm. The E1 is the first energy level of the NIJ stab resistance testing, with an energy of 24 ± 0.50 J. Thus, it is appropriate for use as a stab-resistant material. When UPE was compared to other stab-resistant materials studied, it was discovered that the UPE had lower thickness and areal density than other materials at the same penetration depth. This indicates that the UPE was lighter and thinner than other materials. The light weight and thinness of UPE are significant factors in its development into stab-resistant armor.

Key words: anti-stabbing material, ultra-high molecular weight polyethylene, hot compression molding

บทนำ

วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุด้านการแทง (Anti-stabbing material) มักเป็นวัสดุที่มีความเหนียว และมีความแข็งแรงสูง เช่น เส้นใยปะชอลท์ (Basalt fabric) และเส้นใยโลหะ (Metal fabric) (Tien *et al.*, 2011) ในการพัฒนาวัสดุเพื่อใช้เป็นเสื้อเกราะด้านการแทงนั้นนอกจากจะพิจารณาถึงความสามารถในการด้านการแทงของวัสดุแล้ว ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยสำคัญอีก 2 ปัจจัย ได้แก่ ความยืดหยุ่นและมวลของวัสดุ เนื่องจากวัสดุด้านการแทงเหล่านี้จะต้องถูกนำไปประกอบกับโครงเสื้อเกราะอ่อน ดังนั้นความ

ยืดหยุ่นและมวลที่เหมาะสมจะส่งผลต่อความสะดวกสบายในการสวมใส่ แม้ว่าเส้นใยปะชอลท์และเส้นใยโลหะจะสามารถด้านการแทงได้ดี แต่วัสดุเหล่านี้มีมวลค่อนข้างมากและมีความยืดหยุ่นน้อยทำให้ผู้สวมใส่เคลื่อนไหวลำบากและเกิดความเมื่อยล้าเมื่อสวมใส่เป็นเวลานาน ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาวัสดุเส้นใยชนิดอื่นที่มีน้ำหนักเบากว่าสำหรับใช้เป็นวัสดุป้องกันกระสุนและวัสดุด้านการแทงจากมีดหรือของมีคม อาทิเช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) (Yashiro *et al.*, 2014) เส้นใยแก้ว (Glass fiber) (Chen *et al.*, 2021) และเส้นใยอะรามิด (Aramid

fiber) (Huh *et al.*, 2010; Sapozhnikov *et al.*, 2015) หรือที่รู้จักในชื่อทางการค้าว่า เคฟลา (Kevlar®) วัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติทนต่อการขีดข่วนและแรงกระแทกได้เป็นอย่างดี มีความสามารถในการดูดซับแรงสูง ทนต่อความร้อน และมีน้ำหนักเบากว่าเส้นใยโลหะและเส้นใยอะรามิด จึงทำให้วัสดุเหล่านี้ได้รับการศึกษาในวงกว้าง มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำเส้นใยดังกล่าวมาขึ้นรูปร่วมกับเส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นด้าย แล้วทอเป็นผ้าเพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นและเกิดความสบายเวลาการสวมใส่มากขึ้น Huh *et al.* (2010) ได้นำเส้นใยอะรามิดมาขึ้นรูปเป็นเส้นด้ายร่วมกับเส้นใยฝ้าย จากนั้นทอเป็นผืนผ้าสำหรับตัดเย็บเป็นชุดเกราะอ่อน ซึ่งผลการทดสอบการแทงแสดงให้เห็นว่าผ้าทอผสมระหว่างเส้นใยอะรามิดและฝ้ายสามารถต้านการแทงได้ที่ระดับพลังงาน E1 ตามมาตรฐาน NIJ-0115.00 (Nayak *et al.*, 2018) แม้ว่าวัสดุคอมโพสิตเส้นใยอะรามิดจะสามารถต้านการแทงได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็ยังมีมวลและความหนาค่อนข้างมาก เนื่องจากความสามารถในการรับแรงกระแทกของเส้นใยอะรามิดแปรผันตรงตามความหนาของวัสดุ (Pundhir *et al.*, 2021) นอกจากนี้ในการผลิตวัสดุคอมโพสิตเส้นใยอะรามิดต้องผ่านกระบวนการทางสิ่งทอหลายขั้นตอน รวมทั้งเส้นใยอะรามิดถือเป็นวัสดุทางการค้าที่ถูกควบคุมด้วยสิทธิบัตรที่แตกต่างกันในแต่ละประเทศ ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตเสื้อเกราะอ่อนผันแปรไปตามต้นทุนของเส้นใยอะรามิดด้วย จึงทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดอื่นเป็นวัสดุต้านการแทงโดยมุ่งเน้นวัสดุที่มีราคาถูกกว่าและไม่มีสิทธิทางการค้าคุ้มครอง Guo *et al.* (2020) ได้นำพอลิเมอร์เกรดการค้า 5 ชนิด ได้แก่ พอลิเอไมด์ 6 พอลิเอไมด์ 11 พอลิเอไมด์ 12 พอลิคาร์บอเนต และพอลิเอทิลีน มาทดสอบความต้านการแทงตามมาตรฐาน NIJ การทดสอบพบว่าความหนาขั้นต่ำสุดของพอลิเมอร์

แต่ละชนิดที่สามารถต้านการแทงด้วยใบมีดแบบ 1 มม ที่ระดับพลังงาน 24 J ได้ คือ 7.61 5.64 6.12 5.54 และ 10.13 mm ตามลำดับ พอลิเมอร์ทั้ง 5 ชนิดนี้มีค่า Rockwell R hardness (HRR) เท่ากับ 110.3 122.1 97.3 126.6 และ 70.0 ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Young's modulus) ของพอลิเมอร์ทั้ง 5 ชนิดนี้มีค่าเท่ากับ 900 1,300 1,280 2,400 และ 650 MPa ตามลำดับ จะเห็นว่าพอลิคาร์บอเนตมีประสิทธิภาพต้านการแทงได้ดีที่สุดในงานวิจัยนี้เนื่องจากมีความแข็งแรงมาก ส่วนพอลิเอทิลีนมีประสิทธิภาพต้านการแทงน้อยที่สุด โดยต้องใช้ความหนาเป็น 2 เท่าของพอลิคาร์บอเนตจึงจะมีประสิทธิภาพต้านการแทงเท่ากัน แม้ว่าพอลิคาร์บอเนตจะมีประสิทธิภาพต้านการแทงดีที่สุดแต่สามารถโค้งงอได้น้อยเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีน ทำให้บังคับได้ยาก ขาดความยืดหยุ่น จึงไม่เหมาะสมที่จะพัฒนาเป็นวัสดุต้านการแทงในเสื้อเกราะเพราะจะทำให้ผู้สวมใส่เคลื่อนไหวไม่สะดวก

เส้นใยพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงยิ่ง หรือเส้นใย UHMWPE เป็นอีกหนึ่งวัสดุที่ได้รับการสนใจนำมาพัฒนาเป็นวัสดุกันกระสุนและของมีคม เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง มีค่าความเหนียวต่อการแตกหัก (Fracture toughness) สูงถึง 30 kJ/m² (Zaribaf, 2018) สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดี มีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูง จาก Table 1 จะเห็นว่าเส้นใย UHMWPE มีความหนาแน่น 0.97 g/cm³ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเส้นใยชนิดอื่น ๆ ในขณะที่เส้นใยอะรามิดมีความหนาแน่น 1.44-1.47 g/cm³ หากพิจารณาที่ปริมาตรของเส้นใยที่เท่ากัน เส้นใย UHMWPE มีมวลเบากว่าเส้นใยชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้เส้นใย UHMWPE มีความยืดหยุ่นมากกว่าเส้นใยอะรามิด เส้นใยอะรามิด เส้นใยแก้ว เส้นใยพอลิเอไมด์ และโลหะ (Bogetti *et al.*, 2017) เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใย UHMWPE มีลักษณะการเชื่อมสานกันอย่างหลวม ๆ ทำให้โครงสร้างสามารถเคลื่อนตัวได้

เมื่อได้รับแรงกระทำ (Pundhir *et al.*, 2021) และเมื่อเทียบความแข็งแรงของเส้นใย UHMWPE กับเส้นใยอะรามิด พบว่าเส้นใย UHMWPE มีความแข็งแรงสูงกว่า ทำให้เส้นใย UHMWPE สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดีกว่า (Sapozhnikov *et al.*, 2015) แม้ว่าเส้นใย UHMWPE จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าเส้นใยคาร์บอนและเส้นใย Poly(p-phenylene benzobisox-azole) หรือ PBO แต่เส้นใย UHMWPE

มีค่าความเครียดที่ทำให้เสื่อมสภาพ (Failure strain) มากกว่าเส้นใยคาร์บอนเส้นใย PBO และเส้นใยอะรามิด ดังนั้นภายใต้สภาวะเดียวกันเส้นใย UHMWPE สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าเส้นใยคาร์บอนเส้นใย PBO และเส้นใยอะรามิด นอกจากนี้เส้นใย UHMWPE มีความต้านทานการกัดกร่อนและความต้านทานการย่อยสลายสูงกว่าเส้นใย PBO (Chen *et al.*, 2021)

Table 1 Mechanical properties of various commercial fibers

Fiber	Density (g/cm ³)	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (GPa)	Failure strain (%)	Ref.
Basalt	2.56-2.66	53-62	1.6-2.0	2.7-3.6	(Deák and Czigány, 2009)
Aramid					
Kevlar 149	1.47	185	3.4	2.0	(Afshari <i>et al.</i> , 2008)
Twaron [®] 709	1.44	100	2.5	-	(Sapozhnikov <i>et al.</i> , 2015)
Carbon					
Toray M60J	1.93	588	3.9	2.0	(O'Masta <i>et al.</i> , 2014)
Glass					
S2	2.46	87	4.6	5.3	(O'Masta <i>et al.</i> , 2014)
PBO					
Zylon HM	1.56	270	5.8	2.5	(Afshari <i>et al.</i> , 2008)
Polyamide					
Nylon	1.14	10	0.9	9.5-28	(O'Masta <i>et al.</i> , 2014)
UHMWPE					
Dyneema [®] SK76	0.97	116	3.6	3.7	(Afshari <i>et al.</i> , 2008)
Dyneema [®] HB80	0.97	200	2.8	-	(Sapozhnikov <i>et al.</i> , 2015)
Spectra 3000	0.97	115-122	3.2-3.4	3.3	(O'Masta <i>et al.</i> , 2014)

นอกจากคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุแล้ว วิธีการขึ้นรูปเส้นใยเป็นแผ่นด้านการแทงก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณา การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดร้อนเป็นกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ภายใต้การให้อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม โดยทั่วไปแล้วการขึ้นรูปแบบอัดร้อนใช้เวลาในการดำเนินการน้อยกว่าการขึ้นรูปด้วยวิธีอื่น เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) และการเป่าขึ้นรูป (Extrusion blow molding) ซึ่งช่วยลดระยะเวลาที่พอลิเมอร์สัมผัสกับอุณหภูมิสูง จึงลดโอกาสของการเสื่อมสภาพของวัสดุเนื่องจากความร้อนได้ นอกจากนี้การใช้ความร้อนและแรงดันสูงในการขึ้นรูปแบบอัดร้อนช่วยเพิ่มความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์มีคุณสมบัติเชิงกลดีขึ้น เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถจัดระเบียบตัวเองเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบระหว่างกระบวนการอัดร้อนนำไปสู่ระดับของผลึกที่สูงขึ้น และการใช้แรงดันสูงในกระบวนการอัดขึ้นรูปทำให้โครงสร้างของพอลิเมอร์แน่นขึ้นช่วยลดจำนวนช่องว่างในโครงสร้างพอลิเมอร์ได้ (Li *et al.*, 2023; Mejia *et al.*, 2021; Shamloo *et al.*, 2018) ดังนั้นการนำเส้นใย UHMWPE มาเรียงตัวแล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดร้อนโดยใช้เทอร์โมพลาสติกเรซินเป็นตัวเชื่อมประสานจึงเป็นวิธีที่ขึ้นรูปได้อย่างรวดเร็ว และได้แผ่นวัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี จากงานวิจัยของ Mudzi *et al.* (2022) ได้นำเส้นใย UHMWPE มาขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดร้อนสำหรับใช้เป็นวัสดุกันกระสุน พบว่าวัสดุดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการต้านกระสุนปืนขนาด 0.357 ที่ความเร็ว 435.9 ± 9 m/s ได้โดยที่วัสดุไม่เสียสภาพและยังคงความยืดหยุ่นไว้ได้ ซึ่งแนวทางของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาวัสดุด้านการแทงโดยคำนึงถึงประสิทธิภาพการต้านการแทงตามมาตรฐานของ NIJ วัสดุสามารถผลิตได้ง่าย มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ในท้องตลาด โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาประสิทธิภาพด้านการแทง

ของแผ่น UPE ที่ถูกขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดร้อนตามมาตรฐาน NIJ-0115.00 ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบวัสดุด้านการแทงที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล และศึกษาผลของความหนาของแผ่น UPE ต่อความถี่รอยแตก ชนิดของใบมีดที่มีผลต่อความถี่รอยแตก รวมถึงเปรียบเทียบมวลของวัสดุกับวัสดุจากงานวิจัยอื่น และเปรียบเทียบราคากับผลิตในท้องตลาด เพื่อประเมินศักยภาพสำหรับการนำไปต่อยอดผลิตเป็นวัสดุด้านการแทงเชิงพาณิชย์ได้ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุด้านการแทงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท แกรนด์ พารากอน จำกัด มีชื่อเรียกในงานวิจัยนี้คือ UPE เป็นวัสดุที่ผลิตจากการนำเส้นใยพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงยิ่ง ขนาดโมเลกุล 5.5×10^6 amu มาขึ้นรูปเป็นแผ่นบางด้วยวิธีการอัดร้อน โดยแผ่น UPE 1 แผ่น มีมวล 170 g/m^2 และความหนา 0.21 mm วัสดุด้านการแทงที่ความหนาต่าง ๆ ถูกเตรียมขึ้นโดยการนำแผ่น UPE มาเรียงซ้อนกันจำนวน 15 แผ่น 20 แผ่น 25 แผ่น และ 30 แผ่นตามลำดับ โดยเรียงซ้อนกันแบบไม่มีสารเคลือบยึดติดกาวให้แต่ละแผ่นเรียงชิดกันด้วยมวลคงที่เพื่อให้ช่องว่างระหว่างแผ่นที่วางซ้อนกันมีระยะเท่ากันในการเตรียมแต่ละครั้ง ในงานวิจัยนี้ใช้สัญลักษณ์ของวัสดุด้านการแทงที่ความหนาต่าง ๆ คือ UPE-(X) โดยที่ X คือ จำนวนแผ่น UPE ที่เรียงซ้อนกัน หลังจากนั้นตัดวัสดุด้านการแทงให้มีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ $20 \times 20 \text{ cm}$ รูปตัวอย่างของ UPE แสดงดัง Figure 1(A)

การทดสอบประสิทธิภาพความต้านการแทงตามมาตรฐาน NIJ-0115.00 ทำการทดสอบโดยใช้ใบมีด 2 ชนิด ได้แก่ ใบมีดแบบคมเดี่ยว (P1) และใบมีดแบบสองคม (S1) ใบมีดทั้ง 2 ชนิดมีความยาวใบมีด 10 cm หนา 0.2 และ 0.4 cm ตามลำดับ ดังแสดง

ตาม Figure 1(B) นอกจากนี้การทดสอบต้องมีการใช้วัสดุรองหลัง (Backing materials) ซึ่งทำหน้าที่เสมือนผิวหนังของมนุษย์ โดยตามมาตรฐาน NIJ นั้นวัสดุรองหลังประกอบไปด้วยวัสดุ 3 ชนิด เรียงตัวกันตามลำดับดังนี้ ชั้นบนสุดใช้วัสดุเป็นแผ่นฟองน้ำนีโอพรีน (Neoprene sponge) ความหนาไม่น้อยกว่า 5.8 mm

จำนวน 4 ชั้น ระหว่างชั้นของฟองน้ำนีโอพรีนรองด้วยแผ่นอะลูมิเนียม ชั้นกลางใช้วัสดุเป็นพอลิเอทิลีนโฟม (Polyethylene foam) ความหนาไม่น้อยกว่า 31 mm จำนวน 1 ชั้น และชั้นล่างสุดใช้วัสดุเป็นแผ่นยางธรรมชาติ ความหนาไม่น้อยกว่า 6.4 mm จำนวน 2 ชั้น ดังแสดงใน Figure 2

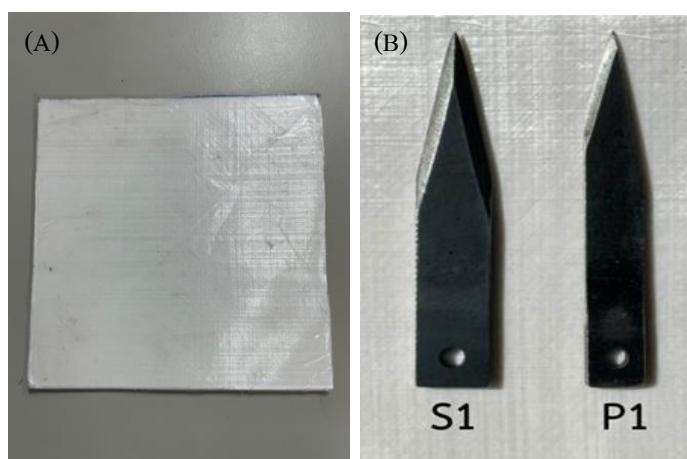


Figure 1 (A) Anti-stabbing material UPE. (B) Types of blades

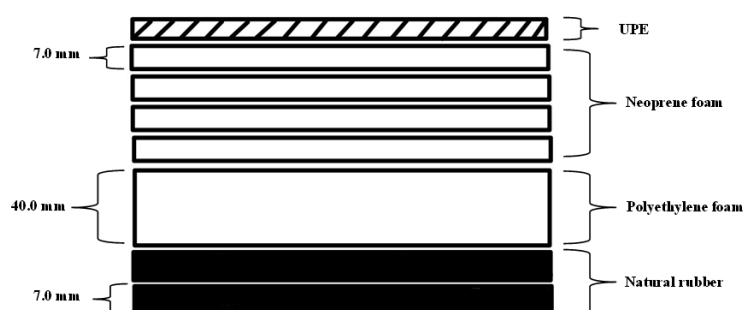


Figure 2 Backing materials

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของ UPE

วัสดุด้านการแทง UPE-(1) ถูกวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลประกอบด้วยการวิเคราะห์ความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV แผ่น UPE-(1) ถูกนำมาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ตามขนาดมาตรฐาน ASTM D638 Type IV ในการทดสอบใช้อัตราการดึงตัวอย่าง 50 mm/min ใช้โหลดเซลล์ (Load

cell) ขนาด 10 kN และการวิเคราะห์ความต้านทานการฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D1004 ด้วยอัตราการดึง 50 mm/min โดยการดำเนินการทดสอบอยู่ในสภาวะอุณหภูมิ $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ และร้อยละความชื้นที่ 50 ± 2 นอกจากนี้วัสดุด้านการแทงทั้งหมดถูกนำไปวัดหาความหนา มวล และคำนวณมวลต่อหน่วยพื้นที่

3. การทดสอบความต้านการแทง

แผ่น UPE ที่ถูกเตรียมขึ้นทั้ง 4 แบบ ได้แก่ UPE-(15) UPE-(20) UPE-(25) UPE-(30) ถูกนำมาทดสอบความต้านการแทงเพื่อหาจำนวนชั้นที่เหมาะสม โดยใช้ชุดทดสอบการแทงดัง Figure 3 ซึ่งเป็นการแทงแบบปล่อยอิสระ (Drop test) ปล่อยให้ใบมีดตกกระทบกับแผ่น UPE ตามแรงโน้มถ่วงของโลก ใบมีดจะถูกติดตั้งพร้อมกับมวลถ่วงน้ำหนัก (Drop mass) ขนาด 5 kg การปล่อยใบมีดให้ตกลงมาตามแรงโน้มถ่วงของโลกนั้นจะปล่อยลงมาภายในท่อปล่อย (Drop tube) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดของมวลถ่วงน้ำหนักเพียงเล็กน้อยเพื่อให้มวลถ่วงน้ำหนัก สามารถเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วงของโลกได้ ในการทดลองนี้ ใบมีดจะถูกปล่อยลงมาจากชุดทดสอบที่ระยะความสูง 0.49 m ทำมุมตั้งฉาก 90° กับวัสดุด้านการแทง เมื่อคำนวณโดยใช้สมการพลังงานศักย์ ดังสมการที่ (1) จะเกิดค่าพลังงานเท่ากับ 24 ± 0.50 J ตามข้อกำหนดของระดับพลังงาน E1 หรือ Energy level 1 ซึ่งมีค่าพลังงานเท่ากับ 24 ± 0.50 J ตามมาตรฐาน NIJ-0115.00 (Olszewska *et al.*, 2013)

$$E_p = mgh \quad (1)$$

โดยที่ E_p คือ ค่าพลังงานศักย์ หน่วยเป็น J
 m คือ มวลใบมีดจะถูกติดตั้งพร้อมกับมวลถ่วงน้ำหนัก หน่วยเป็น kg
 g คือ ความเร่งตามแรงโน้มถ่วงโลก มีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2
 h คือ ระยะความสูงแนวตั้งที่ปล่อยใบมีดลงมา หน่วยเป็น m

แผ่น UPE ที่ได้รับการทดสอบจะต้องพิจารณา 2 ประเด็น คือ 1) ต้องสามารถต้านทานไม่ให้ใบมีด P1 และ S1 ทะลุผ่านด้านหลังของวัสดุด้านการแทงจน

สัมผัสกับวัสดุรองหลังได้ และ 2) ถ้าใบมีดทั้ง 2 ชนิด มีการทะลุผ่านด้านหน้าแต่ไม่ทะลุผ่านด้านหลังของวัสดุด้านการแทง จะต้องทะลุเข้าไปไม่เกิน 7 mm จึงจะถือว่าผ่านมาตรฐาน

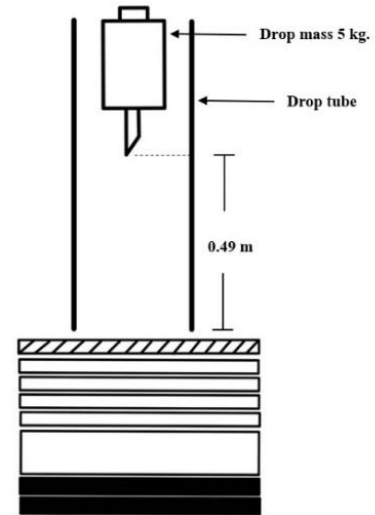


Figure 3 Stab-resistant testing setup

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. คุณสมบัติเชิงกลของ UPE

UPE-(1) ถูกนำมาทดสอบความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานการฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV และ ASTM D1004 ตามลำดับ ผลจากการทดสอบพบว่า UPE-(1) มีค่าต้านทานแรงดึงสูงสุด และความต้านทานการฉีกขาดเท่ากับ 162.50 MPa และ 360.74 N/mm ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 2

UPE-(1) มีค่าความความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 162.50 MPa ซึ่งมีความทนต่อแรงดึงในทิศทางเดียวมากกว่าเส้นใยพอลิเมอร์เกรดการค้าที่เคยมีการศึกษาสำหรับใช้เป็นวัสดุด้านการแทง ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิคาร์บอเนต และพอลิเอไมด์ 11 ซึ่งขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดร้อนเช่นเดียวกัน แต่มีค่าความความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพียง 2.1 43.7 และ 17.6 MPa ตามลำดับ (Guo *et al.*, 2020) นอกจากนี้ความ

ต้านทานการฉีกขาดของ UPE-(1) มีค่าเท่ากับ 360.74 N/mm ซึ่งมีค่าสูงกว่าเส้นใยโพลิเอทิลีนที่คอตตอนและเส้นใยโพลิเอทิลีนสเตนเลสที่คอตตอน งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้นำมาใช้เป็นวัสดุด้านการแทง มีค่าความต้านทานการฉีกขาดประมาณ 100-200

N/mm แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานการฉีกขาดของ UPE-(1) มีค่าน้อยกว่าเส้นใยโพลิเอทิลีนที่คอตตอนที่มีค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงถึง 1,200 N/mm (Tien *et al.*, 2011)

Table 2 Mechanical properties of UPE

Material	Tensile strengths (MPa)	Tear strengths (N/mm)
UPE-(1)	162.50 (29.42)	360.74 (38.10)

Table 3 Results of Stab-resistant testing by P1 and S1 blade.

Materials	Thickness (mm)	Blade types	Front penetration	Back penetration	Penetration depth (mm)	NIJ standard
UPE-(15)	3.80	P1	yes	No	3.70 (0.00)	Pass
		S1	yes	Yes	> 7.00	Fail
UPE-(20)	4.80	P1	yes	No	4.35 (0.05)	Pass
		S1	yes	No	4.00 (0.10)	Pass
UPE-(25)	5.80	P1	yes	No	5.20 (0.10)	Pass
		S1	yes	No	4.65 (0.05)	Pass
UPE-(30)	6.80	P1	yes	No	6.10 (0.00)	Pass
		S1	yes	No	5.10 (0.06)	Pass

2. ความสัมพันธ์ของจำนวนแผ่น UPE กับความลึกรอยแทง

การทดสอบความต้านทานการแทงของ UPE ถูกดำเนินการในห้องปฏิบัติการที่สภาวะอุณหภูมิห้อง 32°C ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ 47% โดยการปล่อยใบมีดที่ติดตั้งอยู่กับมวลถ่วงน้ำหนัก 5 kg จากกระยะความสูง 0.49 m ให้ตกกระทบวัสดุด้านการแทงอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วงของโลก ความเร็วก่อนการตกกระทบของใบมีด สามารถคำนวณได้จากสมการพลังงานจลน์ ดังสมการที่ (2) (Guo *et al.*, 2020) พบว่าความเร็วของใบมีดก่อนกระทบวัสดุด้านการแทงมีค่าเท่ากับ 3.10 m/s

$$E_k = \frac{1}{2} mU^2 \quad (2)$$

โดยที่ E_k คือ ค่าพลังงานจลน์ หน่วยเป็น J
 m คือ มวลใบมีดจะถูกติดตั้งพร้อมกับมวลถ่วงน้ำหนัก หน่วยเป็น kg
 U คือ ความเร็วของใบมีดก่อนกระทบกับแผ่น UPE หน่วยเป็น m/s

ความลึกรอยแทงวัดจากพื้นผิวด้านบนของวัสดุด้านการแทงถึงปลายมีดซึ่งเจาะผ่านวัสดุด้านการแทง ความลึกรอยแทงสัมพันธ์กับจำนวนแผ่นและความหนาของ UPE โดยความลึกรอยแทงของ

UPE ที่จำนวนแผ่นแตกต่างกันหลังถูกทดสอบการแทงด้วยมีดแบบ P1 และแบบ S1 แสดงใน Table 3 เมื่อพิจารณาการแทงด้วยใบมีดชนิด P1 จะเห็นว่าใบมีด P1 สามารถแทงทะลุด้านหน้าแต่ไม่สามารถแทงทะลุผ่านด้านหลังของ UPE-(15) UPE-(20) UPE-(25) และ UPE-(30) ได้ และมีความลึกของรอยแทงไม่เกิน 7 mm ถือว่า UPE ที่เรียงตัวกัน 15-30 แผ่น ผ่านมาตรฐาน NIJ ที่ระดับพลังงาน E1 ของใบมีด P1 ทั้งหมด แต่สำหรับการทดสอบการแทงด้วยใบมีดชนิด S1 พบว่า UPE-(15) ถูกใบมีดชนิด S1 แทงทะลุผ่านทั้งด้านหน้าและด้านหลังของวัสดุไป

จนถึงวัสดุรองหลังและมีความลึกรอยแทงมากกว่า 7 mm แต่เมื่อใช้ UPE ที่จำนวน 20 แผ่นขึ้นไป ใบมีด S1 สามารถแทงทะลุเฉพาะด้านหน้าแต่ไม่สามารถแทงทะลุผ่านด้านหลังของ UPE และมีความลึกของแทงไม่เกิน 7 mm ซึ่งถือว่าผ่านมาตรฐาน NIJ (E1) ดังนั้น จำนวนแผ่นของ UPE ที่เหมาะสมสำหรับพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับเสื้อเกราะอ่อนเพื่อด้านการแทง คือ 20 แผ่น เพราะเป็นจำนวนที่น้อยที่สุดที่สามารถด้านการแทงที่ระดับพลังงาน E1 ได้ทั้งใบมีดชนิด P1 และ S1

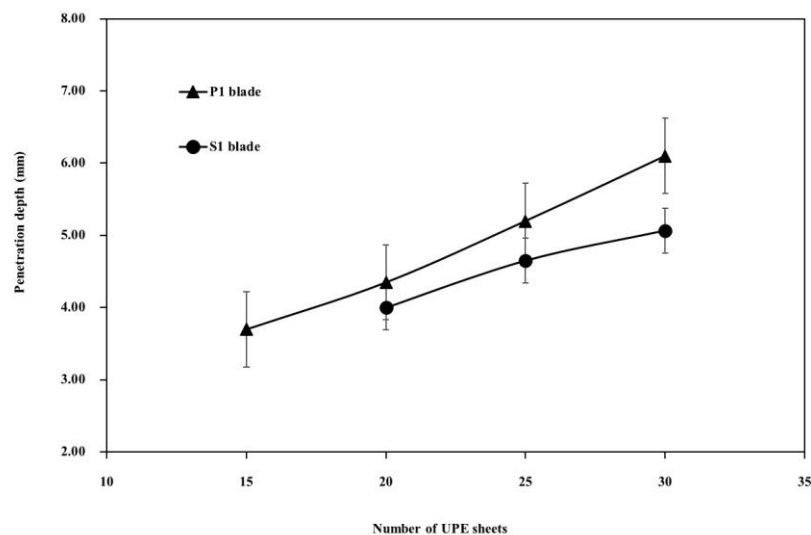


Figure 4 Penetration depths of UPE relative to the number of sheets

จาก Figure 4 จะเห็นว่าเมื่อจำนวนแผ่นของ UPE เพิ่มขึ้นจาก 15 ถึง 30 แผ่น ส่งผลให้เกิดความลึกของรอยแทงมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนแผ่น UPE ทำให้ความต้านทานการแทงของ UPE ลดลง ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่พบว่าเมื่อจำนวนแผ่นของวัสดุด้านการแทงมากขึ้นจะมีผลให้ระยะรอยแทงลดลงเนื่องจากมวลของวัสดุที่มากขึ้น (Guo *et al.*, 2020; Huh *et al.*, 2010; Tien *et al.*, 2011) ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับงานวิจัยนี้ สามารถอธิบายได้จากทฤษฎี

การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมในช่วงเวลา (Δt) หรือแรงดล (Impulsive force) จากสมการ

$$I = \frac{m(V-U)}{\Delta t} \quad (3)$$

โดยที่ I คือ แรงดล หน่วยเป็น N

m คือ มวลของวัตถุที่ชน หน่วยเป็น kg

V คือ ความเร็วสุดท้ายของวัตถุ หน่วยเป็น m/s

U คือ ความเร็วเริ่มต้นของวัตถุ หน่วยเป็น m/s

Δt คือ ช่วงเวลาที่ความเร็ววัตถุเปลี่ยนแปลง
ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสุดท้าย หน่วยเป็น s

จากสมการที่ (3) จะเห็นว่าแรงคลมีค่าน้อย
เมื่อวัตถุใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงความเร็วตั้งแต่
เริ่มต้นจนถึงสุดท้ายมาก

จากการทดลองปล่อยลูกเหล็กทรงกลมมวล
1 kg ให้ตกอย่างอิสระลงบนแผ่น UPE-(15) พบว่า
หลังจากที่ถูกเหล็กกระทบกับ UPE-(15) ครั้งแรกแล้ว
ลูกเหล็กกระดอนขึ้นไปบนอากาศเป็นระยะทาง 36
cm แต่เมื่อใช้แผ่น UPE-(30) ลูกเหล็กกระดอนขึ้นไป
บนอากาศเป็นระยะทาง 34 cm แสดงให้เห็นว่า
ช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงความเร็วจากความเร็ว
เริ่มต้นจนถึงความเร็วสุดท้ายของ UPE-(15) มีค่า
มากกว่า UPE-(30) จึงส่งผลให้แรงคลที่เกิดขึ้น UPE-
(15) มีค่าน้อยกว่าบน UPE-(30) ซึ่งอาจจะเป็นผลมา
จาก UPE-(15) มีความยืดหยุ่นมากกว่า UPE-(30) จึง
สามารถสะท้อนแรงจากลูกเหล็กกลับไปได้มากกว่า
ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับการที่ความถี่การ
แกว่งของแผ่น UPE-(15) มีค่าน้อยกว่า UPE-(30) ดัง
Table 3 และ Figure 4 เนื่องจาก UPE-(15) ได้รับแรง

กระทำจากใบมีดน้อยกว่า UPE-(30) ซึ่งผลการ
ทดลองดังกล่าวถูกสนับสนุนเพิ่มเติมจากรอยพับที่
เกิดขึ้นบนแผ่น UPE-(15) จะมีมากกว่าบนแผ่น UPE-
(30) อย่างชัดเจน หลังจากได้รับแรงกระทบจากใบมีด
ดังแสดงใน Figure 5

นอกจากนี้ในการขึ้นรูป UPE-(X) เป็นการ
นำแผ่น UPE มาเรียงซ้อนกันแล้วกดรีดให้แต่ละแผ่น
อยู่ชิดกันมากที่สุดโดยไม่ได้มีการเชื่อมรอยต่อ
ระหว่างแผ่นด้วยสารยึดติดใด ๆ จึงอาจจะมีช่องว่าง
ระหว่างแผ่น UPE แต่ละแผ่นเกิดขึ้นได้เล็กน้อย ซึ่ง
ช่องว่างนี้มีผลทำให้วัสดุเกิดการบิดงอได้จากการวัด
ความหนาของชิ้นงาน (Table 3) พบว่าเมื่อจำนวน
แผ่น UPE ที่เรียงซ้อนกันมีจำนวนน้อย ชิ้นงานจะมี
ช่องว่างภายในชิ้นงานมากกว่า ทำให้เมื่อแผ่นด้านบน
ของ UPE-(15) ได้รับการแกว่งด้วยใบมีดจากการ
ปล่อยมวลถ่วงน้ำหนักที่มีพลังงาน 24 จูล จึงเกิดการ
บิดงอได้จากจำนวนช่องว่างที่มีอยู่มากกว่า อีกทั้ง
ช่องว่างระหว่างรอยต่อของแผ่น UPE แต่ละแผ่นจะ
ส่งผลต่อการถ่ายโอนแรงจากใบมีดไปยังแผ่นชิ้นงาน
ด้านล่างได้น้อยลง ทำให้ชิ้นงานที่มีจำนวนแผ่น UPE
น้อยกว่า เกิดความถี่การแกว่งน้อยกว่า

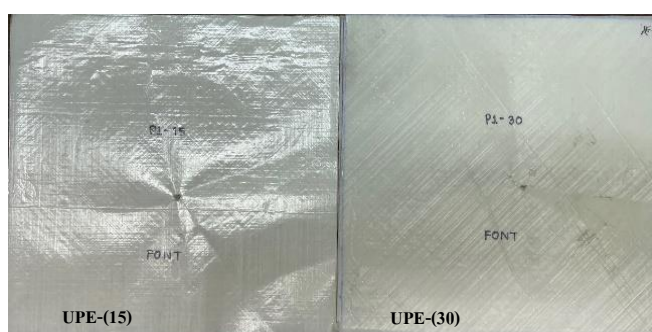


Figure 5 UPE-(15) and UPE-(30) after testing by P1 blade

3. ความสัมพันธ์ของความหนาของ UPE กับความถี่การแกว่ง

ความหนาของวัสดุต้านทานการแกว่งเป็น
ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความเสถียรของการ

สวมใส่ (Sitotaw *et al.*, 2022) หากวัสดุที่ใช้มีความ
หนามากเกินไปจะทำให้ผู้สวมใส่เคลื่อนไหวลำบาก
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของความหนา
ของ UPE จำนวน 4 ระดับ ได้แก่ 3.80 4.80 5.80 และ

6.80 mm ต่อความลึกรอยแทง ผลของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ UPE กับความลึกรอยแทงจากการแทงด้วยมีดชนิด P1 และ S1 แสดงดัง Figure 6 จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าความหนาของ UPE มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความลึกรอยแทงที่เกิดขึ้นจากทั้งใบมีดแบบ P1 และ S1 โดยเมื่อความหนาของ UPE เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความลึกรอยแทงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจาก UPE ที่มีความหนาน้อยกว่าจะสามารถสะท้อนแรงจากใบมีดกลับไปได้มากกว่าดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2 และ UPE ที่มีความหนาน้อยกว่าจะมีช่องว่างภายในชิ้นงานมากกว่า เมื่อได้รับการแทงด้วยใบมีดจึงเกิดการบิดงอได้ง่ายกว่า

นอกจากนี้ผลของความชันเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ UPE กับความลึกรอยแทงจากใบมีด P1 มีค่าเท่ากับ 0.805 และจากใบมีด S1 มีค่าเท่ากับ 0.550 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ความหนาของ UPE เท่ากัน ใบมีดแบบ P1 สามารถทำให้เกิดรอยแทงที่มีความลึกมากกว่าใบมีด S1 เนื่องจากใบมีดแบบ S1 เป็นใบมีดแบบ 2 คม และมีขนาดใหญ่กว่าใบมีดแบบ P1 ซึ่งเป็นใบมีด

แบบ 1 คม ซึ่งใบมีดแบบ S1 น่าจะสามารถทำให้เกิดรอยแทงบนชิ้นงานที่มีความลึกมากกว่าใบมีดแบบ P1 แต่เนื่องจากใบมีดแบบ S1 มีความหนา 0.4 cm ซึ่งหนากว่าใบมีดแบบ P1 ที่มีความหนา 0.2 cm ใบมีดที่บางกว่าจะมีแรงต้านจากชิ้นงานที่แทงน้อยกว่า จึงทำให้ใบมีดแบบ P1 แทงวัสดุได้ลึกกว่าใบมีดแบบ S1

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการด้านการแทงกับวัสดุชนิดอื่นพบว่าความหนาชิ้นต่ำสุดของ UPE ที่สามารถด้านการแทงด้วยใบมีดแบบ 1 คม ที่ระดับพลังงาน 24 จูล ได้ มีค่าเท่ากับ 4.80 mm ซึ่งน้อยกว่าความหนาของพอลิเอไมด์ 6 พอลิเอไมด์ 11 พอลิเอไมด์ 12 พอลิคาร์บอเนต และพอลิเอทิลีน ที่ต้องใช้ความหนาถึง 7.61 5.64 6.12 5.54 และ 10.13 mm ตามลำดับ (Guo *et al.*, 2020) ดังนั้นแผ่น UPE ความหนา 4.80 mm เป็นความหนาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพัฒนาเป็นวัสดุด้านการแทงที่ระดับพลังงาน E1 ทั้งจากใบมีดแบบ P1 และ S1 ด้วยความหนาที่ไม่มากจนเกินไปจึงน่าจะส่งผลดีเวลาสวมใส่ ทำให้ผู้สวมใส่สามารถเคลื่อนไหวร่างกายได้สะดวกกว่าการใช้วัสดุด้านการแทงที่มีความหนามาก

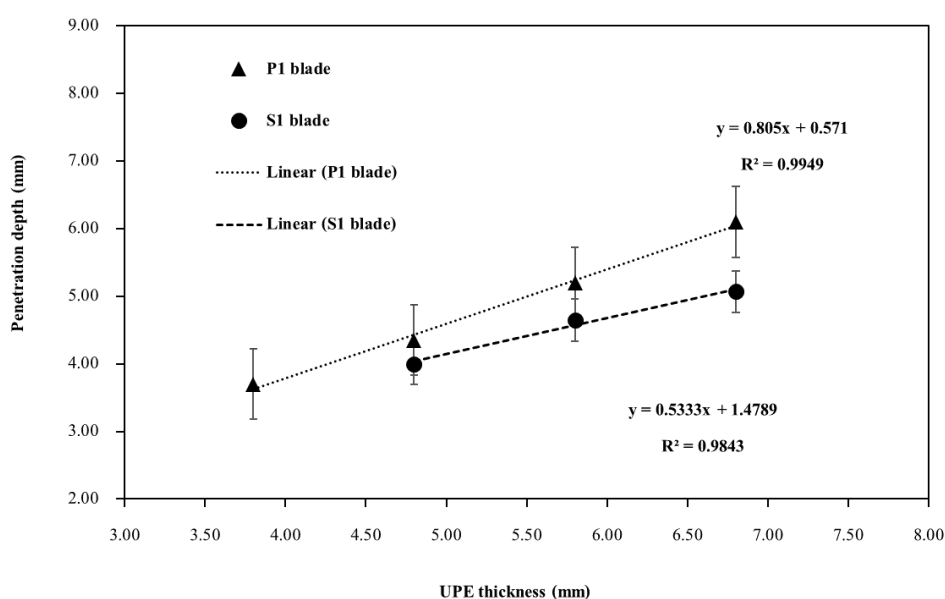


Figure 6 Penetration depths of UPE relative to anti-stabbing material thickness

4. ความสัมพันธ์ของมวลของ UPE กับความลึกรอย แทง

ในการออกแบบชุดเกราะอ่อนเพื่อด้านการ
แทง นอกจากประสิทธิภาพในความสามารถที่ตี
แล้ว มวลของชุดก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ต้องให้
ความสำคัญเพราะผู้สวมใส่ต้องใส่ชุดเกราะอ่อน
ตลอดเวลาในระหว่างปฏิบัติการจริง ดังนั้นชุดเกราะ
อ่อนจึงไม่ควรมียาวที่มากเกินไปเพราะจะทำให้
ผู้สวมใส่ไม่สามารถเคลื่อนไหวร่างกายได้อย่าง
คล่องตัวและก่อให้เกิดความเมื่อยล้าระหว่างการสวม
ใส่ (Sitotaw *et al.*, 2022; Yuan *et al.*, 2017) งานวิจัย
นี้จึงได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมวลของวัสดุด้าน
การแทงกับความลึกรอยแทง โดยมวลของวัสดุจะ
แสดงอยู่ในรูปของค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ ซึ่งเป็น
มวลของวัสดุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยที่ค่าความ
หนาแน่นเชิงพื้นที่ของ UPE-(15) UPE-(20) UPE-
(25) และ UPE-(30) มีค่าเท่ากับ 2.55 3.40 4.25 และ
5.10 kg/m² ตามลำดับ Figure 7 แสดงให้เห็นว่าความ
หนาแน่นเชิงพื้นที่ของ UPE สัมพันธ์กับความลึกรอย
แทงตามสมการเส้นตรงเช่นเดียวกับความหนาของ
วัสดุ โดยพบว่าเมื่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้น
ส่งผลให้ความลึกรอยแทงเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณากราฟ
ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของ
UPE กับความลึกรอยแทง (Figure 7) จะเห็นว่าม
ีความชันมากกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความ
หนาของ UPE กับความลึกรอยแทงทั้งจากการแทง
ด้วยใบมีด P1 และ S1 (Figure 6) บ่งบอกได้ว่าการ
เปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของ UPE มีผล
ต่อความลึกรอยแทงมากกว่าการเปลี่ยนแปลงความหนา

ตัวอย่าง UPE-(20) มีความหนา 4.80 mm
และมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่มีค่าเท่ากับ 3.40 kg/m²
มีความเหมาะสมสำหรับพัฒนาเป็นชุดเกราะอ่อน
ด้านการแทง เนื่องจากเป็นวัสดุที่ผ่านมาตรฐานการ
ด้านการแทงและมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่น้อยที่สุด
ในงานวิจัยนี้ รวมถึงมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่น้อย
กว่าวัสดุจากงานวิจัยอื่นที่เคยมีการนำมาใช้เป็นวัสดุ
ด้านการแทง อาทิเช่น พอลิเมอร์เกรดการค้าต่าง ๆ
ได้แก่ พอลิเอทิลีนที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดร้อน
พอลิคาร์บอเนต (Guo *et al.*, 2020) รวมไปถึงกลุ่ม
เส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง เช่น เส้นใยอะรามิด
เส้นใยโลหะ เส้นใยจากหินแร่ เส้นใยคาร์บอน เป็นต้น
(Huh *et al.*, 2010; Olszewska *et al.*, 2013; Tien *et al.*,
2011; Yuan *et al.*, 2017) ส่วนมีมวลต่อหนึ่งหน่วย
พื้นที่ที่สูงกว่า UPE-(20) จากงานวิจัยก่อนหน้านี้มีการ
รายงานว่าเส้นใย พอลิเอไมด์ผสมคาร์บอนที่ความ
หนา 6.50 mm มีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ
6.58 kg/m² ซึ่งเป็นวัสดุด้านการแทงที่มีความเบากว่า
ชุดเกราะเกรดการค้าถึง 43% (Yuan *et al.*, 2017) และ
สามารถต้านทานการแทงได้ที่ระดับพลังงาน E1
ในขณะที่ UPE-(20) จากงานวิจัยนี้สามารถต้านทาน
การแทงได้ที่ระดับพลังงาน E1 เช่นเดียวกัน แต่มี
ความหนาและความหนาแน่นเชิงพื้นที่น้อยกว่า
เส้นใยพอลิเอไมด์ผสมคาร์บอนประมาณ 50% จึงอาจ
กล่าวได้ว่า UPE-(20) เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพใน
การต้านทานการแทงเทียบเท่าวัสดุอื่น แต่มีมวลต่อ
หน่วยพื้นที่และความหนาน้อยกว่า ซึ่งถือเป็นจุดเด่น
ของวัสดุชนิดนี้ในการพัฒนาเป็นชุดเกราะอ่อนต่อไป

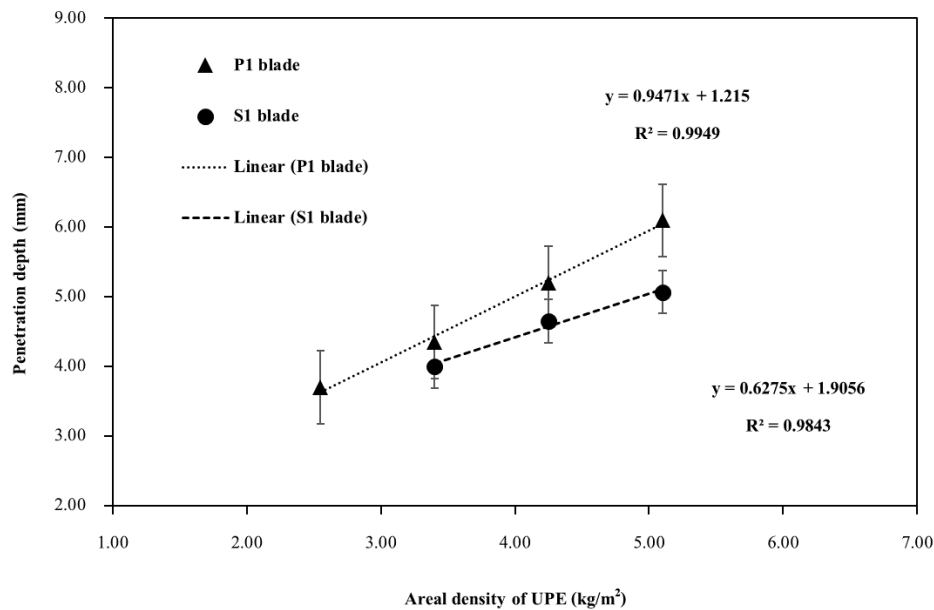


Figure 7 Penetration depths of UPE relative to areal density of anti-stabbing material

5. ดัชนีด้านการแทง (Anti-stabbing index; ASI)

โดยทั่วไปประสิทธิภาพด้านการแทงของวัสดุจะพิจารณาจากความลึกรอยแทง แต่อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุแต่ละชนิดโดยใช้ระยะรอยแทงเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่ค่อยแม่นยำนัก เนื่องจากปัจจัยอื่นเช่นความหนาหรือมวลของวัสดุมีผลต่อความลึกรอยแทงของวัสดุแต่ละชนิดแตกต่างกัน เพื่อให้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพความต้านการแทงของวัสดุแต่ละชนิดมีความแม่นยำมากขึ้น จึงมีการกำหนดค่าที่เรียกว่าดัชนีด้านการแทง หรือ ASI ขึ้นมา (Tien *et al.*, 2011) ซึ่งเป็นค่าที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุ ณ ความลึกรอยแทงเท่ากัน หาก ASI ยิ่งมีค่าน้อย แสดงว่าวัสดุต้านการแทงชนิดนั้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุด้านการแทง ทั้งในแง่ของประสิทธิภาพด้านการแทงที่ดี มีความเบา และมีความหนาน้อย ตามมาตรฐาน NIJ กำหนดไว้ว่าความลึกรอยแทงจะต้องไม่เกิน 7 mm วัสดุนั้นจึงจะถือว่ามีประสิทธิภาพด้านการแทง นิยามของดัชนีด้านการแทงแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$ASI = (TH)_{STD} \times (AD)_{STD} \quad (3)$$

โดย $(TH)_{STD}$ คือ ความหนาของวัสดุที่ทำให้เกิดความลึกรอยแทง 7 mm (Thickness of material required for the standard penetration depth) และ $(AD)_{STD}$ คือ ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของวัสดุที่ทำให้เกิดความลึกรอยแทง 7 mm (Areal density of material required for the standard penetration depth)

$(TH)_{STD}$ และ $(AD)_{STD}$ ของ UPE สามารถคำนวณได้จากสมการเส้นตรงของ Figure 6 และ Figure 7 ตามลำดับ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าใบมีดแบบ P1 มีค่า $(TH)_{STD}$ และ $(AD)_{STD}$ เท่ากับ 7.99 mm และ 6.11 kg/m² ตามลำดับ ในขณะที่ใบมีดแบบ S1 มีค่า $(TH)_{STD}$ และ $(AD)_{STD}$ เท่ากับ 10.19 mm และ 7.98 kg/m² ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อคำนวณตามสมการที่ (3) ค่า ASI ของ UPE สำหรับใบมีด P1 มีค่าเท่ากับ 48.82 และค่า ASI ของ UPE สำหรับใบมีด S1 มีค่าเท่ากับ 81.31 เมื่อเปรียบเทียบกับค่า ASI ของวัสดุอื่นใน Table 4 พบว่า UPE มีค่า ASI ต่ำกว่าวัสดุไฮบริดที่ขึ้นรูปจากเส้นใยอะคริลิก ใยคาร์บอน และใยโพลีเอสเตอร์ การทดสอบแสดงให้เห็นว่า UPE สามารถต้านการ

แท่งตามมาตรฐาน NIJ ในระดับ E1 ได้เช่นเดียวกันกับวัสดุชนิดอื่น แต่มีมวลและความหนาน้อยกว่าวัสดุอื่น จึงทำให้ UPE เป็นอีกวัสดุหนึ่งที่มีความน่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุด้านการแทงในเสื้อเกราะอ่อน เพราะจะทำให้เสื้อเกราะมีความบาง ความเบา มีความยืดหยุ่นที่ดี ทำให้ผู้สวมใส่เคลื่อนไหวได้สะดวกขณะสวมใส่และไม่ต้องแบกรับน้ำหนักเสื้อเกราะมากเกินไป

สำหรับต้นทุนการผลิตแผ่น UPE มีต้นทุนการผลิตเฉลี่ยกิโลกรัมละ 350 บาท ในขณะที่ต้นทุน

การผลิตแผ่นเคฟลาจากเส้นใยอะรามิดซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้ผลิตเป็นเสื้อเกราะกันกระสุนและเสื้อเกราะกันแทงในท้องตลาดปัจจุบันมีราคาเฉลี่ยอยู่ที่กิโลกรัมละ 3,600 บาท ซึ่งการผลิตแผ่น UPE มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าแผ่นเคฟลาประมาณ 10 เท่า ดังนั้น แผ่น UPE จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเพราะเป็นวัสดุที่ราคาไม่สูง น้ำหนักเบา และสามารถต้านทานการแทงตามมาตรฐานได้

Table 4 Comparison of anti-stabbing index (ASI) of several materials

Material	Number of sheets	Thickness (mm)	Areal density (kg/m ²)	Anti-stabbing index (ASI)	Ref.
UPE-P1 blade	33	7.99	6.11	48.82	This work
UPE-S1 blade	42	10.19	7.98	81.32	This work
Basalt	29	17.30	7.70	133.21	(Tien <i>et al.</i> , 2011)
Aramid	17	17.60	10.60	186.56	(Tien <i>et al.</i> , 2011)
Metal	12	14.20	11.60	164.72	(Tien <i>et al.</i> , 2011)

สรุป

UPE เป็นวัสดุที่ผลิตจากการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงยิ่งเป็นแผ่นบางแบบไม่ถักทอด้วยวิธีอัดร้อน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ต้นทุนต่ำ ได้แผ่นด้านการแทงที่มีความบางและมีมวลต่อพื้นที่ต่ำ UPE-(1) มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานการฉีกขาดเท่ากับ 162.50 MPa และ 360.74 N/mm ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุที่ค่อนข้างเหนียวเมื่อเทียบกับวัสดุด้านการแทงชนิดอื่น ในส่วนของ การทดสอบประสิทธิภาพด้านการแทงนั้น UPE-(20) เป็นความหนาที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุด้านการแทงที่ระดับพลังงาน E1 เนื่องจากเป็นความหนาขั้นต่ำสุดที่สามารถต้านทานการแทงทั้งจากโคมิด P1 และ S1 ตามมาตรฐาน NIJ ได้ รวมถึงมีความ

หนาแน่นเชิงพื้นที่น้อยที่สุดในงานวิจัยนี้ การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของ UPE มีผลต่อความลึกรอยแทงมากกว่าการเปลี่ยนแปลงความหนา นอกจากนี้ UPE มีค่าดัชนีด้านการแทงและความหนาแน่นเชิงพื้นที่ต่ำกว่าวัสดุจากงานวิจัยอื่น แสดงให้เห็นว่า UPE มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุด้านการแทงทั้งในแง่ของการมีประสิทธิภาพด้านการแทงที่ดี เตรียมได้จากวิธีที่ไม่ซับซ้อน เป็นวัสดุด้านการแทงที่มีน้ำหนักเบาและบาง ช่วยให้ผู้สวมใส่สามารถเคลื่อนไหวได้สะดวกขณะสวมใส่

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์
เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Afshari, M., Sikkema, D.J., Lee, K. and Bogle, M. 2008. High performance fibers based on rigid and flexible polymers. **In Polymer Reviews** 48(2): 230-274.
- Bogetti, T.A., Walter, M., Staniszewski, J. and Cline, J. 2017. Interlaminar shear characterization of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) composite laminates. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing** 98: 105-115.
- Chen, L., Cao, M. and Fang, Q. 2021. Ballistic performance of ultra-high molecular weight polyethylene laminate with different thickness. **International Journal of Impact Engineering** 156: 1-11.
- Deák, T. and Czigány, T. 2009. Chemical Composition and Mechanical Properties of Basalt and Glass Fibers: A Comparison. **Textile Research Journal** 79(7): 645-651.
- Guo, Y., Yuan, M., Qian, X., Wei, Y. and Liu, Y. 2020. Rapid prediction of polymer stab resistance performance. **Materials and Design** 192: 108721.
- Huh, Y., Tien, D.T. and Kim, J.S. 2010. Stab-resistant property of the fabrics woven with the aramid/cotton core-spun yarns. **Fibers and Polymers** 11(3): 500-506.
- Li, T., Song, Z., Yang, X. and Du, J. 2023. Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Peek Plates by Hot Compression Molding. **Materials** 16(1): 36.
- Mejia, E., Cherupurakal, N., Mourad, A.H.I., Hassanieh, S.A.I. and Rabia, M. 2021. Effect of processing techniques on the microstructure and mechanical performance of high-density polyethylene. **Polymers** 13(19): 3346.
- Mudzi, P., Wu, R., Firouzi, D., Ching, C.Y., Farncombe, T.H. and Ravi Selvaganapathy, P. 2022. Use of patterned thermoplastic hot film to create flexible ballistic composite laminates from UHMWPE fabric. **Materials and Design** 214: 110403.
- Nayak, R., Crouch, I., Kanesalingam, S., Wang, L., Ding, J., Tan, P., Lee, B., Miao, M., Ganga, D. and Padhye, R. 2018. Body armor for stab and spike protection, Part 2: a review of test methods. **Textile Research Journal** 89(16): 3411-3430.
- O'Masta, M.R., Deshpande, V.S. and Wadley, H.N.G. 2014. Mechanisms of Projectile Penetration in Dyneema® Encapsulated Aluminum Structures. **International Journal of Impact Engineering** 74: 16-35.
- Olszewska, K., Polak, J., Zielińska, D., Struszczyk, M.H., Kucińska, I., Wierzbicki, Ł., Kozłowska, J., Leonowicz, M. and Wiśniewski, A. 2013. Textile multilayered systems with magnetorheological fluids for potential application in multi-threat protections. Preliminary stab - Resistance studies. **Fibres and Textiles in Eastern Europe** 21(5): 112-116.

- Pundhir, N., Pathak, H. and Zafar, S. 2021. Ballistic impact performance of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) composite armour. **Sādhanā** 46: 194.
- Sapozhnikov, S.B., Kudryavtsev, O.A. and Zhikharev, M.V. 2015. Fragment ballistic performance of homogenous and hybrid thermoplastic composites. **International Journal of Impact Engineering** 81: 8-16.
- Shamloo, A., Fathi, B., Elkoun, S., Rodrigue, D. and Soldera, A. 2018. Impact of compression molding conditions on the thermal and mechanical properties of polyethylene. **Journal of Applied Polymer Science** 135(15): 46176.
- Sitotaw, D.B., Ahrendt, D., Kyosev, Y. and Kabish, A.K. 2022. A Review on the Performance and Comfort of Stab Protection Armor. **Autex Research Journal** 22(1): 96-107.
- Tien, D.T., Kim, J.S. and Huh, Y. 2011. Evaluation of anti-stabbing performance of fabric layers woven with various hybrid yarns under different fabric conditions. **Fibers and Polymers** 12(6): 808-815.
- Yashiro, S., Ogi, K., Yoshimura, A. and Sakaida, Y. 2014. Characterization of high-velocity impact damage in CFRP laminates: Part II - Prediction by smoothed particle hydrodynamics. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing** 56: 308-318.
- Yuan, M.Q., Liu, Y., Gong, Z. and Qian, X.M. 2017. The application of PA/CF in stab resistance body armor. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** 213(1): 12027.
- Zaribaf, F.P. 2018. Medical-grade ultra-high molecular weight polyethylene: past, current and future. **In Materials Science and Technology (United Kingdom)** 34(16): 1940-1953.