Thai Journal of Mechanical Engineering (2024) Vol.1, No.1, Paper No. TJME-24-01-002

วารสารวิศวกรรมเครื่องกลไทย

Thai Journal of Mechanical Engineering

https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/tjme/index

ตัวเลขไร้มิติสำหรับการออกแบบแผ่นรองกระแทกเบื้องต้น

Dimensionless number for preliminary design of impact absorption plate

ชินวิทย์ กลั่นรอด[1], บัณฑิต พึ่งสาระ[2,3], เจตดิลก สิทธิ์ศิรดิลก[2], ธิรวัฒน์ กำกระโทก[2], วงศธร โพธิ์นาค[2], วรากร คูคีรีเขตต์[2] และ เพชร เจียรนัยศิลาวงศ์[2*]

[1]บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

[3]สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร เลขที่ 9 ถนนแจ้งวัฒนะ แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

***ผู้ประพันธ์บรรณกิจ** Petch.j@eng.kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

งานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการสร้างตัวเลขไร้มิติสำหรับเป็นแนวทางในการออกแบบแผ่นรองกระแทก โดยเริ่มจากศึกษาสมบัติในการรับแรงกระแทกของวัสดุด้วยการทดสอบปืนอัดลม วัสดุที่คัดเลือกมาทดสอบมีจำนวน 3 ประเภท ได้แก่ สารประกอบเส้นใย (Fiber Composite) โลหะ (Metal) และ โพลีเมอร์ (Polymer) ทดสอบที่การยิงกระสุนลูกแบริ่งที่ความเร็วในช่วง 130 – 320 เมตรต่อวินาที ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบถูกจัดทำความสัมพันธ์ที่สามารถบ่งบอกพฤติกรรมการรับแรงกระแทกของวัสดุแต่ละชนิด จากนั้นจึงใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สอบเทียบกับการทดสอบและขยายผลไปในย่านความเร็วอื่น แล้วนำผลการคำนวณที่ได้มาสร้างตัวเลขไร้มิติสำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับงานที่เกี่ยวข้องกับแผ่นรองกระแทกในเบื้องต้น ทั้งนี้ตัวเลขไร้มิติที่นำเสนอถูกสร้างจากวัสดุที่ทำการทดสอบเท่านั้น และเป็นจุดอ้างอิงที่ดีในการพัฒนาตัวเลขไร้มิติสำหรับแผ่นรองกระแทกในงานอื่นต่อไป

คำหลัก: การกระแทก, การออกแบบแผ่นรองกระแทก, ไฟไนต์เอลิเมนต์, ปืนอัดลม, ตัวเลขไร้มิติ

ABSTRACT

The objective of this work is to develop a dimensionless number to guide in the design of impact absorption plate by studying material behavior under gas gun impact. Three types of material are chosen to be examined: fiber composite, metal, and polymer. The impact tests are conducted by firing ball bearing at the speed ranging from 130–320 m/s. The data collected from the tests demonstrate the comparative behavior of each material under impact loading. The experimental data are used for developing and validating finite element models and the simulations are repeated on a range of velocities outside the testing regime. Results of the finite element models lead to the development of a dimensionless impact number for assisting in the preliminary design of the right material for the impact absorption plate. The presented dimensionless number is limited to the materials under investigation and it serves as a reference point for developing a more robust dimensionless number for impact plate design.

Keywords: impact, impact plate design, finite element, gas gun, dimensionless number

Received: February 28, 2024; Revised: April 1, 2024; Accepted: April 8, 2024

ISSN XXXX-XXXx (Online)

1. บทนำ

การออกแบบชิ้นส่วนหรือแผ่นเพื่อกันกระแทกเป็นปัญหาทางวิศวกรรมที่พบได้ในการใช้งานหลายรูปแบบ ตั้งแต่ กรอบ บรรจุภัณฑ์ กระจกกันกระสุน เป็นต้น การเลือกใช้วัสดุสำหรับแผ่นกันกระแทกมีปัจจัยหลากหลายแตกต่างกันตามรูปแบบของความเร็วในการกระแทก ทิศทางของการกระแทก รูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ต้องกันกระแทก รูปร่าง น้ำหนักและราคาของวัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น ทั้งนี้ การเลือกใช้วัสดุสำหรับแผ่นกันกระแทกต้องเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม หรือหากผลิตภัณฑ์นั้นไม่มีมาตรฐานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ ก็ต้องมีการทดสอบซ้ำๆ จนมีค่าทางสถิติที่น่าพอใจ เพื่อให้มั่นใจเรื่องประสิทธิภาพการป้องกันได้ อย่างไรก็ตาม การทดสอบการกระแทกเป็นการทดสอบแบบทำลาย ซึ่งการทดสอบแต่ละครั้งมีต้นทุนจากการเตรียมและวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบเป็นหลัก

ในทางวิศวกรรมเป็นที่รู้กันทั่วไปว่าแผ่นกันกระแทกที่มีความหนามากขึ้นย่อมมีประสิทธิภาพในการป้องกันสูงขึ้น แต่การออกแบบแผ่นรองกระแทกมีข้อจำกัดในการใช้งานหรือในทางต้นทุนอยู่จึงไม่สามารถออกแบบแผ่นกันกระแทกให้มีความหนาไม่จำกัดได้ เป้าหมายของการออกแบบแผ่นกันกระแทกจึงจัดเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด การออกแบบแผ่นกันกระแทกจึงมักใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ [1–3] เนื่องจากแบบจำลองสามารถนำมาปรับเปลี่ยนรูปร่างและลักษณะต่าง ๆ ของการกระแทกได้ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นำมาใช้ทำนายการได้นี้ต้องผ่านการสอบเทียบกับผลการทดสอบจนเป็นที่น่าเชื่อถือได้ และรวมไปถึงการสอบเทียบค่าสมบัติวัสดุที่นำมาใช้ในการคำนวณด้วย ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นต้นทุนในการสร้างแบบจำลองที่มีความแม่นยำสูง

การออกแบบแผ่นรองกระแทกจึงควรมีวิธีการประเมินเชิงตัวเลขที่ใช้ในการออกแบบเบื้องต้น ในที่นี้ ค่าตัวเลขไร้มิติที่สร้างขึ้นมาจากองค์ประกอบต่างๆ ที่ปรากฏในการกระแทกย่อมเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการประมาณประสิทธิภาพของแผ่นรองกระแทกก่อนสร้างต้นแบบเพื่อทดสอบขึ้น ซึ่งสามารถประหยัดทรัพยากรที่ใช้ในการทดสอบได้

ในงานนี้มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาค่าตัวเลขไร้มิติสำหรับการออกแบบแผ่นรองกระแทก โดยเริ่มจากการทดสอบการยิงแผ่นวัสดุด้วยปืนอัดลม จากนั้นจึงนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วจึงใช้ผลการวิเคราะห์ของไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ภาวะของการยิงต่าง ๆ เช่น ความหนา ความหนาแน่นเชิงพื้นที่และสมบัติวัสดุของแผ่น มาใช้เป็นข้อมูลในการสร้างเลขไร้มิติ และได้สรุปถึงขอบเขตการใช้งานสำหรับวัสดุที่ได้ทดสอบเทียบกับตัวเลขไร้มิตินี้ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบแผ่นรองกระแทกได้

2. การทดสอบการกระแทกและการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เทคนิคการทดสอบการกระแทกถูกแบ่งตามอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด (strain rate) ที่เกิดขึ้นในวัตถุที่รับแรงกระแทก โดยแบ่งออกได้เป็นช่วงต่าง ๆ ตามมาตรฐานการทดสอบของสมาคมวิศวกรเครื่องกลของสหรัฐอเมริกา (The American Society of Mechanical Engineers ASME) [4] ได้เป็น

การทดสอบกึ่งสถิต มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดที่ระดับ 10^{-3}–1 ต่อวินาที เป็นพฤติกรรมของวัตถุกึ่งหยุดนิ่งหรือได้รับแรงในสภาวะกึ่งสถิตที่มีการเคลื่อนที่ช้า และผลของเวลาไม่ส่งผลถึงพฤติกรรมของวัสดุ การทดสอบพฤติกรรมวัสดุที่ใช้คือการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบทั่วไป (universal testing machine) ทั้งการกดและการดึง

การทดสอบที่ความเร็วต่ำ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดที่ระดับ 1–10^{3} ต่อวินาที เป็นพฤติกรรมของวัตถุที่รับแรงกระแทกจากแรงโน้มถ่วงของโลก เช่นการตกพื้น เป็นต้น ซึ่งผลของความเฉื่อย (inertia) ของวัตถุจะมีผลต่อพฤติกรรมการเสียรูปของวัตถุด้วย การทดสอบจะใช้เครื่องการกดการดึงด้วยไฮดรอลิกความเร็วสูง หรือ การทดสอบแบบปล่อยน้ำหนักตกใส่ (drop weight test)

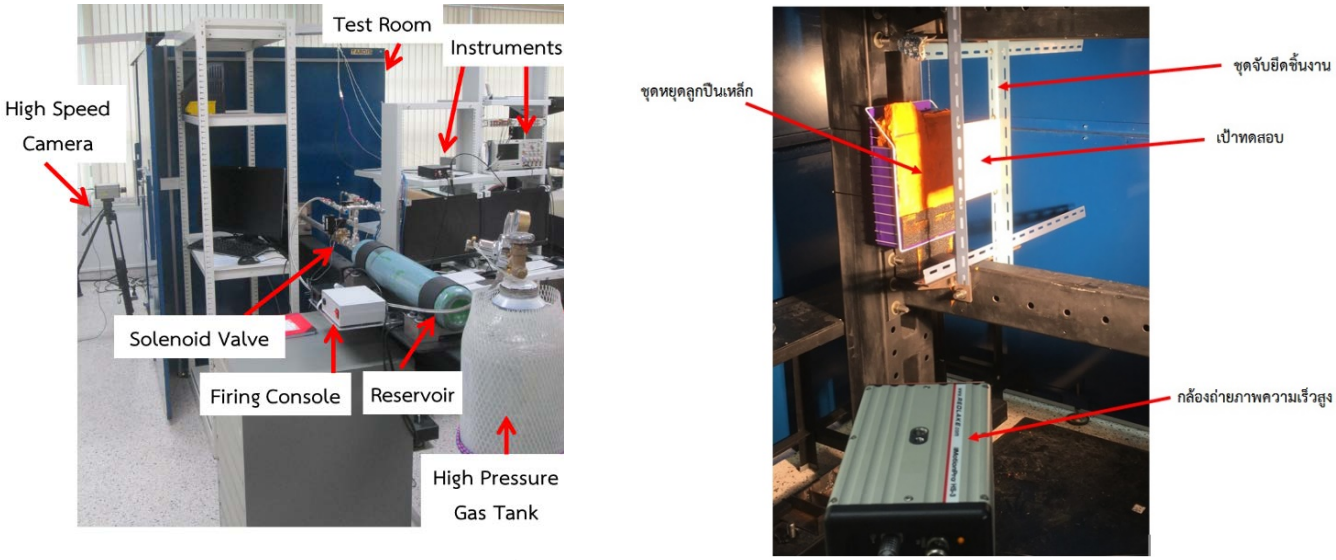
การทดสอบที่ความเร็วปานกลาง มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดที่ระดับ 10^{3}–10^{5} ต่อวินาที เป็นพฤติกรรมที่เกิดการเสียรูปอย่างรวดเร็วอันเกิดจากการปะทะของกระสุน หรือการชนของรถยนต์ ซึ่งผลของความเฉื่อย (inertia) มีสูงขึ้นและการกระจายตัวของพลังงานที่เกิดขึ้นจากการกระแทกไม่สามารถถ่ายเทได้รวดเร็วพอ ทำให้การเสียรูปมักจำกัดอยู่ ณ รอบตำแหน่งที่โดนกระแทก การทดสอบพฤติกรรมวัสดุใช้การทดสอบแบบสปลิตฮอปกินสันบาร์ (split Hopkinson bar) [5] หรือการกระแทกด้วยปืนอัดลมความเร็วต่ำ (gas gun)

การทดสอบที่ความเร็วสูง มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดที่ระดับสูงกว่า 10^5 ต่อวินาทีขึ้นไป เป็นพฤติกรรมที่เกิดการเสียรูปอย่างรวดเร็วใกล้เคียงกับความเร็วของเสียงในวัตถุทำให้เกิดความร้อนเกิดขึ้นบริเวณปะทะที่ไม่มีเวลาเพียงพอในการกระจายออก จึงมองลักษณะบริเวณกระแทกแบบระบบความร้อนคงที่ (adiabatic process) ตำแหน่งการกระแทกอาจเกิดการหลอมเหลว หรือแตกกระจายออกในบริเวณที่ถูกปะทะได้ การวิเคราะห์พฤติกรรมที่ความเร็วสูงใช้วิธีการวิเคราะห์คลื่นกระแทก (shock wave) ซึ่งรวมผลของของแข็งและของไหลร่วมกัน การทดสอบวัสดุที่ความเร็วสูงนี้มักใช้การทดสอบการกระแทกด้วยปืนอัดลม และอาจต้องมีการใช้เทคนิคของแสงในการวิเคราะห์ร่วมด้วย

ในงานนี้จะเน้นไปที่การศึกษาพฤติกรรมของวัสดุที่ความเร็วต่ำถึงปานกลาง เนื่องจากเป็นภาวะที่เกิดขึ้นได้ในหลายอุตสาหกรรมที่ต้องการออกแบบแผ่นรองกันกระแทกนี้

2.1 การทดสอบการกระแทกด้วยปืนอัดลม

การทดสอบด้วยปืนอัดลมในงานนี้ใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้นโดยเฉพาะ โดยมีรูปร่างและส่วนประกอบตามรูปที่ 1 ตัวปืนอัดลมประกอบไปด้วยถังอัดลมซึ่งสามารถอัดลมได้สูงสุด 40 bar และมีโซเลนอยด์วาล์วที่สามารถเปิดและปิดได้ภายใน 50 ms ถูกควบคุมด้วยชุดระบบไฟฟ้า กระบอกปืนเป็นท่อเหล็กยาว 2 m และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 mm ตัวแผ่นชิ้นงานถูกยึดเข้ากับโครงเหล็กที่ปรับขนาดได้ในห้องกักกระสุนที่มีผนังทำด้วยเหล็กหนา 2 mm เมื่อใช้ร่วมกับกระสุนที่เป็นปลอกพลาสติกกลวงและลูกกระสุนที่ทำจากลูกปืนแบริ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.4 mm น้ำหนัก 1 กรัม แล้วสามารถสร้างความเร็วได้ตั้งแต่ 80–340 m/s โดยการขับด้วยอากาศ, ไนโตรเจน หรือแก๊สฮีเลียมที่ความดันต่างกัน ความเร็วของกระสุนและการเสียรูปของแผ่นชิ้นงานทดสอบขณะกระแทกถูกวัดด้วยกล้องความเร็วสูงที่อัตรา 11,000 รูปต่อวินาที



รูปที่ 1 ปืนอัดลมที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

วัสดุที่นำมาทดสอบเป็นแผ่นที่มีความหนาแตกต่างกันตามขนาดมาตรฐานในตลาด ดังตารางที่ 1 ขนาดของวัสดุที่แตกต่างกันส่งผลให้พฤติกรรมหลังการปะทะแตกต่างกัน ทั้งนี้จึงจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมวัสดุที่ภายใต้พฤติกรรมหลากหลาย วัสดุทั้งหมดนี้จึงถูกยิงด้วยสามย่านความเร็ว ความเร็วต่ำที่ 120–130 m/s ด้วยอากาศอัดที่ความดัน 6 bar ความเร็วกลางที่ 165–175 m/s ด้วยแก๊สไนโตรเจน 20 bar และที่ความเร็วสูง 250–260 m/s ด้วยแก๊สฮีเลียม 7 bar วัสดุแต่ละประเภทที่นำมาทดสอบจะถูกยิงสามชิ้นต่อหนึ่งความเร็ว ผลการทดสอบที่ได้จะวัดในรูปของความเร็วของกระสุนที่สะท้อนหรือทะลุแผ่นวัสดุแต่ละประเภท จากนั้นจึงคำนวณในรูปของโมเมนตัมก่อนและหลังการกระแทกของวัสดุในแต่ละประเภท

ตารางที่ 1 ประเภทและค่าภาวะการทดสอบการกระแทก

ประเภทวัสดุ	ความหนาแน่น [kg/m^3]	ขนาดพื้นที่ [mm^2]	ความหนาแผ่น [mm]	ความเร็วเข้าปะทะ [m/s]	ความเร็วหลังปะทะ [m/s]	พฤติกรรมหลังการปะทะ
เหล็กกันกระสุน (Armox500T)	8171.75	190x190	6	131.35	47.75	สะท้อน
		190x190		205.13	58.91	สะท้อน
		190x190		300.37	49.52	สะท้อน
อะคริลิค	1185.185	150x150	3	116.18	50.68	ทะลุ
		150x150		171.54	97.46	ทะลุ
		150x150		251.07	184.01	ทะลุ
		150x150	6	141.21	6.73	สะท้อน
		150x150		194.89	5.19	สะท้อน
		150x150		295.79	78.87	ทะลุ
		150x150	10	141.41	52.19	สะท้อน
		150x150		210.62	55.39	สะท้อน
		150x150		303.34	47.62	สะท้อน
อะลูมิเนียม (AA7075-T651)	2769.23	150x150	6.5	117.39	21.05	สะท้อน
		150x150		169.98	15.68	สะท้อน
		150x150		254.19	8.58	สะท้อน
สารประกอบเส้นใยคาร์บอน (Hand Lay-up)*	1283.95	150x150	1.8	144.54	100.73	ทะลุ
		150x150		210.85	172.25	ทะลุ
		150x150		279.04	243.90	ทะลุ
สารประกอบเส้นใยคาร์บอน (Vacuum)*	1800.00	150x150	5	145.21	35.1	สะท้อน
		150x150		189.34	35.9	สะท้อน
		150x150		256.72	25.67	สะท้อน
สารประกอบเส้นใยเคฟล่า (Vacuum)*	1186.667	150x150	5	144.66	23.319	สะท้อน
		150x150		190.95	34.9	สะท้อน
		150x150		267.13	79.78	ทะลุ
		150x150	10	146.42	21.06	สะท้อน
		150x150		197.02	25.64	สะท้อน
		150x150		274.43	0	ฝัง

*สารประกอบเส้นใยขึ้นรูปด้วยวิธี Hand Lay-up หรือ Vacuum ในห้องปฏิบัติการสารประกอบ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

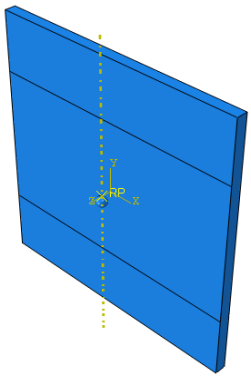
ตารางที่ 2 แบบจำลองพฤติกรรมวัสดุในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ประเภทวัสดุ	แบบจำลองวัสดุ	แบบจำลองความเสียหาย
เหล็กกันกระสุน[6]	Johnson – Cook Hardening	Johnson-Cook Damage
AA7075-T651[7]	Johnson – Cook Hardening	Johnson-Cook Damage
อะคริลิค	Elastic Plastic model	Ductile Damage

สารประกอบเส้นใยคาร์บอน[8]	Composite model	Hashin Damage
สารประกอบเส้นใยเคฟล่า	Composite model	Hashin Damage

2.2 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เป้าหมายของการสร้างแบบจำลองการยิงวัสดุตัวอย่างคือการสอบเทียบ พฤติกรรมวัสดุ (Material Model) ลักษณะความเสียหาย รวมถึงเทคนิคทางตัวเลขที่ใช้ในการคำนวณ เพื่อให้ได้ต้นแบบพฤติกรรมวัสดุที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ ปรับปรุงแบบ หรือเสริมวัสดุอื่นได้ เนื่องจากการทดสอบการยิงด้วยกระสุนที่มีความเร็วแตกต่างกัน ทำให้พฤติกรรมการเสียรูปวัสดุแตกต่างกันคือ สะท้อน, ฝังตัว และทะลุ ตามลำดับ ดังนั้น แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สอบเทียบมาจึงควรให้พฤติกรรมตามค่าทดสอบด้วย



รูปที่ 2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแผ่นโลหะ

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้โปรแกรม ABAQUS โดยกำหนดให้ลูกกระสุนเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) ส่วนของแผ่นวัสดุใช้เป็นแบบ continuum element สำหรับโลหะดังแสดงในรูปที่ 2 ทั้งนี้ ข้อมูลแบบจำลองวัสดุประเภทอะคริลิคที่มีให้ผลการคำนวณที่ไม่เที่ยงตรง จึงมิได้นำมาคำนวณต่อ สำหรับวัสดุสารประกอบเส้นใยเป็นแผ่น continuum shell โดยเส้นใยคาร์บอนมี 12 ชั้นและเคฟล่ามี 16 ชั้น ประเภทของแบบจำลองพฤติกรรมวัสดุที่ใช้เป็นไปตามตารางที่ 2 ส่วนของเมชเป็นแบบทรงสี่เหลี่ยมลำดับที่ 1 ขนาด 1 mm และกำหนดให้เอลิเมนต์สามารถถูกทำลายได้ การจับยึดขอบเป็นไปตามการทดลอง เมื่อแบบจำลองต่างๆ ได้ถูกทำการสอบเทียบกับการทดสอบที่สอดคล้องกันแล้ว จึงใช้แบบจำลองเหล่านั้นในการขยายผลเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของวัสดุแต่ละประเภทที่ความเร็วที่ไม่สามารถทดสอบได้จริง โดยทำการปรับเปลี่ยนความเร็วในการเข้าปะทะของลูกกระสุนตั้งแต่ความเร็วต่ำมากไปจนถึงสูงมากเพื่อให้วัสดุเกิดพฤติกรรมหลังการปะทะทั้งสามรูปแบบ ได้แก่ สะท้อน, ฝังตัวและทะลุแล้วศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้น

3. ผลการทดลองและผลแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 ผลการทดสอบการกระแทก

ผลการทดสอบการกระแทกได้แก่ความเร็วปะทะและความเร็วหลังปะทะซึ่งรวมถึงความเร็วสะท้อนหรือความเร็วทะลุสรุปดังตารางที่ 1 ส่วนสภาพการเสียรูปแบ่งออกได้ตามประเภทของวัสดุที่ทดสอบ ตามตารางที่ 3

เหล็กและอลูมิเนียม มีพฤติกรรมของวัสดุเป็นแบบสะท้อนในทุกย่านความเร็ว รอยแตกของวัสดุมีลักษณะเป็นรอยยุบทรงกลมและมีขอบนูนขึ้นมาเหมือนกันในทุกย่านความเร็วแต่มีความแตกต่างกัน คือ ความลึกของรอยยุบ ยิ่งความเร็วในการเข้าปะทะสูงขึ้น รอยยุบและขอบนูนของวัสดุก็จะมากขึ้น

อะคริลิค มีพฤติกรรมคล้ายวัสดุเปราะ ที่ขนาดความหนา 3 mm รอยแตกทั้งที่ความเร็วต่ำและความเร็วสูงมีลักษณะเป็นรูทะลุจากด้านหน้าถึงด้านหลัง โดยการทะลุจะมีขนาดของรูบริเวณด้านหน้าที่เล็กกว่าขนาดของรูบริเวณด้านหลัง รอยแตกมีลักษณะคล้าย

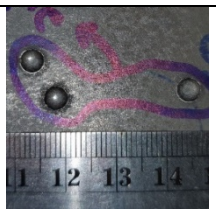
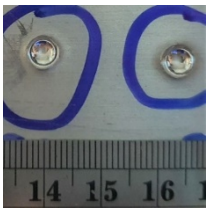
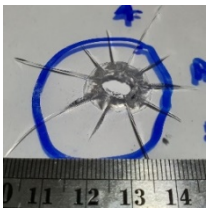
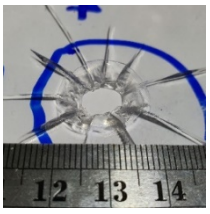
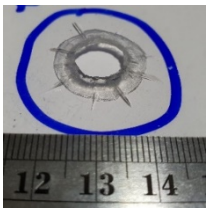
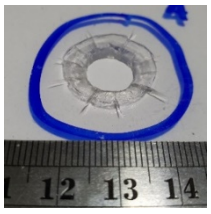
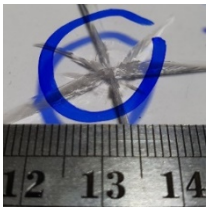
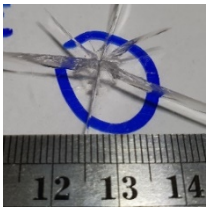
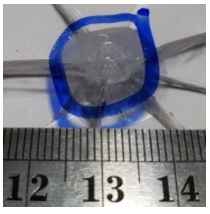
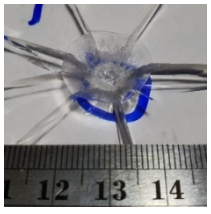
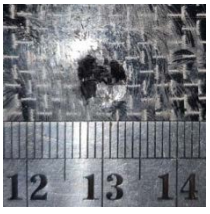
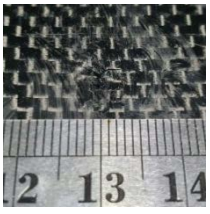
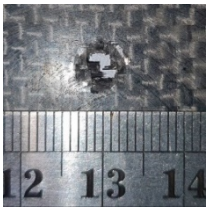
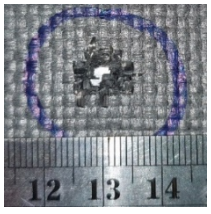
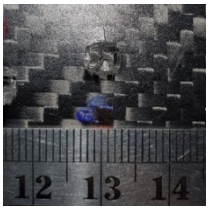
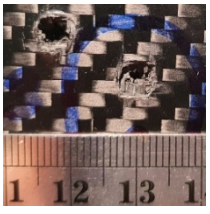
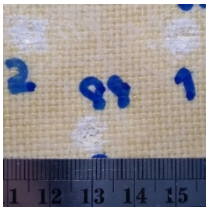
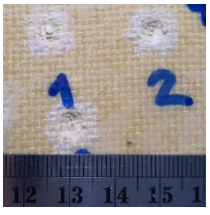
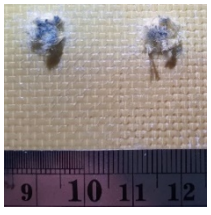
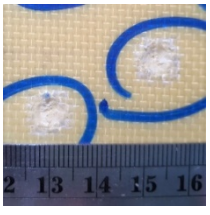
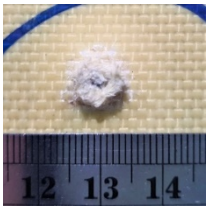
ทรงกรวยและมีรอยร้าวออกจากขอบรูที่ทะลุ ส่วนขนาดของรูที่เกิดการทะลุที่ย่านความเร็วต่ำจะมีขนาดเล็กกว่าย่านความเร็วสูง และขนาดรอยร้าวที่ออกจากขอบรูที่ย่านความเร็วต่ำจะมีขนาดกว้างกว่าย่านความเร็วสูง ในขณะที่ความหนา 10 mm ลูกกระสุนสะท้อนกลับทางด้านหน้าของวัสดุมีเพียงรอยยุบลักษณะวงกลมขนาดเล็กจำนวนสองวงซ้อนกันที่เกิดจากลูกกระสุนเข้าปะทะ ไม่เกิดลักษณะการแตกรูปทรงกรวยเหมือนที่ความหนาอื่น แต่จะเกิดเพียงรอยร้าวภายในเนื้อวัสดุเท่านั้น ส่วนทางด้านหลังของวัสดุยังคงมีพื้นผิวที่เรียบเหมือนเดิมและมีรอยแตก ส่วนที่ความเร็วสูง ทางด้านหน้าของวัสดุมีเพียงรอยยุบลักษณะวงกลมที่มีขนาดใหญ่กว่ากรณีความหนา 10 mm ที่ย่านความเร็วต่ำ และมีรอยร้าวเล็กจำนวนมากรอบวงกลม ที่เกิดจากลูกกระสุนเข้าปะทะ รอยแตกทางด้านหลังมีลักษณะเป็นทรงกรวยที่ชัดเจนโดยมีปลายทรงกรวยออกมาจากจุดเข้าปะทะทางด้านหน้าของวัสดุ

สารประกอบเส้นใยคาร์บอน ที่ขนาดความหนา 1.8mm และความเร็วต่ำ แผ่นทะลุ รอยแตกมีลักษณะเป็นรูทะลุจากด้านหน้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเนื่องจากเป็นการแตกบริเวณระหว่างรอยต่อของเส้นใย และทำให้รอยแตกทางด้านหลังมีลักษณะเป็นเส้นตรงทำมุมฉากซึ่งกันและกันและมีรอยนูนคล้ายพีระมิด ส่วนที่ความเร็วสูง ลักษณะของการทะลุมีเส้นใยที่ฉีกขาดออกจากกันได้อย่างชัดเจน เนื่องจากวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์เป็นวัสดุเปราะเมื่อเกิดการกระแทกที่ความเร็วสูงจึงแตกและกระจายออก ในขณะเดียวกันที่ความหนา 5 mm ความเร็วต่ำลูกกระสุนสะท้อน แผ่นเส้นใยคาร์บอนบริเวณผิวด้านหน้าของวัสดุจะมีรอยแตกเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเนื่องจากเป็นการแตกที่ระหว่างรอยต่อของเส้นใย โดยจะสังเกตเห็นเส้นใยที่ผิวหน้าเกิดการฉีกขาดอย่างชัดเจน ส่วนทางด้านหลังมีลักษณะนูนขึ้นมาเล็กน้อย ส่วนที่ความเร็วสูงความลึกของลูกกระสุนมีความลึกที่มากกว่ากรณีที่ลูกกระสุนเข้าปะทะที่ย่านความเร็วต่ำ ทำให้เห็นเส้นใยที่ผิวหน้าเกิดการฉีกขาดชัดเจนยิ่งขึ้น และฉีกขาดลึกเข้าไปที่ชั้นคาร์บอนด้านใน

สารประกอบเส้นใยเคฟล่า แผ่นความหนา 5 mm ที่ความเร็วต่ำเกิดรอยแตกเกิดจากการสะท้อนของลูกกระสุนซึ่งบริเวณผิวด้านหน้าของวัสดุจะมีรอยแตกเป็นหลุมยุบลงไปในเนื้อเส้นใยที่อยู่ด้านบนผิววัสดุ ทำให้เกิดการฉีกขาดและบริเวณรอบรอยยุบจะสังเกตเห็น Epoxy ที่แตก ส่วนที่ความเร็วสูง พบว่าพฤติกรรมของวัสดุเป็นแบบทะลุ รอยแตกมีลักษณะเป็นรูทะลุจากด้านหน้าถึงด้านหลังดัง ทางด้านหน้ามีลักษณะเป็นหลุมทรงกลมโดยที่เส้นใยเกิดการฉีกขาด แต่ตัวเส้นใยยังมีความหนาแน่นอยู่จึงไม่สามารถมองผ่านรอยทะลุไปได้ และมีการแตกของ Epoxy บริเวณรอบ ๆ ส่วนทางด้านหลังมีเส้นใยจำนวนมากกระจุกตัวอย่างหนาแน่นอยู่บริเวณรูที่เกิดการทะลุ แต่ที่ความหนา 10 mm ลูกกระสุนสะท้อนกลับที่ความเร็วต่ำ บริเวณผิวด้านหน้าของวัสดุจะมีรอยแตกเป็นหลุมยุบลงไปในเนื้อวัสดุ เส้นใยเคฟล่าบริเวณชั้นที่อยู่ด้านบนที่ติดกับผิววัสดุเกิดการฉีกขาดเล็กน้อย ที่ความเร็วสูงลูกกระสุนฝังอยู่ในตัวชิ้นงาน รอยทะลุไปถึงด้านหลังจนสามารถเห็นลูกกระสุนได้ และมีเส้นใยจำนวนมากกระจุกตัวอย่างหนาแน่นอยู่บริเวณรูที่เกิดการทะลุ

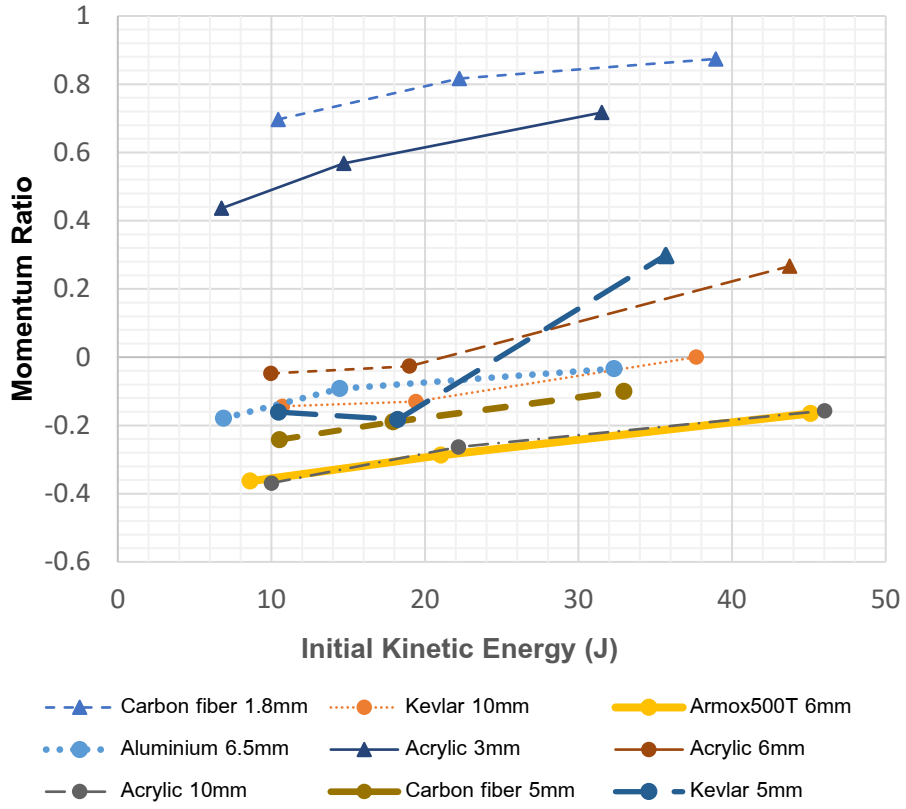
จากผลการทดสอบในตารางที่ 1 สามารถสรุปได้ในรูปแบบของพลังงานจลน์ตั้งต้นเทียบกับอัตราส่วนของโมเมนตัมหลังต่อโมเมนตัมก่อนการชนตามรูปที่ 3 โดยอัตราส่วนโมเมนตัมที่เป็นบวกหมายถึงลูกกระสุนยังเดินทางในแนวเดิมและเกิดการทะลุของแผ่นรอง ในขณะที่อัตราส่วนโมเมนตัมที่เป็นลบหมายถึงลูกกระสุนเกิดการสะท้อนกลับทำให้ค่าความเร็วกลับทิศได้ ซึ่งวัสดุที่ดีควรมีค่าอัตราส่วนโมเมนตัมติดลบให้มากที่สุด ซึ่งหมายถึงกระสุนกระเด้งกลับหมด และแผ่นรองเกิดการดูดซับพลังงานน้อย มีความแข็งแกร่งเหมาะสม จากรูปจะเห็นได้ว่าแผ่นเหล็กกันกระสุนมีสมบัติที่ดีในย่านความเร็วของการทดสอบ ในขณะที่แผ่นสารประกอบเสริมเส้นใยทั้งสองประเภทมีสมบัติที่ดีต่อการกันกระแทก และเมื่อพิจารณาอะคริลิคหนาก็มีพฤติกรรมที่ดีในย่านความเร็วนี้ด้วย จึงเหมาะที่จะใช้อะคริลิคสำหรับเป็นวัสดุกันกระแทกที่ความเร็วต่ำได้

ตารางที่ 3 พฤติกรรมการเสียรูปหลังการกระแทก

ประเภทวัสดุ	ความเร็วต่ำ		ความเร็วสูง	
	ด้านหน้า	ด้านหลัง	ด้านหน้า	ด้านหลัง
เหล็กกันกระสุน 6mm	ลักษณะเหมือนความเร็วสูง แต่รอยตื้นกว่า	สะท้อน		สะท้อน
อะลูมิเนียม 6.5mm	ลักษณะเหมือนความเร็วสูง แต่รอยตื้นกว่า	สะท้อน		สะท้อน
อะคริลิค 3mm				
อะคริลิค 10mm				
สารประกอบเส้นใยคาร์บอน 1.8mm				
สารประกอบเส้นใยคาร์บอน 5mm		ไม่ทะลุ		ไม่ทะลุ
สารประกอบเส้นใยเคฟลาร์ 5mm		ไม่ทะลุ		
สารประกอบเส้นใยเคฟลาร์ 10mm		ไม่ทะลุ		ไม่ทะลุ

3.2 ผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการสอบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นไปตามตารางที่ 4 โดยเปรียบเทียบความเร็วที่สะท้อนหลังปะทะของผลการจำลองกับการทดสอบ ผลที่ได้ออกมามีความผิดพลาดในช่วง 0–15% ซึ่งความคลาดเคลื่อนมาจากค่าคงที่ของวัสดุที่นำมาจากฐานข้อมูล ส่วนผลของอะคริลิคมีความคลาดเคลื่อนสูงจึงมิได้นำมาพิจารณาต่อ

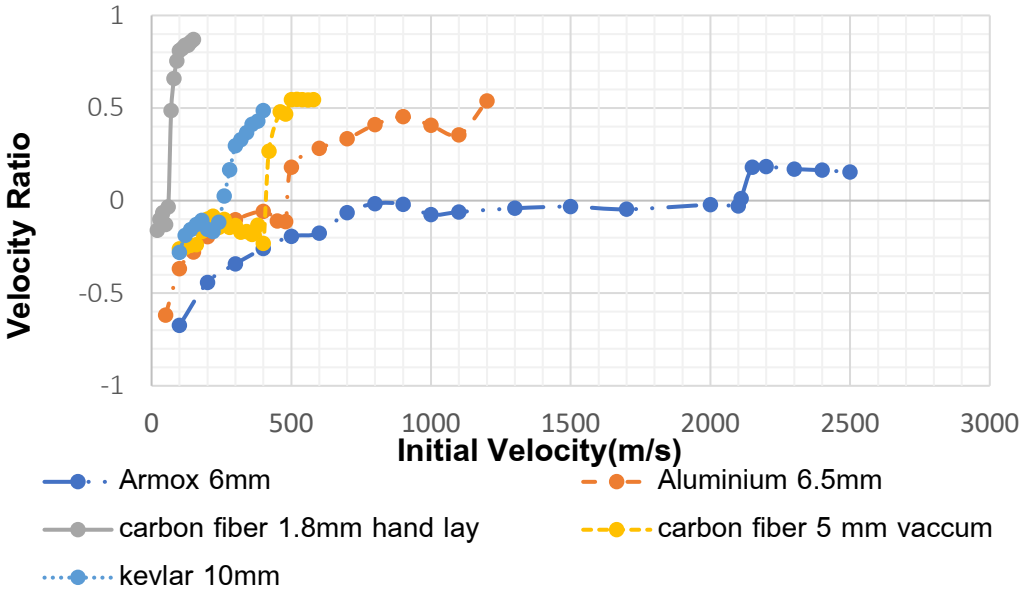


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ก่อนกระแทกกับอัตราส่วนโมเมนตัมหลังต่อโมเมนตัมก่อนกระแทก

ตารางที่ 4 ผลการสอบเทียบความเร็วของแบบจำลองกับการทดสอบ

ประเภทวัสดุ	ความหนาแผ่น [mm]	ความเร็วเข้าปะทะ [m/s]	ผลการทดสอบความเร็วสะท้อน [m/s]	ผลแบบจำลองความเร็วสะท้อน [m/s]	% Error
Armox500T	6	131.35	-47.75	-54.54	14.22
		205.13	-58.91	-65.11	10.53
		300.37	-49.52	-56.76	14.62
AA7075-T651	6.5	117.39	-21.05	-22.77	8.17
		169.98	-15.68	-15.88	1.28
		254.19	-8.58	-8.36	2.56
Carbon fiber	1.8	144.54	100.73	85.25	15.38
		210.85	172.25	151.96	11.78
		279.04	243.90	207.15	15.07
Kevlar fiber	10	146.42	-21.06	-21.42	1.71
		197.02	-25.64	-27.84	8.58
		274.43	0	0	0

แบบจำลองเมื่อถูกสอบเทียบกับการทดสอบแล้วได้ถูกนำมาขยายผล โดยการจำลองในช่วงขนาดความเร็วที่ไม่สามารถทดสอบได้ ได้ผลตามรูปที่ 4 โดยแสดงผลในรูปของอัตราส่วนความเร็วหลังการปะทะต่อความเร็วก่อนการปะทะ (Velocity Ratio) และความเร็วก่อนการปะทะ (Initial Velocity) ค่าอัตราส่วนเป็นลบคือการสะท้อน เป็นบวกคือการทะลุ พบว่าทุกวัสดุมีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงคล้ายกันคือ เมื่อใช้ความเร็วในการเข้าปะทะที่ต่ำ พฤติกรรมหลังการปะทะจะเป็นการสะท้อน เมื่อใช้ความเร็วเข้าปะทะน้อยลงอัตราส่วนของความเร็วจะมีค่าเข้าใกล้ –1 เมื่อเพิ่มความเร็วในการปะทะสูงขึ้นอัตราส่วนความเร็วจะเข้าใกล้ศูนย์หมายถึงกระสุนจะเกิดการฝังตัวในเนื้อวัสดุ และเมื่อเพิ่มความเร็วปะทะมากขึ้นไปอีกจะเกิดการทะลุโดยที่อัตราส่วนมากกว่าศูนย์ และเมื่อใช้ความเร็วในการเข้าปะทะสูงขึ้นอัตราส่วนความเร็วจะมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งพฤติกรรมที่กล่าวมานั้นจะมีรายละเอียดที่แตกต่างกันเช่น ความกว้างในช่วงที่กระสุนเกิดการฝังตัวหรือความชันของกราฟ เหตุผลที่ทำให้เกิดความแตกต่างนี้เกิดจากคุณสมบัติของวัสดุทดสอบ เช่น ความหนาของวัสดุทดสอบ ชนิดของวัสดุทดสอบ ค่าสมบัติทางกลของแต่ละวัสดุทดสอบ เป็นต้น



รูปที่ 4 ความเร็วเข้าปะทะต่ออัตราส่วนความเร็วหลังต่อก่อนปะทะจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

4. การสร้างเลขไร้มิติสำหรับการออกแบบแผ่นรองกระแทก

เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบแผ่นกันกระแทกจึงได้สรุปข้อมูลตามรูปที่ 3 ในรูปแบบของตัวเลขไร้มิติ (Dimensionless number) โดยจะพิจารณาตัวแปรสำคัญที่ทำให้แต่ละวัสดุมีพฤติกรรมต่างกัน คือ มวลของกระสุนทดสอบ (m) ความหนาของวัสดุทดสอบ (l) ความเร็วก่อนการเข้าปะทะของกระสุนทดสอบ (v) ค่า Yield stress ของวัสดุทดสอบ (Y_s) หรือค่าความเค้นสูงสุดสำหรับวัสดุเปราะ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุทดสอบ (A) ทั้งหมดนี้มีมิติอยู่สามประเภทคือ kg, m และ s จากนั้นจึงกำหนดให้เป็นค่าตัวเลขไร้มิติจากสัดส่วนของพลังงานจลน์ mv^2 ต่อพลังงานในการเสียรูป $Y_s l^3$ และสัดส่วนของแผ่นรองกระแทก ในรูปของตัวเลขการกระแทก (impact number) โดยมีนิยามคือ

$$Impact\ number = \frac{kinetic\ energy}{maximum\ stress * impact\ volume}\frac{area}{(thickness)^2} = \frac{mv^2}{(Y_s l^3)}\frac{A}{l^2} = \frac{mv^2 A}{Y_s l^5} \quad (1)$$

จากการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรไร้มิติแล้วสามารถสรุปผลของพฤติกรรมในแต่ละวัสดุได้ดังตารางที่ 5

เลขไร้มิติที่นำเสนอนี้สามารถนำมาใช้สำหรับประมาณการขนาดแผ่นรองกันกระแทกในเบื้องต้นได้ แต่ยังขาดอีกหลายองค์ประกอบ ทั้งลักษณะประเภทของกระสุน รูปร่างของกระสุน รูปร่างของแผ่นที่นำมาทดสอบ สมบัติวัสดุที่สำคัญในการวิเคราะห์ความแข็งแรงเช่น

fracture toughness และ strain rate และ ความหนาแน่นของวัสดุ และการสอบเทียบยังจำกัดเฉพาะวัสดุที่ยังศึกษาอีกด้วย ตัวเลขไร้มิติที่นำเสนอจึงเป็นการศึกษาขั้นต้นเพื่อหาทฤษฎีโดยรวมสำหรับศึกษาและออกแบบแผ่นรองกระแทกต่อไป

ตารางที่ 5 ผลสรุปของจากตัวเลขไร้มิติของแต่ละวัสดุ

ประเภทวัสดุ	Impact number	พฤติกรรม
AA7075-T651	< 46.305	สะท้อน
	> 740.889	ทะลุ
เหล็กกันกระสุน	< 896.05	สะท้อน
	> 1157.63	ทะลุ
สารประกอบเส้นใยคาร์บอน	< 120.30	สะท้อน
	> 163.74	ทะลุ
สารประกอบเส้นใยเคฟลาร์	< 334.45	สะท้อน
	> 455.22	ทะลุ

5. สรุปผล

ในงานนี้ได้ศึกษาสมบัติในการรับแรงกระแทกของวัสดุ โดยใช้การทดสอบยิงด้วยปืนอัดลม การวิเคราะห์ผลของพฤติกรรมในแต่ละวัสดุจะแบ่งเป็น 2 รูปแบบคือ วิเคราะห์ผลของความเสียหายทางกายภาพ และวิเคราะห์ในลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนตัมที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับความเร็วลูกกระสุนเข้าปะทะ จากผลการทดลองนำผลลัพธ์ที่ได้มาขยายผลเพิ่มเติมโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยวิเคราะห์ผลในช่วงความเร็วเข้าปะทะที่กว้างขึ้น วัสดุมีแนวโน้มของพฤติกรรมชัดเจนและสามารถนำผลจากแบบจำลองมาสร้างตัวเลขไร้มิติที่เป็นค่าคงที่ที่จะบ่งบอกถึงพฤติกรรมของวัสดุได้ ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบหรือตัดสินใจในการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับงานที่เกี่ยวข้องกับการกระแทกในเบื้องต้น อย่างไรก็ตามตัวเลขไร้มิตินี้ยังมีข้อจำกัดในส่วนของประเภทของวัสดุที่ทำการศึกษาเท่านั้น และยังมีองค์ประกอบส่วนอื่นที่ต้องสอบเทียบและศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Alavi Nia, A., Hoseini, G.R. Experimental study of perforation of multi-layered target by hemispherical-nosed projectiles. Materials and Design. 2011 (32):1057-1065.

[2] Ben-dor, G., Dubinsky, A., Elperin, T. On the ballistic resistance of multi-layered targets with air gaps. International Journal of Solids and Structures. 1998 35(23):3097-3103.

[3] Elek, P., Jaramaz, S., Mickovic, D. Modeling of perforation of plates and multi-layered metallic targets. International Journal of Solids and Structures. 2005 (42):1209-1224.

[4] ASM International, "ASM Handbook Vol 8 Mechanical Testing and Evaluation", ASM International, Materials Park, OH.

[5] Chen W.N., Song B.. Split Hopkinson (Kolsky) Bar Design, Testing and Applications. Springer, 2011.

[6] Iqbal, M.A., Senthil, K., Sharma, P., Gupta, N.K. An investigation of the constitutive behavior of Armox 500T steel and armor piercing incendiary projectile material. International Journal of Impact Engineering 2016:146-164.

[7] Flores-Johmson, E.A. Numerical investigation of the impact behaviour of bioinspired nacre-like aluminium composite plates. Composites Science and Technology. 2014 96:13-22.

[8] Khanketr T., Phongphinittana E., Patamaprohm, B. Design of CFRP composite monocoque: Simulation approach. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019 DOI 10.1088/1757-899X/501/1/012014