

การพัฒนาวัสดุผสมชนิดใหม่เพื่อต้านทานซีปนาวุธในการใช้งานเกราะกันกระสุน



นายธีระนันท์ มาลัยวงศ์

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

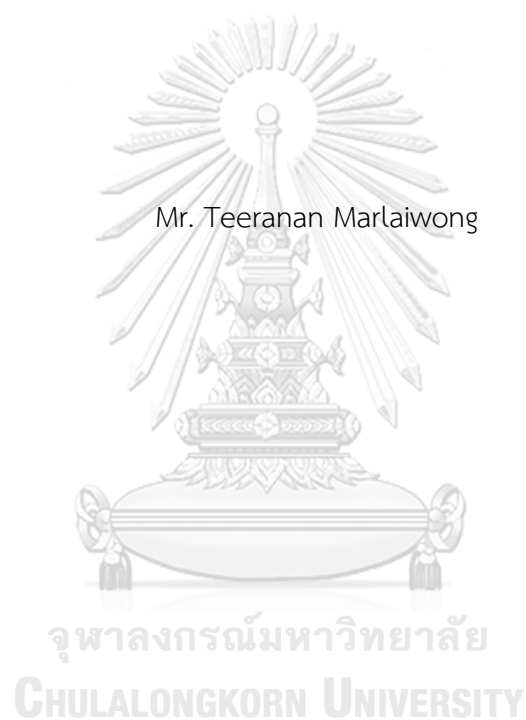
ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

DEVELOPMENT OF NOVEL COMPOSITE MATERIALS FOR BALLISTIC RESISTANCE  
IN ARMOR APPLICATIONS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Defense Engineering and  
Technology

Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาวัสดุผสมชนิดใหม่เพื่อต้านทานซีปนาวุธในการใช้งานเกราะกันกระสุน
โดย	นายธีระนันท์ มัลย์วงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พันเอก ดร. ณัฐพร นุตยะสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิฑิต ปานสุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พันเอก ดร. ณัฐพร นุตยะสกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรียรัตน์ ผลศิลป์)

ธีระนันท์ มาลัยวงศ์ : การพัฒนาวัสดุผสมชนิดใหม่เพื่อต้านทานซิปนาวุธในการใช้งานเกราะกันกระสุน (DEVELOPMENT OF NOVEL COMPOSITE MATERIALS FOR BALLISTIC RESISTANCE IN ARMOR APPLICATIONS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. พันเอก ดร. ญัฐพร นุตยะสกุล, หน้า.

การพัฒนาผนังวัสดุผสมจากยางพารามาตรฐาน STR 5L เพื่อการป้องกันกระสุน โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อการป้องกันกระสุน เช่น ความหนาของวัสดุผสม, การเรียงลำดับชั้นวัสดุผสมที่เลือกใช้ในการออกแบบ และการเลือกใช้วัสดุ เป็นต้น และต้องพิจารณาถึงน้ำหนักที่มีความเหมาะสมในการใช้งาน รวมถึงต้นทุนในการผลิตจริง ซึ่งการวิเคราะห์ผลการวิจัยจะใช้ ทฤษฎีพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการจำลองการทดสอบความเร็วต่ำในห้องปฏิบัติการและการทดสอบยิงกระสุนจริงภาคสนาม ตามมาตรฐานการทดสอบ EN1 522 โดยการนำยางพารา STR 5L ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแล้วมาขึ้นรูปโดยการอัดโดยการเสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก มาทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า การเสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็กทำให้วัสดุสามารถรับแรงเจาะทะลุได้เพิ่มขึ้นโดยสามารถเพิ่มขึ้นสูงสุดได้เท่ากับ 5 ชั้น ต่อความหนาขึ้นงานเท่ากับ 12 mm โดยคิดเป็นอัตราส่วนเท่ากับ 2.4 mm/Layer ซึ่งการเพิ่มขึ้นของจำนวนลวดตาข่ายเหล็กส่งผลโดยตรงกับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานทดสอบวัสดุผสม โดยการเพิ่มจำนวนชั้นลวดที่ 5 ชั้นมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ  $1,975.9 \text{ kg/m}^3$  และมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่เสริมด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็กคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 6.7% และมีค่าพลังงานการแตกหักเท่ากับ  $126,679.34 \text{ J/m}^2$  มีความคลาดเคลื่อน 25% และมีค่า Ultimate Tensile Strength เท่ากับ  $5.01 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  และมีค่า Yield Strength 2% เท่ากับ  $0.588 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  และมีค่า Young's Modulus เท่ากับ 0.05 GPa เมื่อนำไปทดสอบการยิงด้วยกระสุนจริงพบว่าวัสดุผสมตามด้วยแผ่นอลูมิเนียมสามารถให้ความหนาที่ใช้ในการป้องกันกระสุนน้อยกว่า การใช้แผ่นอลูมิเนียมประกบหน้าวัสดุผสมถึง 54%-60% ซึ่งมีขนาดความหนาและน้ำหนักที่เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ ARMORCOR โดยมีความหนาน้อยกว่าเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 0.72% และมีความหนามากกว่าเท่ากับ 106% และมีน้ำหนักต่ำสุดน้อยกว่า 0.018 % และมีน้ำหนักสูงสุดมากกว่า 132% ตามลำดับ

สาขาวิชา วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกัน ลายมือชื่อนิสิต .....

ประเทศ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2560 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5870174121 : MAJOR DEFENSE ENGINEERING AND TECHNOLOGY

KEYWORDS: STRL / NATURAL RUBBER COMPOSITED / BALLISTIC WALL / FRACTURE ENERGY

TEERANAN MARLAIWONG: DEVELOPMENT OF NOVEL COMPOSITE MATERIALS FOR BALLISTIC RESISTANCE IN ARMOR APPLICATIONS. ADVISOR: SEKSAK ASAVAVISITHCHAI, Ph.D., CO-ADVISOR: NUTHAPORN NUTTAYASAKUL, Ph.D., pp.

A Development of novel composite material for ballistic resistance form STR 5L is not only considering keys parameters such as thickness of material, arrangement , matrix and reinforcement material but also realizes the effective weight and manufacturing cost. The kinetic energy is referred for ballistic energy calculation and analysis to compare the result between low velocity and high velocity basing on EN1522 Level FB5. The specimen is mixed between STR 5L matrix and steel nets reinforcement were combined, which is formed together by compressed mold. The result founded that the reinforcement by 5 layers of steel net which maximum 12 mm. of thickness specimen can be increased kinetic energy. The ratio between layer and thickness is 2.4 mm/Layer. Increasing of reinforcement layer being directly affect to density of specimen is  $1,975.9 \text{ kg/m}^3$  for maximum or 6.7 percentages against without reinforcement. The fracture energy is  $126,679.34 \text{ J/m}^2$ , Which has approximately error equal 25%. After tensile testing based on ASTM D3039, Founded that, Ultimate Tensile Strength is  $5.01 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ : Yield Strength 2% is  $0.588 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  and Young's Modulus is 0.05 GPa. The result of ballistic testing founded that composite together with each thickness of aluminum grade 5083 backing is the better capacity interm of minimum weight and thickness than aluminum front covering by 54%-60%. The output of product is similarly to ARMORECORE with 28 mm of thickness and  $5.3 \text{ kg/ft}^2$ , which total specimen weight, is lower than 0.018% and 132% for minimum and maximum consequently and comparison thickness is lower than 0.72% 106% for maximum.

Field of Study: Defense Engineering and Technology      Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2017

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความกรุณาและความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ ซึ่งขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ได้ สละเวลาในการตรวจสอบ แนะนำ ให้ความรู้ในการเขียนวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พันเอก ดร. ณัฐพร นุตยะสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมจากโรงเรียนนาย ร้อยพระจุลจอมเกล้า จังหวัด นครนายก ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และคอย ประสานงานต่างๆที่เกี่ยวกับการทดสอบในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบทุกท่านที่ได้เสียสละเวลาในการเดินทาง เพื่อเป็น กรรมการในการสอบและตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่บริหารหลักสูตรที่คอยแนะนำแนวทางการเรียนตั้งแต่เริ่มต้น เข้ารับการศึกษานจนจบการศึกษา และขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทหารคลังสรรพาวุธ ทุกท่าน จากโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จ.นครนายก ที่ช่วยเหลือในการทดสอบงานวิจัยนี้ ให้สำเร็จ ทั้งในเรื่องการเตรียมสถานที่ อาวุธปืน M16 และกระสุนปืน M16

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยยางแห่งชาติ ที่อำนวยความสะดวกในการขึ้นรูปชิ้นงาน ตลอดจน ความรู้ต่างๆที่เกี่ยวข้อง และขอขอบพระคุณ บริษัท แมทเทคแปซิฟิก จำกัด ที่รับเป็นภาระในการ นำเข้าเครื่องวัดความเร็วกระสุนที่ใช้ในการทดสอบนี้จากประเทศจีน หวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจไม่มากนักน้อย สำหรับพัฒนาต่อไป



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่2 ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความเป็นมาของป้อมสนามและพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของวัตถุกระสุน.....	4
2.2 ลักษณะการเสียรูป (Failure mode).....	19
2.3 เครื่องมือและการทดสอบแรงกระแทกในห้องทดลอง.....	26
2.4 วัสดุผสม.....	33
2.5 ยางพารา.....	44
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	53
บทที่3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	72
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย.....	72
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	72
3.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและเครื่องมือทดสอบ.....	74

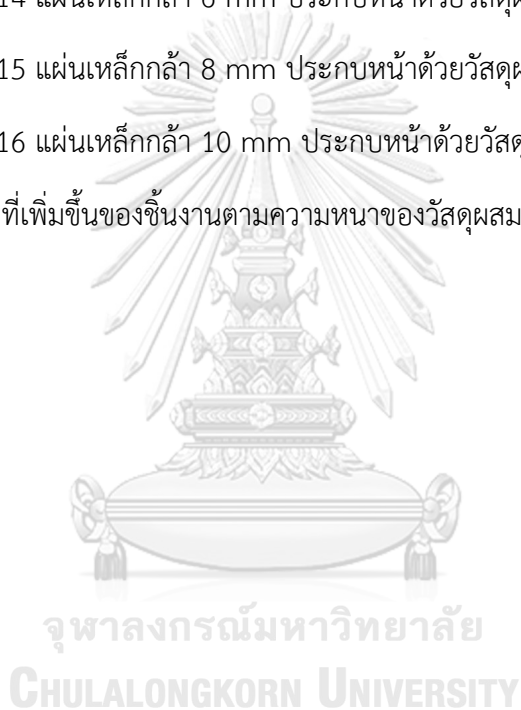
3.4	วิธีดำเนินการทดสอบ.....	90
บทที่ 4	ผลการวิจัย.....	94
4.1	ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน .....	94
4.2	ผลการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ .....	95
4.2.1	ผลของการเพิ่มจำนวนชั้นของลวดตาข่ายเหล็ก .....	95
4.3	ความต้านทานแรงดึง.....	100
4.4	ผลการทดสอบการดูดซับพลังงานของวัสดุจากการยิงกระสุนปืน.....	107
บทที่ 5	วิจารณ์ผลการวิจัย.....	148
5.1	ผลของการใช้วัสดุผสมที่มีจำนวนชั้นลวดตาข่ายเหล็กต่างกันต่อการป้องกันกระสุน .....	148
5.2	ผลของการใช้โลหะและวัสดุผสมต่อการป้องกันกระสุน .....	150
5.3	ผลของการใช้แผ่นโลหะประเภทที่ต่างกันที่มีผลต่อความหนาในการป้องกันกระสุน.....	152
บทที่ 6	บทสรุป .....	156
6.1	บทสรุปงานวิจัย .....	156
6.2	ปัญหาที่เกิดขึ้น .....	157
6.3	ข้อเสนอแนะ.....	157
	.....	159
	รายการอ้างอิง .....	159
	ภาคผนวก.....	163
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	190

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงรายการมาตรฐานการทดสอบ [3] .....	9
ตารางที่ 2.2 สรุปผลการทดสอบให้เป็นไปตามข้อกำหนด [3].....	10
ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงพลังงานในการเคลื่อนที่ของกระสุนปืนเอ็ม-16 กับกระสุนปืนที่ใช้ทดสอบสี่กระแกระดับ IIIA และ III [9] .....	16
ตารางที่ 2.4 วัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์ที่ใช้งานในปัจจุบัน [21].....	34
ตารางที่ 2.5 ประเภทของวัสดุผสมแบบเส้นใย [18] .....	35
ตารางที่ 2.6 แผ่นวัสดุผสมที่ใช้ในการทดสอบ [13] .....	62
ตารางที่ 2.7 สรุปลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานแต่ละแบบ [31] .....	65
ตารางที่ 2.8 ผลการทดสอบการเจาะทะลุ [32] .....	68
ตารางที่ 2.9 แสดงคุณสมบัติทางกลของวัสดุทดสอบ [34].....	69
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบสำหรับอัดขึ้นรูปชิ้นงานยางพารา [35] .....	76
ตารางที่ 3.2 แสดงลำดับชั้นของผนังกันกระสุน .....	77
ตารางที่ 3.3 แสดงความหนาของแผ่นยางในแต่ละชั้นสำหรับแม่พิมพ์ขนาดความหนา 12 mm.....	81
ตารางที่ 3.4 แสดงชิ้นงานสำหรับการทดสอบการเจาะทะลุและการทดสอบแรงกด .....	84
ตารางที่ 3.5 แสดงชิ้นงานแผ่นประกบหน้าสำหรับการทดสอบด้วยกระสุนจริง .....	85
ตารางที่ 3.6 แสดงชิ้นงานสำหรับการทดสอบยิงด้วยกระสุนจริง .....	86
ตารางที่ 3.7 แสดงชิ้นงานสำหรับการทดสอบยิงด้วยกระสุนจริง .....	87
ตารางที่ 3.8 แสดงชิ้นงานสำหรับการทดสอบแผ่นอะลูมิเนียมประกบหลังยิงด้วยกระสุนจริง .....	88
ตารางที่ 3.9 แสดงชิ้นงานสำหรับการทดสอบแผ่นเหล็กกล้าประกบหลังยิงด้วยกระสุนจริง .....	89
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานวัสดุผสมจากยางพาราขนาด 30.5 x 30.5 cm ที่ขนาดความหนา 12 mm (ค่าเฉลี่ย) .....	94
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุชิ้นงานที่ขนาดความหนา 12 mm.....	96
ตารางที่ 4.3 แสดงความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วที่ต่างกัน .....	99

ตารางที่ 4.4 แสดงพลังงานการแตกหักจากการทดสอบเจาะทะลุชิ้นงานเสริมลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น.....	99
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนจากสมการที่ได้จากการทดลอง.....	100
ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบความต้านทานแรงดึง .....	101
ตารางที่ 4.7 ความหนาแน่นของแผ่นอะลูมิเนียม.....	109
ตารางที่ 4.8 พลังงานจลน์จากการทดสอบการยิงกระสุนจริงสำหรับแผ่นอะลูมิเนียม A 5083.....	109
ตารางที่ 4.9 ลักษณะความเสียหายแผ่นอะลูมิเนียม .....	110
ตารางที่ 4.10 ลักษณะความเสียหายของแผ่นเหล็กกล้า .....	114
ตารางที่ 4.11 ความหนาแน่นของแผ่นเหล็กกล้า ขนาด 30.5 x 30.5 cm.....	115
ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบการยิงกระสุนจริงสำหรับแผ่นเหล็กกล้า.....	115
ตารางที่ 4.13 กลุ่มที่ 1 วัสดุผสม.....	116
ตารางที่ 4.14 ลักษณะความเสียหายของวัสดุผสมที่ขนาดความหนา 12 mm.....	119
ตารางที่ 4.15 กลุ่มที่ 1 วัสดุผสม แบบเรียงซ้อนกันโดยเสริมลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น .....	120
ตารางที่ 4.16 กลุ่มที่ 2 แผ่นอะลูมิเนียมหนา 6 mm ประกอบด้วยแผ่นวัสดุผสมเสริมลวดตาข่าย 5 ชั้น .....	122
ตารางที่ 4.17 กลุ่มที่ 3 แผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 mm ประกอบด้วยแผ่นวัสดุผสมเสริมลวดตาข่าย 5 ชั้น.....	124
ตารางที่ 4.18 กลุ่มที่ 4 แผ่นอะลูมิเนียมหนา 10 mm ประกอบแผ่นวัสดุผสมเสริมลวดตาข่าย 5 ชั้น.....	126
ตารางที่ 4.19 กลุ่มที่ 5 แผ่นอะลูมิเนียมหนา 12 mm ประกอบแผ่นวัสดุผสมเสริมลวดตาข่าย 5 ชั้น	128
ตารางที่ 4.20 ลักษณะความเสียหายของชิ้นงานแบบแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้า .....	131
ตารางที่ 4.21 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อการเพิ่มความหนาของการเรียงตัวแบบแผ่นอะลูมิเนียมประกบ หน้าวัสดุผสม.....	132
ตารางที่ 4.22 กลุ่มที่ 6,7,8,9 แผ่นเหล็กหนา 6, 8, 10 , 12 mm ตามลำดับ.....	134
ตารางที่ 4.23 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานตามความหนาของวัสดุเหล็กกล้าและวัสดุผสม .....	135

ตารางที่ 4.24	กลุ่มที่ 10	แผ่นอะลูมิเนียม 6 mm	ประกบหน้าด้วยวัสดุผสม	138
ตารางที่ 4.25	กลุ่มที่ 11	แผ่นอะลูมิเนียม 8 mm	ประกบหน้าด้วยวัสดุผสม	139
ตารางที่ 4.26	กลุ่มที่ 12	แผ่นอะลูมิเนียม 10 mm	ประกบหน้าด้วยวัสดุผสม	140
ตารางที่ 4.27	กลุ่มที่ 13	แผ่นอะลูมิเนียม 12 mm	ประกบหน้าด้วยวัสดุผสม	141
ตารางที่ 4.28	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานตามความหนาของวัสดุผสมและแผ่นอะลูมิเนียม			142
ตารางที่ 4.29	ลักษณะความเสียหายของชิ้นงานแบบแผ่นอะลูมิเนียมประกบหลัง			143
ตารางที่ 4.30	กลุ่มที่ 14	แผ่นเหล็กกล้า 6 mm	ประกบหน้าด้วยวัสดุผสม	144
ตารางที่ 4.31	กลุ่มที่ 15	แผ่นเหล็กกล้า 8 mm	ประกบหน้าด้วยวัสดุผสม	145
ตารางที่ 4.32	กลุ่มที่ 16	แผ่นเหล็กกล้า 10 mm	ประกบหน้าด้วยวัสดุผสม	146
ตารางที่ 4.33	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานตามความหนาของวัสดุผสมและแผ่นเหล็กกล้า			147



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 รูปแบบป้อมสนามที่ใช้กระสอบบรรจุทราย [4] .....	5
รูปที่ 2.2 คลังเก็บวัตถุระเบิดและที่กำบังจากคอนกรีตเสริมเหล็ก [5] .....	5
รูปที่ 2.3 การเตรียมการทดสอบวัสดุป้องกันกระสุน [3] .....	11
รูปที่ 2.4 โมเมนตัมที่เกิดขึ้นใน 2 ช่วงเวลาระหว่างการชน [7] .....	12
รูปที่ 2.5 การชนแบบผ่านจุดศูนย์กลางมวล [7] .....	12
รูปที่ 2.6 การชนแบบไม่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล [7] .....	14
รูปที่ 2.7 ลักษณะของ Projectile โดยทั่วไปที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ Ballistic impact ได้ ดังนี้ a) Fragment simulating projectile b) Browning machine gun ammunition c) Spherical hard ceramic or metal ball และ d) blunt, hemispherical and flat head (ขนาดโดยทั่วไปตั้งแต่ 0.22-0.50 mm) [8] .....	14
รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบขนาดและลักษณะของกระสุนเอ็ม-16 (ซ้าย) กระสุน .30-30 mm (กลาง) และกระสุน 7.62 mm (ขวา) [10] .....	15
รูปที่ 2.9 ลักษณะส่วนประกอบทั่วไปของวัตถุกระสุน (Modern centerfire ammunition) a) Bullet, Primer, Propellant, Case. และ b) Shot shell cartridge and parts [10] .....	16
รูปที่ 2.10 ลักษณะบรรจุภัณฑ์และการจำแนกประเภท [8] .....	17
รูปที่ 2.11 รูปแบบพื้นฐานของการเกิดรอยแยก [11] .....	19
รูปที่ 2.12 รูปแบบความเสียหายเกิดจากตัวกระแทก [12] .....	20
รูปที่ 2.13 ลำดับการเคลื่อนที่ของตัวกระแทกผ่านวัสดุผสมแบบแผ่น [8] .....	21
รูปที่ 2.14 ลักษณะการเกิดแรงเฉือนของบริเวณที่มีการเจาะทะลุ [13] .....	21
รูปที่ 2.15 ลักษณะการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรง (Load) และระยะการขจัด (Displacement) ซึ่งใช้วัสดุผสมประสานด้วยเรซิน [13] .....	22
รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการเคลื่อนที่ของวัสดุผสมที่มีการ จัดเรียงตามองศา และมีจำนวนชั้นเท่ากับ 4 ชั้น [13] .....	22
รูปที่ 2.17 ลักษณะจุดสำคัญจากการเปลี่ยนแปลงของแรงและวัสดุ [14] .....	23

รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการขจัด ที่เปลี่ยนไปตามความหนาของวัสดุ [14] .....	24
รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานต่อความหนา โดยเปรียบเทียบทั้งความเร็วต่ำและความเร็วสูง [15] .....	24
รูปที่ 2.20 แสดงการแตกหักของแผ่นวัสดุผสม [16].....	25
รูปที่ 2.21 แสดงความเสียหายในแต่ละโซนของวัสดุผสมแบบแผ่น โดย region I:shear of fiber, region II: tensile of fiber failure, และ region III: tensile of fiber failure and delamination [17].....	25
รูปที่ 2.22 การทดสอบแบบ Izod และ Charpy [13] .....	26
รูปที่ 2.23 เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบความเร็วต่ำโดยการปล่อยวัตถุตกกระทบ [8] .....	27
รูปที่ 2.24 เครื่องปล่อยวัตถุ 1) แม่เหล็ก 2) ตัวตกกระทบ 3)แท่นจับ 4)วัสดุทดสอบ [15].....	28
รูปที่ 2.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง-เวลา และ พลังงาน-เวลา [8].....	28
รูปที่ 2.26 เครื่องทดสอบแบบแกว่งท่อ (Pendulum tube impactor) 1) Impactor 2) Holder 3) Specimen [15].....	29
รูปที่ 2.27 อุปกรณ์ทดสอบแบบ Hopkinson-type pressure bar 1) Projectile 2) Input bar 3) Strain gauge 4) Specimen [15].....	29
รูปที่ 2.28 อุปกรณ์ทดสอบแบบ Cantiliver type 1) Flexible beam 2) Accelerometer 3) Mass 4) Specimen [15].....	30
รูปที่ 2.29 Gas-gun 1) Air filter 2) Pressure regulator 3) Air tank 4) Valve 5) Tube 6) Velocity measuring device [15].....	30
รูปที่ 2.30 โครงสร้างประกบแบบแซนวิชด้วยจูดรองรับอย่างง่าย รับแรงจุดกึ่งกลางแผ่น [18].....	31
รูปที่ 2.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง-เวลา และ พลังงาน-เวลา พร้อมตัวแปรที่สำคัญที่ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเสียรูป [8].....	31
รูปที่ 2.32 ตัวอย่างรูปหน้าตัดของหัวเจาะทดสอบ [19] .....	32
รูปที่ 2.33 ลักษณะการจัดเตรียมชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง [20] .....	33
รูปที่ 2.34 การแบ่งประเภทของวัสดุผสม [18].....	36

รูปที่ 2.35 การเรียงตัวของวัสดุผสมในแต่ละประเภท [18].....	38
รูปที่ 2.36 การเรียงชั้นและการแสดงพิกัดอ้างอิง a) การเสริมแรงแบบเส้นทางเดียว และ b) การเสริมแรงแบบประสานของเส้นใย (Woven fabric reinforcement) [18].....	39
รูปที่ 2.37 การเสริมแรงแบบหลายทิศทางของลามิเนต (Multidirectional laminate) และการระบุพิกัดอ้างอิง [18] .....	39
รูปที่ 2.38 การเรียงลำดับการวิเคราะห์ของวัสดุผสมตั้งแต่วัสดุผสมแยกชนิดจนเป็นโครงสร้างแบบผสม (Composite structure) [18] .....	40
รูปที่ 2.39 แสดงการยึดจับชิ้นงานเพื่อเพิ่มความแข็งแรงระหว่างชั้นพื้นผิว [21] .....	42
รูปที่ 2.40 แสดงภาพตัดของโครงสร้างประกบแบบแซนวิชภายใต้แรงกระทำใดๆ [18] .....	44
รูปที่ 2.41 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (cis-1,4-polyisoprene) [25] .....	46
รูปที่ 2.42 แบบจำลองอนุภาคยางธรรมชาติ [25] .....	46
รูปที่ 2.43 โครงสร้าง CIS และ โครงสร้าง Trans ของยางธรรมชาติ [26] .....	49
รูปที่ 2.44 การอ้างอิงของตำแหน่งการจัดเรียงอ้างอิงจากแกน x [27].....	54
รูปที่ 2.45 แสดงการจัดเรียงเพื่อเป็นรูปแบบในการวิเคราะห์ FEA [27] .....	54
รูปที่ 2.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเริ่มต้นและหลังการกระแทกในแต่ละจำนวนชั้นของแผ่นผ้าที่ซ้อนกัน [27] .....	55
รูปที่ 2.47 แสดงความสัมพันธ์ที่ระหว่างความเร็วกระแทกเริ่มต้นและความเร็วหลังการกระแทก โดย a) เปรียบเทียบระหว่างการเรียงตัวและไม่เรียงตัว และ b) พลังงานที่ดูดซับจากการเรียงตัวของแผ่นผ้าทดสอบ [27].....	55
รูปที่ 2.48 รูปแบบการทดสอบ aขนาดแผ่นทดสอบ 100x100 mm รับแรงกระแทกที่จุดศูนย์กลาง b) แผ่นทดสอบเรียงซ้อนกันจำนวน 8 แผ่น ที่ความหนาแต่ละแผ่นเท่ากัน และ c) วัตถุประสงค์ที่พิจารณา [12].....	56
รูปที่ 2.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน - เวลาของวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ [12].....	56
รูปที่ 2.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน - เวลาของวัสดุ E-glass/Epoxy [12].....	57
รูปที่ 2.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน - เวลาของวัสดุ Kevlar/Epoxy [12].....	57
รูปที่ 2.52 วัสดุผสมแบบเส้นใย-โลหะ (FMLs) [28] .....	58



รูปที่ 2.53 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการทำให้วัสดุเกิดการเสียรูป [28] .....	58
รูปที่ 2.54 แสดงการเรียงลำดับชั้นของแผ่นโดยมี 3 อลูมิเนียมและ 2 GFPP [29].....	59
รูปที่ 2.55 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุของแผ่นทดสอบหลายชั้น [29].....	60
รูปที่ 2.56 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุระหว่างแผ่นประกบด้วย อลูมิเนียมเกรด 2024-O และ อลูมิเนียมเกรด 2024-T3 [29].....	60
รูปที่ 2.57 เปรียบเทียบความหนาของอลูมิเนียม 2024-T3 [29] .....	61
รูปที่ 2.58 วัสดุผสมที่มีจำนวนชั้น 32 ชั้น ทดสอบแบบความเร็วต่ำ โดยใช้พลังงาน 4.2J และ ขยายด้วยเครื่องไมโครกราฟ [13].....	62
รูปที่ 2.59 การทดสอบป้องกันกันสะเก็ดระเบิดของเกราะป้องกันแบบยางผสม [30] .....	63
รูปที่ 2.60 แสดงการทดสอบโดยใช้ระเบิดในแต่ละองศา [30] .....	63
รูปที่ 2.61 ภาพเอ็กซเรย์การกระแทกของสะเก็ดระเบิด ต่างความหนาและมุมมองรับแรง [30] ....	63
รูปที่ 2.62 การประกอบชิ้นงานและการจัดเรียงระหว่างผ้ากับยางธรรมชาติ [31].....	64
รูปที่ 2.63 แสดงรูปแบบการเย็บเพื่อเพิ่มความแข็งแรงระหว่างชั้นของชิ้นงาน [31].....	65
รูปที่ 2.64 แสดงอุปกรณ์การทดสอบ [31] .....	66
รูปที่ 2.65 ผลการทดสอบในแต่ละรูปแบบการเย็บของชิ้นงาน [31] .....	66
รูปที่ 2.66 โครงสร้างการเรียงตัวแบบเส้นใยเดี่ยว [32].....	67
รูปที่ 2.67 a) เครื่องทดสอบการเจาะทะลุ [32].....	67
รูปที่ 2.68 b) แสดงการวางชิ้นงานทดสอบ [32] .....	68
รูปที่ 2.69 ลักษณะกระสุนทดสอบ a) 9 mm. FMJ และ b) STANAG 2920 [34].....	69
รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบแรง UTM.....	72
รูปที่ 3.2 แท่นจับชิ้นงาน .....	73
รูปที่ 3.3 หัวเข็มเจาะทะลุ .....	73
รูปที่ 3.4 หัวทดสอบแรงดึงชิ้นงาน .....	74
รูปที่ 3.5 กระสุนปืน M16.....	74

รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความเร็วกระสุน .....	74
รูปที่ 3.7 ยางพารา STR 5L .....	75
รูปที่ 3.8 ลวดตาข่ายเหล็กขนาด 1/2”x1/2” ตัดขนาด 11 x 11 cm.....	75
รูปที่ 3.9 แผ่นอะลูมิเนียมตัดสำเร็จขนาด 30.5 x 30.5 cm .....	75
รูปที่ 3.10 แผ่นเหล็กตัดสำเร็จตามขนาด 30.5 x 30.5 cm.....	76
รูปที่ 3.11 แสดงโครงสร้างการเรียงตัวชิ้นงานประเภทที่ (ยางพารา+ตาข่ายเหล็ก).....	77
รูปที่ 3.12 ลวดตาข่ายเหล็กเชื่อมซ้อนติดกันด้วยกาบดกรี.....	78
รูปที่ 3.13 ยางพารา STR 5L 1,000 g.....	78
รูปที่ 3.14 เครื่องบดยางพาราและผสมสารเคมี.....	79
รูปที่ 3.15 ยาง STR 5L ที่เข้าเครื่องบดที่อุณหภูมิ 70°C.....	79
รูปที่ 3.16 ยางที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแล้ว.....	80
รูปที่ 3.17 เครื่องบดยางพาราให้ได้ขนาดความหนาตาที่ต้องการ.....	81
รูปที่ 3.18 ยางที่ผ่านการบดตามความหนาที่ต้องการแล้ว.....	81
รูปที่ 3.19 วางลวดตาข่ายเหล็กสลับกับชั้นยางพาราตามความหนาที่กำหนด.....	82
รูปที่ 3.20 ตัวอย่างชิ้นงานที่ประกบกันเรียบร้อยแล้วพร้อมใส่ลงแม่พิมพ์และเครื่องอัดตามลำดับ.....	82
รูปที่ 3.21 แม่พิมพ์เหล็กขนาด 12.5x12.5 cm.....	83
รูปที่ 3.22 แสดงขณะกำลังอัดขึ้นรูปชิ้นงานตามแม่พิมพ์.....	83
รูปที่ 3.23 ชิ้นงานทดสอบขนาด 30.5 x30.5 cm ที่ขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูป.....	84
รูปที่ 3.24 ชิ้นงานทดสอบที่ประกอบแล้วและยึดด้วยสกรูทั้งสี่ด้าน.....	84
รูปที่ 3.25 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการเจาะทะลุบนเครื่องทดสอบแรง.....	90
รูปที่ 3.26 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	91
รูปที่ 3.27 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....	91
รูปที่ 3.28 การติดตั้งเครื่องวัดชิ้นงานด้านหน้า.....	92
รูปที่ 3.29 ติดตั้งชิ้นงานที่แทนทดสอบตามมาตรฐาน.....	92

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุผสมที่ขนาดความหนา 12 mm ต่อการเพิ่มจำนวนชั้นลวดตาข่ายเหล็ก.....	95
รูปที่ 4.2 กราฟความเค้น-ความเครียด แสดงการเปรียบเทียบพฤติกรรมทางกลของชิ้นงานที่เสริมลวดต่างกันสำหรับการต้านทานการเจาะทะลุ.....	96
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าพลังงานเมื่อเพิ่มความหนาของชิ้นงานเป็นสองเท่า โดยเสริมด้วยเส้นใยลวดตาข่ายเหล็กจำนวน 5 ชั้น.....	97
รูปที่ 4.4 กราฟความเค้น-ความเครียด แสดงการเปรียบเทียบชิ้นงานวัสดุผสมที่เสริมลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้นที่ระดับความเร็วต่างกัน.....	98
รูปที่ 4.5 ค่าพลังงานจลน์ที่ต่างกันในแต่ละระดับความเร็วที่ใช้ทดสอบของวัสดุผสมที่เสริมลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น.....	98
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์และความหนาจากสมการการแตกหัก โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 25\%$ .....	100
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของการทดสอบความต้านทานแรงดึง	101
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก ก) กำลังขยาย 200 เท่า ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า.....	102
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 1 ชั้น กำลังขยาย 200 เท่า ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป.....	103
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 1 ชั้น กำลังขยาย 2,000 เท่า ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป.....	103
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 2 ชั้น กำลังขยาย 200 เท่า ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป.....	104
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 2 ชั้น กำลังขยาย 2,000 เท่า ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป.....	104
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 3 ชั้น กำลังขยาย 200 เท่า ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป.....	105
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 3 ชั้น กำลังขยาย 2,000 เท่า ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป.....	105

รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 4 ชั้น กำลังขยาย 200 เท่า	
ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป .....	106
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 4 ชั้น กำลังขยาย 2,000 เท่า	
ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป .....	106
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น กำลังขยาย 200 เท่า	
ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป .....	107
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น กำลังขยาย 200 เท่า	
ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป .....	107
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้นต่อความหนาแผ่นอะลูมิเนียม A 5083 .....	108
รูปที่ 4.20 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูความเสียหายด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นอะลูมิเนียมที่ ขนาดความหนา 6, 8, 10 และ 12 mm.....	111
รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบในการดูดซับพลังงานของวัสดุประเภทเหล็กกล้า โดย ที่ความหนา 12 mm สามารถกันกระสุนได้โดยกระสุนไม่ทะลุ.....	112
รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบพลังงานจลน์ในแต่ละความหนาระหว่างแผ่นอะลูมิเนียมและ เหล็กกล้า.....	113
รูปที่ 4.23 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูความเสียหายด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นเหล็กกล้าที่ ขนาดความหนา 6, 8, 10 และ 12 mm.....	113
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นลวดตาข่ายเหล็กและพลังงานจลน์.....	117
รูปที่ 4.25 อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานจลน์ในแต่ละชั้นลวดตาข่าย .....	117
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุผสมแบบเรียงซ้อนกัน .....	121
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแผ่นอะลูมิเนียม 6 mm กับแผ่นวัสดุผสม .....	123
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแผ่นอะลูมิเนียม 8 mm กับแผ่นวัสดุผสม .....	125
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแผ่นอะลูมิเนียม 10 mm กับแผ่นวัสดุผสม .....	127
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแผ่นอะลูมิเนียม 12 mm กับแผ่นวัสดุผสม .....	129
รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและน้ำหนักของแผ่นอะลูมิเนียมประเภทหน้า.....	133

รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์และความหนาของวัสดุผสมประกอบด้วยแผ่นเหล็กกล้า ..... 135

รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและน้ำหนัก..... 136

รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและน้ำหนัก..... 137

รูปที่ 5.1 แผนภาพการวิเคราะห์พลังงานในแต่ละชั้น..... 152



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สืบเนื่องจากสถานการณ์ความไม่สงบไม่ว่าจะเป็นในประเทศไทย หรือเหตุการณ์ก่อการร้าย ในหลายประเทศทั่วโลก เป็นปัญหาหลักที่ส่งผลต่อความมั่นคงของประเทศและมีแนวโน้มว่าจะยังทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จึงเป็นปัญหาที่ต้องแก้ไขและเฝ้าระวังในระยะยาวต่อไป โดยในต่างประเทศได้ให้ความสำคัญกับการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อการป้องกันประเทศทั้งเชิงรุกและเชิงรับ ในส่วนของประเทศไทยทางภาครัฐยังคงเฝ้าระวังสถานการณ์เพื่อไม่ให้เกิดความรุนแรงและลดความเสียหายที่เกิดขึ้นให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ จากสถิติผู้เสียชีวิต [1] ส่วนใหญ่เกิดจากการเสียชีวิตด้วยอาวุธปืน รองลงมาคือเสียชีวิตจากอุบัติเหตุ ซึ่งในการที่จะลดจำนวนการเสียชีวิตและการบาดเจ็บทางตรงคือการสร้างความปลอดภัยในการปฏิบัติหน้าที่ หรือสร้างความปลอดภัยในสถานที่ที่สำคัญ เช่น กองบัญชาการ อาคารคลังแสง โรงพยาบาลและป้อมรักษาการณ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เล็งเห็นถึงความสำคัญที่จะช่วยเสริมสร้างความปลอดภัยของอาคารปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานโดยการออกแบบวัสดุที่สามารถป้องกันการโจมตีจากวัตถุกระสุนปืนได้ โดยทั่วไปลักษณะของป้อมปราการหรือป้อมรักษาการณ์จะสร้างมาจากวัสดุที่หาได้ง่าย ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเป็นในสนามรบก็จะใช้กระสอบทรายใส่ดิน หรือในเมือง ชุมชนก็จะสร้างมาจากคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งการออกแบบวัสดุที่สามารถป้องกันการปะทะของวัตถุกระสุนปืนนี้สามารถนำมาทดแทน หรือนำมาใช้ก่อสร้างร่วมกับคอนกรีตเสริมเหล็กได้ ซึ่งจะมีลักษณะพิเศษที่ดีกว่าการก่อสร้างแบบปัจจุบันคือ มีน้ำหนักเบา สามารถกำหนดรูปร่างของวัสดุได้อย่างชัดเจน ซึ่งการออกแบบนี้ได้ นำยางพารา แผ่นอลูมิเนียม และลวดตาข่ายเหล็ก มาเป็นส่วนประกอบสำหรับทำเป็นวัสดุคอมโพสิทแบบไฮบริด เพราะว่าคุณสมบัติทางกลของยางผสมหรือยางพารา คือ มีความหนาแน่นต่ำ (Low density), ความแข็งแรงจำเพาะสูง (High specific strength) และ มีมอดุลัสจำเพาะสูง (High specific modulus) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานป้องกันต่างๆ เช่น รถถัง พาหนะป้องกันการจู่โจม และ โครงสร้างของเรือ เป็นต้น

นอกจากนี้การพัฒนาผนังป้องกันกระสุนจากวัสดุผสม ยังสามารถลดต้นทุนของการก่อสร้างผนังคอนกรีตเสริมแรงได้ อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางพาราในประเทศอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาตัวแปรที่มีผลสำคัญต่อการพัฒนาและออกแบบผนัง ป้องกันกระสุนที่มีคุณสมบัติเบา เคลื่อนย้ายได้ง่าย และสะดวกต่อการใช้งาน สามารถขึ้นรูปและผลิตได้ง่าย

เพื่อความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่หรือผู้ปฏิบัติงาน หรือนำไปสร้างเป็นยุทธภัณฑ์ที่มีความสามารถในการป้องกันกระสุน สำหรับการฝึกซ้อมทางทหารต่างๆ ซึ่งรวมถึงพิจารณาต้นทุนทางเศรษฐกิจเพื่อเป็นแนวทางในส่งเสริมให้มีการผลิตใช้งานจริงภายในประเทศเพื่อลดการนำเข้าและพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นในลำดับต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- ศึกษาวิเคราะห์การนำยางพาราแปรรูป อลูมิเนียม เหล็กแผ่นและลวดตาข่ายเหล็ก มาใช้งานเพื่อการออกแบบผนังป้องกันกระสุนและขั้นตอนการผลิตผนังป้องกันกระสุน
- เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของผนังป้องกันกระสุนที่มีผลจาก ความหนา น้ำหนัก ลำดับชั้นของวัสดุ ต่อการดูดซับพลังงานของผนังป้องกันกระสุน
- เพื่อพัฒนาผนังป้องกันกระสุนที่มีประสิทธิภาพสูงที่ผลิตจากวัสดุผสม

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- ใช้วัสดุคอมโพสิตคือ ยางพารา STR5L อลูมิเนียม เกรด 5083 แผ่นเหล็กเกรด SS400 และลวดตาข่ายเหล็กขนาด 1/2"×1/2" ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 mm
- ทดสอบการยิงกระสุนปืนตามข้อกำหนดด้วยมาตรฐาน EN 1522 ซึ่งอาวุธปืนที่ใช้ในการทดสอบคือ อาวุธปืนเอ็ม16 ซึ่งเป็นอาวุธปืนที่ประจำการในกองทัพไทยและเทียบเคียงกับมาตรฐานความรุนแรงที่ระดับ FB5
- ผนังป้องกันกระสุนจะมีขนาดตามมาตรฐาน คือ กว้าง 30.5 cm และ ยาว 30.5 cm เป็นขนาดสำหรับที่ใช้ทดสอบในภาคสนาม

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมที่จะนำยางพาราที่หาได้ง่ายภายในประเทศไทยมาใช้สำหรับงานป้องกันประเทศ
- เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยผนังป้องกันกระสุน เพื่อเพิ่มความปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงานจริงของเจ้าหน้าที่ และพัฒนาให้เกิดการผลิตจริงควบคู่กับความเหมาะสมของต้นทุนในการผลิต
- เพิ่มมูลค่ายางพาราไทย ผลิตและใช้เองภายในประเทศ

- สามารถนำไปประยุกต์ก่อสร้างจริงในพื้นที่ที่เกิดการประทะ ควบคู่กับผนังคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมหรืออาจจะก่อสร้างใหม่ทั้งหมดได้ สำหรับป้อมสนามหรือป้อมรักษาการณ์
- ส่งเสริมอุตสาหกรรมและเศรษฐกิจรวมทั้งงานวิจัยจากยางพาราไทยตามนโยบายของภาครัฐ ในปี 2558 ซึ่งมีผลผลิตจากน้ำยางดิบมากและไม่เกิดประโยชน์ ส่งผลให้เน่าเสียในคลังเป็นจำนวนมาก
- ลดการนำเข้ายุทธภัณฑ์จากต่างประเทศที่ใช้ในกิจการของกองทัพไทยในอนาคต ไม่ว่าจะเป็นเป็นการฝึกซ้อมหรือการใช้งานจริงในสถานการณ์ความไม่สงบของสามจังหวัดชายแดนภาคใต้ของประเทศไทย
- สามารถนำความรู้จากแขนงวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมโลหะการและวิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ มาประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้เกิดการพัฒนาการใหม่ทางด้านการป้องกันประเทศ และยังช่วยส่งเสริมผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ผลิตจากในประเทศ
- ส่งเสริมงานวิจัยภายในประเทศ เพื่อเพิ่มศักยภาพของนักวิจัยในงานป้องกันประเทศและลดการว่าจ้างบุคลากรจากต่างประเทศๆได้



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความเป็นมาของป้อมสนามและพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของวัตถุกระสุน

##### 2.1.1 ป้อมสนาม

ป้อมสนามคือสิ่งก่อสร้างทางยุทธศาสตร์หรือตึกที่ออกแบบเพื่อการป้องกันตนเองในยามสงครามหรือใช้เป็นที่ยึดมั่น การสร้างระบบป้อมปราการเป็นการก่อสร้างที่เริ่มทำกันมาเป็นเวลาหลายพันปีในรูปแบบที่เริ่มตั้งแต่เพียงโครงสร้างง่ายๆ มาจนเป็นระบบที่สลับซับซ้อน ในอดีตป้อมสนามถูกทำขึ้นจากหิน ทราช ไม้ เป็นต้น ดังรูปที่ 2.1 ก่อนที่จะถูกพัฒนาใช้ในรูปแบบของป้อมคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งป้อมสนามคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นป้อมปราการที่มีศักยภาพสูงในการป้องกันกระสุนและวัตถุระเบิด เนื่องจากไม่มีข้อจำกัดของพื้นที่ในการเพิ่มความหนาของผนัง อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของผนังคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นคือ มีน้ำหนักมาก ไม่สามารถทำการเคลื่อนย้ายได้อย่างสะดวก แต่จะเหมาะที่จะนำมาก่อสร้างเป็นคลังเก็บวัตถุระเบิดมากกว่า ดังรูปที่ 2.2 หรือเหมาะสำหรับป้อมปราการมากกว่า การนำมาทำเป็นป้อมสนามที่ต้องการความคล่องตัวในการเคลื่อนย้ายได้อย่างสะดวก ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับผนังคอนกรีตเสริมเหล็กที่มุ่งเน้นไปยังการเพิ่มประสิทธิภาพของผนังให้สามารถรับแรงกระแทกจากกระสุนปืนและแรงระเบิดได้ รวมทั้งการศึกษาวัดวัสดุที่สามารถป้องกันแรงกระแทกได้ดีหรือที่เรียกว่า วัสดุผสม (Composite material) จากงานวิจัยจะเห็นได้ว่าวัสดุผสมมีจุดเด่นคือมีน้ำหนักเบามากกว่าโลหะเหล็ก ซึ่งสามารถทดแทนเหล็กในการออกแบบการป้องกันแรงกระแทกได้ดี ในการออกแบบป้อมสนามที่สามารถประกอบและเคลื่อนที่ได้อย่างสะดวกในสนามรบหรือขณะปฏิบัติการก็นั้น จะช่วยเพิ่มความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่และลดระยะเวลาในการก่อสร้างลง ซึ่งการออกแบบวัสดุผสมป้องกันกระสุนสามารถนำไปประยุกต์ได้หลากหลาย เช่น นำไปใช้กับรถขนส่งหรือเจ้าหน้าที่ ป้อมปราการ ป้อมสังเกตการณ์ ผนังบ้านที่อยู่อาศัย การขนส่ง รถถังภาคพื้นดิน อากาศยาน โครงสร้างเรือรบ ผนังกันกระสุนสำหรับเรือรบ ระบบสาธารณสุข โภค อุกรณ์การกีฬา เป็นต้น

เพื่อประสิทธิภาพในการออกแบบการป้องกันกระสุนจึงมีมาตรฐานรองรับที่ชื่อว่า European committee for standardization หรือเรียกว่า BS EN 1522:1998 [2] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในประเทศแถบยุโรป และอีกมาตรฐานคือ National Institute of Justice [3] ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า มาตรฐาน NIJ ซึ่งเป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับเรื่องวิธีทดสอบ เกณฑ์การทดสอบ ความสามารถหรือ

ประสิทธิภาพการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะและวัสดุที่กำหนดโดยสถาบัน ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งประเทศไทยและอีกหลายประเทศทั่วโลกใช้มาตรฐานเหล่านี้สำหรับการทดสอบเสื้อเกราะป้องกันกระสุนและวัสดุกันกระสุนด้วยเช่นกัน ซึ่งการทดสอบนี้จะใช้มาตรฐาน BS EN 1522:1998 เพื่ออ้างอิงระดับของความเร็วกระสุนปืน โดยมาตรฐาน BS EN 1522:1998 แบ่งระดับความสามารถในการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะไว้ 7 ระดับ



รูปที่ 2.1 รูปแบบป้อมสนามที่ใช้กระสอบบรรจุทราย [4]



รูปที่ 2.2 คลังเก็บวัตถุระเบิดและที่กำบังจากคอนกรีตเสริมเหล็ก [5]

จากการศึกษาของโครงการวิจัยยุทธโศปกรณ์เพื่อพัฒนาศักยภาพของกองทัพและการป้องกันประเทศ [6] ได้ทำการทดสอบคอนกรีตประสิทธิภาพสูงสำหรับกำแพงป้องกันกระสุนและกัมมันตรังสี โดยการเสริมเส้นใยเหล็กให้กับคอนกรีตพบว่า คอนกรีตนั้นทนต่อแรงกดสูงแต่จะมีความยืดหยุ่นและความแข็งแรงต่ำ ซึ่งความแข็งแรงเป็นปัจจัยสำคัญของวัสดุในการรับพลังงานจากวัสดุที่มาปะทะ

### 2.1.2 มาตรฐานการทดสอบ

แนวทางในการทดสอบความรุนแรงของหัวกระสุน อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ หรือเงื่อนไขในการทดสอบ และขั้นตอนในการทดสอบวัสดุอุปกรณ์รวมทั้งเกราะกันกระสุนที่มีลักษณะเฉพาะที่นิยม

กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยและเป็นที่ยอมรับสากลคือ มาตรฐานการทดสอบ BS EN 1522:1998 ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะให้ผลที่แตกต่างกันแต่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานอื่นๆ ได้ ส่วนใหญ่มาตรฐาน BS EN 1522:1998 จะครอบคลุมตั้งแต่ลักษณะการทดสอบและวัสดุหรืออุปกรณ์ที่นำมาทดสอบที่ต้องผ่านเงื่อนไขการทดสอบก่อนการใช้งาน เช่น เงื่อนไขของหมวกนิรภัย ถุงลมนิรภัย เสื้อเกราะ รถหุ้มเกราะ อากาศยานหุ้มเกราะ ผืนง ประตู่ กระจก หน้าต่าง ที่ได้รับผลกระทบจากแรงกระแทก หรือ หัวกระสุนและสะเก็ดระเบิด โดยรายการมาตรฐานและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องแสดงดังตารางที่ 2.1 ซึ่งในส่วนของงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบวัสดุผสมที่ใช้สำหรับนำมาทำเป็นผนังรับแรงกระแทก โดยจะยึดแนวทางการปฏิบัติตามมาตรฐานย่อยคือ มาตรฐาน BS EN 1522:1988 เป็นแนวทางในการทดสอบ ขอบเขตของมาตรฐานจะครอบคลุมวัสดุที่สามารถป้องกันกระสุนทั้งหมด โดยรายละเอียดของ มีรายละเอียดย่อยตามหัวข้อดังต่อไปนี้

#### 2.1.2.1 มาตรฐานการทดสอบ BS EN 1522:1988

มาตรฐานการทดสอบ BS EN 1522:1988 ถูกพัฒนาขึ้นโดยหน่วยงานที่มีชื่อว่า European committee for standardization โดยเอกสารมาตรฐานนี้จะแสดงถึงขั้นตอนเฉพาะหรือความต้องการขั้นพื้นฐานต่างๆ รวมถึงเครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบตรงตามความต้องการของ The needs of criminal justice agencies for high quality service โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ เป็นข้อเรียกร้องขั้นต่ำสำหรับวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับป้องกันกระสุน สำหรับผู้ที่สนใจเอกสารมาตรฐานนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจทางการค้าว่าวัสดุอุปกรณ์ที่นำมาจำหน่ายตรงตามหลักปฏิบัติสำคัญที่มาตรฐานระบุไว้ได้ หรือใช้สำหรับเป็นแนวทางทดสอบวัสดุที่ออกแบบให้เป็นที่ยอมรับถึงคุณภาพได้ อย่างไรก็ตามมาตรฐาน BS EN 1522:1988 ยังอยู่ในช่วงการรับคำแนะนำหรือข้อมูลตอบกลับ (Feedback) และการทบทวนถึงขั้นตอนการทดสอบต่างๆ อย่างไรก็ตามผู้ใช้ควรตรวจสอบข้อมูลล่าสุด เพื่อให้การทดสอบมีประสิทธิภาพมากที่สุด ตรงตามวัตถุประสงค์มากที่สุด สำหรับรายละเอียดและขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

#### 2.1.2.2 ขอบเขต

มาตรฐานนี้เหมาะสมสำหรับวัสดุอุปกรณ์รวมถึงเกราะที่มีแนวโน้มที่จะใช้ในการป้องกันกระสุนจากปืน (Gunfire) ยกเว้นเกราะและหมวกสำหรับบุคคลที่ใช้กับเจ้าหน้าที่ตำรวจและทหาร ในปัจจุบันมีวัสดุที่ใช้สำหรับการป้องกันหลายประเภทขึ้นอยู่กับการใช้งานและระดับความรุนแรง โดยสามารถนำมาทดสอบได้ตั้งแต่ระดับความรุนแรงต่ำ (Small-caliber handguns) จนกระทั่งถึง ความรุนแรงสูง (High-power rifle) วัสดุป้องกันกระสุนในหัวข้อนี้หมายถึง วัสดุที่ใช้ในการประกอบหรือติดตั้งสำหรับการเคลื่อนย้าย เช่น โล่มือถือสำหรับเจ้าหน้าที่ตำรวจ (Ballistic clipboard) โครงสร้าง

หรืออาคารที่ต้องการความปลอดภัย (Guard station or critical control room) และยานพาหนะ หุ้มเกราะ โดยมีวัสดุได้ตั้งแต่ โลหะ เซรามิก ผ้า กระจกใส พลาสติกเสริมความแข็งแรง ทั้งแบบที่ แยกกันหรือนำมารวมกันได้ ความรุนแรงของหัวกระสุนขึ้นอยู่กับ ส่วนผสมที่ใช้สำหรับทำเป็นหัว กระสุน รูปร่าง น้ำหนัก และความเร็วในการกระแทก เนื่องจากมีหลากหลายประเภทของหัวกระสุน จึงต้องกำหนดระดับความรุนแรง ยกตัวอย่างเช่น เกราะที่ป้องกันกระสุน .357 Magnum ได้ อาจจะ หรือป้องกันหัวกระสุน .357 Magnum ที่ความเร็วสูงกว่าได้ ซึ่งมาตรฐานนี้จะอ้างอิงเฉพาะหัวกระสุน แบบทั่วไป

### 2.1.2.3 การจำแนกระดับความรุนแรง

ระดับความรุนแรง (Classification) ของวัสดุป้องกันกระสุนถูกจำแนกไว้ 7 ระดับความ รุนแรงและมีรายละเอียดในแต่ละระดับดังนี้ โดยระดับที่จะใช้ในการทดสอบงานวิจัยอยู่ที่ระดับความ รุนแรง Class FB5 (High power riffle) มีรายละเอียดดังนี้

อุปกรณ์ที่สามารถป้องกันกระสุนในระดับนี้ต้องสามารถป้องกันกระสุนขนาด 223 Remington (5.56 mm. FMJ<sup>1</sup>), นอกจากนี้จะต้องสามารถป้องกันกระสุนในระดับต่ำกว่าได้เช่น Class FB1 (22LR; 38Speacial), FB2 (9 mm.), FB3 (Lower velocity 357 magnum) และ FB4 (High velocity 357 magnum; 44 Rem. Mag) ส่วนของรายละเอียดในระดับอื่นๆที่ไม่ได้กล่าวไว้สามารถ ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก.

### 2.1.2.4 คำจำกัดความ

เนื่องจากคำศัพท์ที่ใช้นิยามหรืออักษรย่อ (Definitions) ของวัตถุกระสุนมีจำนวนหลายชนิด ทางมาตรฐานจึงได้กำหนดลักษณะวัสดุและตัวย่อที่เหมาะสมใช้กับการทดสอบมีดังรายละเอียด ต่อไปนี้

#### 2.1.2.4.1 หัวกระสุนโลหะ Full Metal Jacketed (FMJ) Bullet

โดยหัวกระสุนเคลือบเปลือกแข็งหรือเรียกกันว่ากระสุนหัวบอลซึ่งทำจากตะกั่ว ยกเว้นตัวฐาน ซึ่งทำมาจากทองแดงผสม (90 Copper,10-Zinc)

#### 2.1.2.4.2 หัวกระสุนแบบอ่อน Jacketed Soft Point (JSP) bullet

คือหัวกระสุนที่ทำจากวัสดุอ่อน ส่วนฐานจะแข็ง ส่วนประกอบด้านในจะเป็นตะกั่ว ยกเว้น ส่วนที่อ่อน และเปลือกจะทำจากทองแดงผสม (90 Copper,10-Zinc)

#### 2.1.2.4.3 กระสุนตะกั่ว

<sup>1</sup> Full metal Jacket กระสุนแบบหุ้มด้วยปลอกเหล็ก

หัวกระสุนที่ทำมาจากตะกั่ว (Lead bullet) และมีโลหะอื่นผสมด้วยเพื่อให้หัวกระสุนแข็งขึ้น ส่วนมากจะใช้พลวง (Antimony) หรือ ดีบุก (Tin) เป็นส่วนผสม หัวกระสุนขนาดเล็กต่างๆ ไปที่โรงงานผลิตออกขาย จะใช้ตะกั่วผสมกับพลวง ส่วนหัวกระสุนที่อัดเอง จะใช้ตะกั่วผสมกับดีบุก เพราะง่ายในการหลอมและหล่อหัวกระสุน

#### 2.1.2.5 ข้อกำหนดการทดสอบ

##### 2.1.2.5.1 หลักเกณฑ์การยอมรับ (Acceptance criteria)

วัสดุที่นำมาทดสอบต้องมีขนาดความกว้างและยาวอย่างน้อย 30.5 x 30.5 cm หรือขนาด 12" x 12" และผ่านหลักเกณฑ์ข้อกำหนดต่างๆ ตามหัวข้อ 2.1.2.5.2 – 2.1.2.5.4

##### 2.1.2.5.2 ผู้เชี่ยวชาญ/เจ้าหน้าที่ (Workmanship)

วัสดุกันกระสุนตัวอย่างต้องปราศจากริ้วรอย บวม รอบฉีกขาดของเส้นใย รอยแตก ติดกัน รอยแห้วหรือมุมที่คม หรือข้อบกพร่องอื่นๆ ที่ตรวจพบโดยผู้เชี่ยวชาญ

##### 2.1.2.5.3 ป้ายทดสอบ (Labeling)

แผ่นวัสดุที่นำมาทดสอบหรือส่วนประกอบ ต้องระบุข้อความรายละเอียดพร้อมทั้งติดฉลากก่อนทำการทดสอบ โดยครอบคลุมข้อมูลดังต่อไปนี้

- (ก) ชื่อผู้ออกแบบ หรือตราผลิตภัณฑ์ของผู้ผลิต
- (ข) ชนิดของวัสดุที่นำมาทดสอบ
- (ค) วันเดือนปีที่ผลิต
- (ง) ครั้งที่ผลิต (Lot number)
- (จ) Serial number (ถ้ามี)

##### 2.1.2.5.4 ความต้านทานกระสุน

ในการทดสอบความต้านทานกระสุน (Ballistic resistance) ของวัสดุตัวอย่างจะต้องครอบคลุมถึงอาวุธทดสอบ ขั้นตอนการทดสอบ ลักษณะความเสียหาย และความต้านทานการเสียหายตามรายละเอียดตามตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดการทดสอบ

ตารางที่ 2.1 แสดงรายการมาตรฐานการทดสอบ [3]

Standard	Agency	Scope	Threats
NIJ 0108.01; Ballistic Resistant Protective Materials	US National Institute of justice	Applicable to all ballistic resistant materials intended to provide protection against gunfire. With the exception of police body armor and ballistic helmets	Small caliber handguns to high-powered or armor-piercing rifles
NIJ 0101.04 Ballistic Resistance of Personal Armor	US National Institute of justice	To establish minimum performance requirements and test methods for the ballistic resistance of personal body armor intended to protect the wearer	Small caliber handguns to high-powered or armor-piercing rifles
NIJ 0106.01: Standard for Ballistic Helmets	US National Institute of justice	To establish performance requirements and test methods for helmets intended to protect the wearer against gunfire. Requirements for face shields are not included in this standard	Handguns
EN 1063: Security Glazing Testing and Classification of resistance Against Bullet	European Committee for Standardization	Specifies performance requirements and test methods for the classification of the bullet-resistance of glass	Small caliber handguns to high-powered or armor-piercing rifles
CEN EN ISO 14876 Bullet Resistance and Knife Slab Resistance	European Committee for Standardization	Specifies performance requirements for bullet resistance and knife stab resistance of body armor	handguns, rifles and shot guns
AS/NZS 2343 1997; Bullet Resistance Panel and Elements	Joint Technical Committee MS/43	Specifies requirements for bullet-resistant panels and elements according to their performance in preventing penetration by projectiles	handguns, rifles and shot guns
Rusia-Gost R 50744- 95 Armor Cloths Classification	State Standardization Committee of Russian Federation	Specifies performance requirements and testing methods for the ballistic resistance of armor clothes	Small caliber handguns to high-powered or rifles

ตารางที่ 2.2 สรุปผลการทดสอบให้เป็นไปตามข้อกำหนด [3]

Class	Type of weapon	Calibre	Bullet		Test condition	
			Type	Mass g	Test range m	Bullet velocity m/s
FB1	rifle	22 LR	L/RN	2,6 ± 0,1	10 ± 0,5	360 ± 10
FB2	hand gun	9 mm Luger	FJ <sup>1</sup> /RN/SC	8,0 ± 0,1	5 ± 0,5	400 ± 10
FB3	hand gun	357 Mag.	FJ <sup>1</sup> /CB/SC	10,2 ± 0,1	5 ± 0,5	430 ± 10
FB4	hand gun	357 Mag.	FJ <sup>1</sup> /CB/SC	10,2 ± 0,1	5 ± 0,5	430 ± 10
	hand gun (see note)	44 Rem. Mag.	FJ <sup>2</sup> /FN/SC	15,6 ± 0,1	5 ± 0,5	440 ± 10
FB5	rifle	5,56 × 45*	FJ <sup>2</sup> /PB/SCP1	4,0 ± 0,1	10 ± 0,5	950 ± 10
FB6	rifle	5,56 × 45*	FJ <sup>2</sup> /PB/SCP1	4,0 ± 0,1	10 ± 0,5	950 ± 10
	rifle (see note)	7,62 × 51	FJ <sup>1</sup> /PB/SC	9,5 ± 0,1	10 ± 0,5	830 ± 10
FB7	rifle	7,62 × 51**	FJ <sup>2</sup> /PB/HCI	9,8 ± 0,1	10 ± 0,5	820 ± 10

L lead  
CB coned bullet  
FJ full metal jacket bullet  
FN flat nose bullet  
HCI steel hard core, mass (3,7 ± 0,1) g  
hardness more than 63 HRC  
PB pointed bullet  
RN round nose bullet  
SC soft core (lead)  
SCP1 soft core (lead) with steel penetrator (type SS109)

FJ<sup>1</sup> = full steel jacket (plated)  
FJ<sup>2</sup> = full copper alloy jacket

\* To achieve the stated values for [5.56 × 45], the recommended barrel twist length = (178 ± 10) mm.  
\*\* To achieve the stated values for class FB7, the recommended barrel twist length = (254 ± 10) mm.

NOTE 1 When a shot is to be fired at a single point the test range may be reduced to achieve the firing accuracy as defined in Section 6 of EN 1523:1998. In this case it may not be possible to measure the velocity of the bullet.  
NOTE 2 To be classified FB4 or FB6 the specimen shall be tested with both calibres listed.

### 2.1.2.6 ขั้นตอนการทดสอบ

#### 2.1.2.6.1 ตัวอย่างทดสอบ

วัสดุตัวอย่าง (Sampling) ที่นำมาทดสอบต้องมีขนาดอย่างน้อย 30.5 x 30.5 cm หรือ 12" x 12"

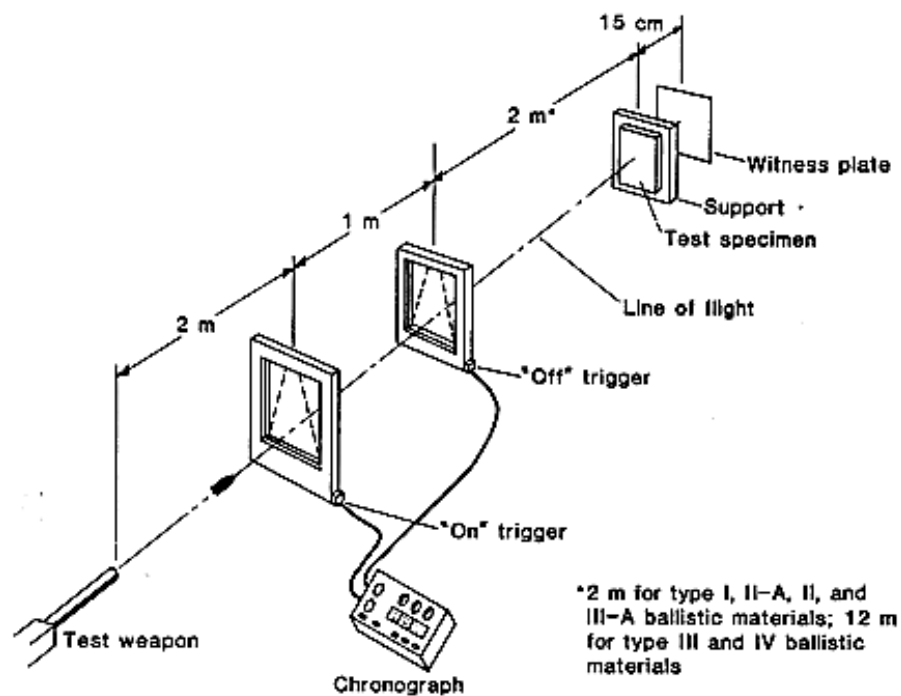
#### 2.1.2.6.2 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

อาวุธที่นำมาทดสอบควรจะเป็นอาวุธที่ถือได้ด้วยมือ โดยครอบคลุมความเร็วของกระสุนและความรุนแรงของระดับ FB5 มีรายละเอียดดังนี้ คือ อาวุธที่นำมาทดสอบอาจจะเป็นปืนไรเฟิลหรือเทียบเท่าขนาด 5.56 mm หัวกระสุนปืนเป็นแบบหุ้มแข็ง (FJ) มวลกระสุน 4.0 g ความเร็วต่ำสุดในการปะทะ 950 ± 10 m/s หรือน้อยกว่า ในส่วนของรายละเอียดระดับความรุนแรงสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก. โดยมีเครื่องวัดความเร็วอนุภาค (Chronograph) ควรจะมีระดับความเร็ว 1 μs และความแม่นยำ 2 μs โดยใช้เชื่อมต่อกับสวิตซ์หรือ Conductive screen ก็ได้

### 2.1.2.7 การเตรียมการทดสอบ

ขั้นตอนการเตรียมการทดสอบ (Ballistic resistance test) นั้นเริ่มจากวางเครื่องวัดห่างจากตำแหน่งปากกระบอกปืนประมาณ 2 m และ 3 m ตามลำดับดังรูปที่ 2.3 แสดงระยะการติดตั้ง โดยการติดตั้งนั้นจะต้องจัดให้อยู่ในตำแหน่งเส้นตรงเดียวกันหรือแนวเดียวกัน วัดระยะห่างโดยค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1 m โดยคำนวณระยะเวลาจากจุดยิงถึงจุดทดสอบในแต่ละรอบ หลังวางตำแหน่งปืน จัดความสูง ยึดติดกับขาตั้งเรียบร้อยแล้วให้ทำการทดลองยิง (Pretest) เพื่อให้มั่นใจได้ว่ากระสุนจะตกในตำแหน่งที่ต้องการของชิ้นงานทดสอบ หลังจากนั้นวางชิ้นงานทดสอบบนขาตั้งและห่างจากกระบอกปืนเป็นระยะ 5 m

เมื่อเริ่มต้นการทดสอบให้อ่านค่าและบันทึกค่าความเร็วจากเครื่องวัด ตรวจสอบว่ามีการเจาะทะลุหรือไม่ ถ้าชิ้นงานทดสอบไม่มีการเสียหายแบบเจาะทะลุให้เพิ่มรอบทำการทดสอบแบบเดิมอีกครั้งตามข้อกำหนดที่ได้กล่าวมาข้างต้น



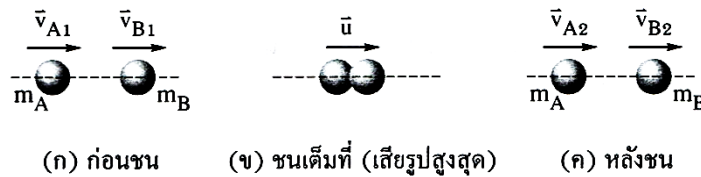
รูปที่ 2.3 การเตรียมการทดสอบวัสดุป้องกันกระสุน [3]

### 2.1.3 การชนกันระหว่างอนุภาค

การชนกันระหว่างอนุภาค 2 อนุภาค (Basic impact engineering) จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ระหว่างชนกันนั้นจะเกิด โมเมนตัมขนาดมหาศาลกระทำในแต่ละอนุภาคด้วยขนาดเท่ากัน แต่ทิศทางของแรงนั้นตรงกันข้าม ในขณะที่เกิดการชนจะแบ่งพิจารณาโมเมนตัมกับเวลาเป็นสองช่วงเวลา



คือ ช่วงการเสียรูปตั้งแต่เวลา  $t = 0$  ถึง  $t_0$  และช่วงการคืนรูปตั้งแต่เวลา  $t = t_0$  ถึง  $t$  ถ้ากำหนดให้อนุภาค A วิ่งเข้าชนอนุภาค B ด้วยความเร็ว  $V_{A1}$  ที่มากกว่า  $V_{B1}$  ขณะชนกันนั้นอนุภาคทั้งสองเกิดการเสียรูป และมีความเร็ว  $U$  ดังรูปที่ 2.4 และเริ่มคืนรูปในเวลาต่อมา อนุภาคทั้งสองจะมีความเร็วเป็น  $V_{A2}$  และ  $V_{B2}$  ตามลำดับ (โดยอนุภาคทั้งสองอาจคืนรูปหรือเสียรูปก็ได้)



รูปที่ 2.4 โมเมนต์ที่เกิดขึ้นใน 2 ช่วงเวลาระหว่างการชน [7]

ถ้าแบ่งการชนระหว่างอนุภาคทั้งสองโดยพิจารณาจากแนว เส้นการชน (Line of impact) จะแบ่งออกเป็น 2 แบบดังนี้

#### 2.1.3.1 การชนแบบผ่านจุดศูนย์กลางมวล

การชนแบบผ่านจุดศูนย์กลางมวล (Direct central impact) โดยมวล  $m_A$  และ  $m_B$  จะมีความเร็ว  $V_{A1}$  และ  $V_{B1}$  โดยมี เส้นแนวการชน เป็นเส้นที่ลากตั้งฉากกับเส้นสัมผัสระหว่างผิววัตถุเข้าชนกันดังรูปที่ 2.5 และสามารถอธิบายการชนได้ดังสมการที่ 2.1

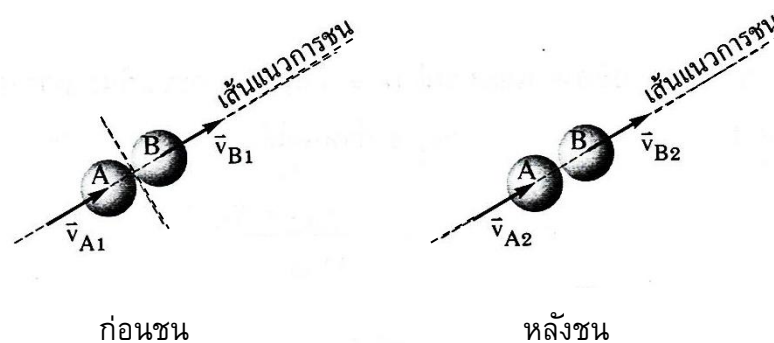
$$m_A V_{A1} + m_B V_{B1} = m_A V_{A2} + m_B V_{B2} \quad (2.1)$$

โดย

$m_A, m_B$  มวลของวัตถุ (kg) ล้าย

$V_{A1}, V_{B1}$  ความเร็วของวัตถุก่อนเกิดการชน (m/s)

$V_{A2}, V_{B2}$  ความเร็วหลังการชน (m/s)



รูปที่ 2.5 การชนแบบผ่านจุดศูนย์กลางมวล [7]

จากสมการผลรวมโมเมนตัมของระบบก่อนชนเท่ากับผลรวมของโมเมนตัมของระบบหลังชน จากสมการ 2.1 ตัวที่ไม่ทราบค่าคือความเร็วหลังชน  $V_{A2}, V_{B2}$  ซึ่งอาจจะใช้อีกหนึ่งสมการซึ่งถูกกำหนดด้วยค่า สัมประสิทธิ์การคืนตัว (Coefficient of restitution:  $e$ ) คืออัตราส่วนระหว่างโมเมนตัมในช่วงคืนรูปต่อการดลในช่วงเสียรูปแสดงดังสมการที่ 2.2

$$e = \frac{(V_{B2} - V_{A2})}{(V_{A1} - V_{B1})} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.2 สามารถคำนวณพลังงานจลน์ (Kinetic energy) หลังจากที่เกิดการชนได้ อย่างไรก็ตามพลังงานจลน์หลังชนกันของวัตถุจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานจลน์ก่อนชนเสมอ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การคืนตัวจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง เมื่อ  $e = 1$  เป็นการชนแบบยืดหยุ่น โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานจลน์ (No loss of kinetic energy or elastic) แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.3 และเมื่อ  $e = 0$  จะเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่นสมบูรณ์แสดงดังสมการที่ 2.4 ความเร็วของวัตถุทั้งสองจะมีความเร็วเท่ากันหรือเรียกว่าการชนแบบพลาสติก (Plastic) โดยการชนทุกๆ ไปจะมีค่า  $e < 1$  ซึ่งสามารถหาค่าได้จากการทดลอง ด้วยวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นจะสามารถหาความเร็วและพลังงานจลน์ได้ แต่จะไม่สามารถทำนายระยะเวลาการสัมผัสการชน และแรงชนสูงสุดได้ ดังนั้นจึงสามารถนำสมการมาใช้ได้บ้างส่วนสำหรับการวิเคราะห์ผลที่เกิดจากแรงกระแทกบนโครงสร้างวัสดุผสม

$$V_{A1} + V_{A2} = V_{B1} + V_{B2} \quad (2.4)$$

$$m_A V_{A1} + m_B V_{B1} = (m_A + m_B) V_2 \quad (2.3)$$

### 2.1.3.2 การชนแบบไม่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล

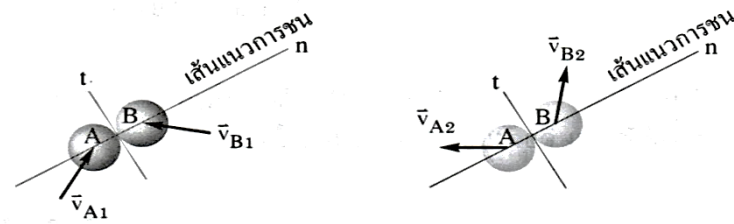
การชนแบบไม่ผ่านศูนย์กลางมวล (Oblique central impact) โดยความเร็วของวัตถุทั้งสองจะไม่อยู่บนเส้นแนวการชนแสดงในรูปที่ 2.6 โดยความเร็วหลังชนนี้จะไม่ทราบทั้งขนาดและทิศทางจึงทำให้มีตัวแปรอิสระ 4 ตัวไม่ทราบค่า ซึ่งจะใช้สมการที่ 2.5 และ 2.6 แก้อาค่าพร้อมกันโดยสมการที่ 2.6 จะพิจารณาเป็นแบบค่าสัมประสิทธิ์แบบคืนตัว  $e < 1$

$$m_A (V_{A1})_n + m_B (V_{B1})_n = m_A (V_{A2})_n + m_B (V_{B2})_n \quad (2.5)$$

$$(2.6)$$

$$e = \frac{(V_{B2n} - V_{A2n})}{(V_{A1n} - V_{B1n})}$$

โดย  $n$  เป็นเส้นแนวการชน (แกน  $n$ )



รูปที่ 2.6 การชนแบบไม่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล [7]

#### 2.1.4 แรงกระแทกจากวัตถุกระสุน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะทางกายภาพของหัวกระสุน (Projectile) และแรงกระแทกที่เกิดขึ้นจากเคลื่อนที่ด้วยความเร็วของวัตถุ (Ballistic Impact) ซึ่งรูปแบบของการเสียหายของวัสดุขึ้นอยู่กับลักษณะการสัมผัสและจุดรับแรง รูปร่างของหัวกระสุนซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.7 คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาเป็นแผ่นประกบหน้า (Face sheets) และแกนกลาง (Core) โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.7 ลักษณะของ Projectile โดยทั่วไปที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ Ballistic impact ได้ ดังนี้  
 a) Fragment simulating projectile b) Browning machine gun ammunition c) Spherical hard ceramic or metal ball และ และ d) blunt, hemispherical and flat head (ขนาดโดยทั่วไปตั้งแต่ 0.22-0.50 mm) [8]

##### 2.1.4.1 ลักษณะที่สำคัญของวัตถุกระสุนและการจำแนก

ในการศึกษาวิจัยจะใช้อาวุธปืนทดสอบนี้คือ M-16 หรือเรียกว่า เอ็ม-16 ซึ่งเป็นอาวุธที่สามารถเทียบเท่ากับกระสุนความรุนแรงระดับ III ได้ และเนื่องจากเป็นอาวุธหลักที่มีประจำการในกองทัพไทย ซึ่งลักษณะทางกายภาพและอนุภาพ เอ็ม-16 เป็นชื่ออาวุธปืนที่หลายคนฟังคุ้นหูแม้

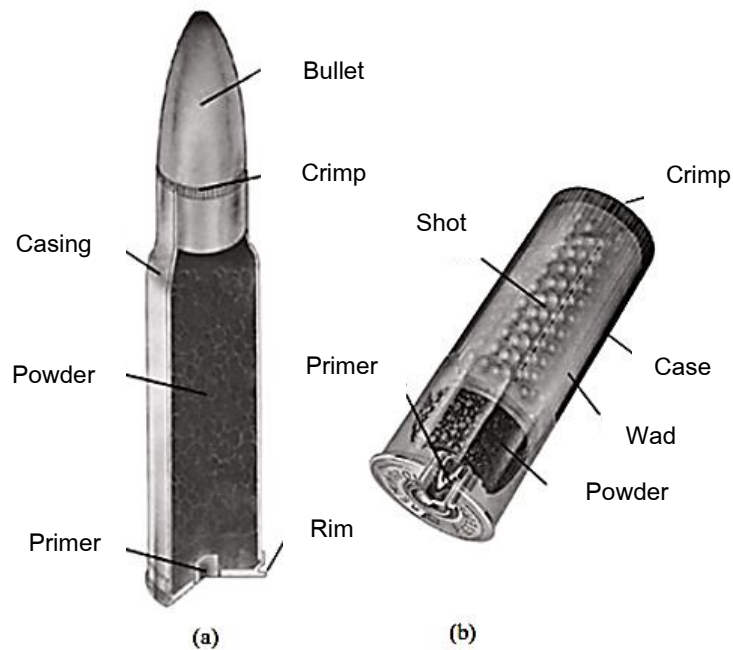
จะไม่คุ้นเคย เพราะอาวุธชนิดนี้มิได้ใช้มาตั้งแต่สมัยสงครามเวียดนามเรื่อยมาจนกระทั่งถึงปัจจุบัน และเป็นยุทธโศภณชนิดหนึ่งที่กองทัพไทยมีประจำการ อย่างไรก็ตามก็ดีเนื่องจากไม่ปรากฏข้อมูลกระสุนปืนชนิดนี้ในตารางข้อมูลแสดงระดับการป้องกันกระสุนปืนตามมาตรฐาน NIJ แล้วบุคคลทั่วไปที่ไม่มีความรู้เรื่องอาวุธปืนจะมั่นใจได้อย่างไรว่า วัสดุป้องกันกระสุนที่มีระดับการป้องกันกระสุนปืนระดับ III สามารถป้องกันกระสุนปืนเอ็ม-16 ได้ ซึ่งรายละเอียดการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 2.3 ด้วยเหตุที่กระสุนปืนเอ็ม-16 มีลักษณะหลายอย่างแตกต่างจากกระสุนปืนขนาด 7.62 mm ตั้งแต่ขนาด น้ำหนัก และความเร็วในการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 2.8 ดังนั้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพจึงต้องพิจารณาจากพลังงานในการเคลื่อนที่ของกระสุน ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการทางฟิสิกส์คือ สมการพลังงานจลน์ [9] จากข้อมูลตารางที่ 2.3 ข้อมูลค่าพลังงานการเคลื่อนที่ของกระสุนปืนเอ็ม-16 และกระสุนปืน 7.62 mm ที่ได้จากการคำนวณแสดงให้เห็นว่า แม้กระสุนปืนเอ็ม-16 จะมีความเร็วในการเคลื่อนที่มากกว่า แต่เนื่องจากหัวกระสุนมีมวลน้อย ทำให้กระสุนปืนเอ็ม-16 มีพลังงานน้อยกว่ากระสุนปืน 7.62 mm ดังนั้นผู้ใช้งานวัสดุที่สามารถป้องกันกระสุนปืนระดับ III ตามมาตรฐาน NIJ จึงมั่นใจได้ว่า วัสดุป้องกันกระสุนสามารถป้องกันการทะลุทะลวงของกระสุนปืนเอ็ม-16 ได้แน่นอน ส่วนประกอบของกระสุนปืนแสดงดังรูปที่ 2.9 และ 2.10



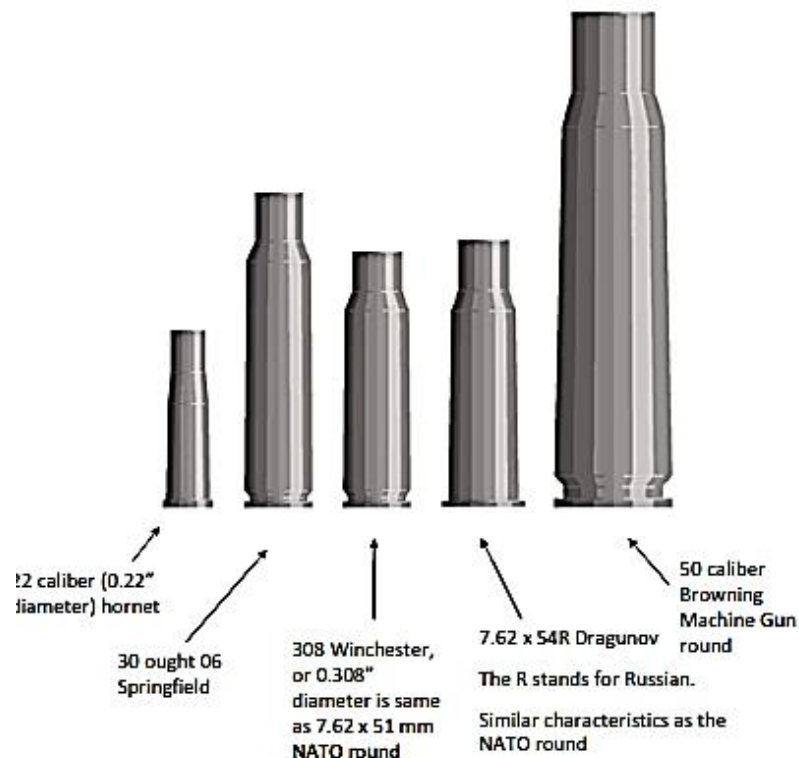
รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบขนาดและลักษณะของกระสุนเอ็ม-16 (ซ้าย) กระสุน .30-30 mm (กลาง) และกระสุน 7.62 mm (ขวา) [10]

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงพลังงานในการเคลื่อนที่ของกระสุนปืนเอ็ม-16 กับกระสุนปืนที่ใช้ทดสอบ  
 เลือกระดับ IIIA และ III [9]

ระดับการป้องกัน	ชนิดกระสุน	น้ำหนักกระสุน (g)	ความเร็วกระสุน (m/s)	พลังงาน (J)
IIIA	.357 SIG	8.1	457.1	846
IIIA	.44 Magnum	15.6	445.1	1,545
III	(M-16) 5.56 mm NATO	5.18	940	2,288
III	7.62 mm. NATO	9.33	838	3,275



รูปที่ 2.9 ลักษณะส่วนประกอบทั่วไปของวัตถุกระสุน (Modern centerfire ammunition)  
 a) Bullet, Primer, Propellant, Case. และ b) Shot shell cartridge and parts [10]



รูปที่ 2.10 ลักษณะบรรจุภัณฑ์และการจำแนกประเภท [8]

#### 2.1.4.2 พลังงานที่ใช้วัดในการกระแทก

จากการทดสอบพลังงานจากการกระแทก (Impact Energy) ของวิธีการวัดแบบ Izod และ Charpy impact testing พลังงานสูงสุด (Maximum energy)  $E_o$  ที่ตกกระทบกับวัตถุที่ใช้ทดสอบหาได้จากสมการสมการพลังงาน [8] สมการพลังงาน ดังนี้

$$E_o = \frac{1}{2}mV^2 \quad (2.7)$$

โดย

$E_o$  พลังงานสูงสุดที่ใช้ในการกระแทกวัตถุ (Maximum energy) (J)

$m$  น้ำหนักของวัตถุที่มากระแทก (Mass of impactor) (kg)

$V$  ความเร็วของวัตถุที่มากระแทก (Velocity just prior to impact) (m/s<sup>2</sup>)

เมื่อตัวกระแทก (Impactor) กระแทกกับวัตถุที่ใช้ในการทดสอบ พลังงานทั้งหมดจะสูญเสียไปให้กับวัตถุที่ใช้ทดสอบ  $\Delta E_o$  สามารถแสดงได้ดังรูปสมการที่ 2.8 [8] ดังนี้

$$\Delta E = E_o - E_f = \frac{1}{2}m(V_o^2 - V_f^2) \quad (2.8)$$

โดย

$\Delta E$	ความแตกต่างของพลังงานที่สูญเสียไป (Differential energy absorption) (J)
$E_o$	พลังงานเริ่มต้นที่ใช้ในการกระแทกวัตถุ (Original energy) (J)
$E_f$	พลังงานหลังจากที่ใช้ในการกระแทกวัตถุ (J) (Kinetic energy of time after initial contact)
$V_o$	ความเร็วเริ่มต้นของตัวกระทบ (Initial Velocity of impactor) (m/s <sup>2</sup> )
$V_f$	ความเร็วหลังจากการกระทบ (Final Velocity of impactor) (m/s <sup>2</sup> )
$m$	น้ำหนักของวัตถุที่มากระทบ (Mass of impactor) (kg)

จากสมการสมดุลเมื่อตัวกระทบกระทบกับวัสดุทดสอบ เกิดการเสียหายแบบทะลุ ซึ่งพลังงานจะถูกดูดซับพลังงานไว้ในรูปของพลังงานการแตกหักของวัสดุ (Fracture energy) สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.9

$$E_o = E_{ab} \quad (2.9)$$

โดย

$E_o$	พลังงานสูงสุดที่ใช้ในการกระแทกวัตถุ (Maximum energy) (J)
$E_{ab}$	พลังงานที่ถูกดูดซับไว้จากวัสดุ (J)

จากความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานของแรงกระทบได้นั้นจะต้องขึ้นอยู่กับตัวแปรดังนี้ พลังงานการแตกหักของวัสดุ การกระจายแรงของวัสดุเป็นต้น ซึ่งงานวิจัยมีสมมติฐานว่าการเสียหายแบบเจาะทะลุนั้นเกิดจากพลังงานการแตกหัก ของวัสดุเพียงอย่างเดียวต่อพื้นที่ที่เจาะทะลุ พลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุหาได้จากสมการที่ 2.10

$$E_{ab} = \gamma A \quad (2.10)$$

โดย

$E_{ab}$	พลังงานที่ถูกดูดซับไว้จากวัสดุ (J)
$\gamma$	พลังงานการแตกหักที่ใช้ในการเจาะทะลุของวัสดุให้เกิดการเสียหายต่อพื้นที่หน้าตัด (J/m <sup>2</sup> )
$A$	พื้นที่หน้าตัดของตัวกระทบและความหนา (m <sup>2</sup> )

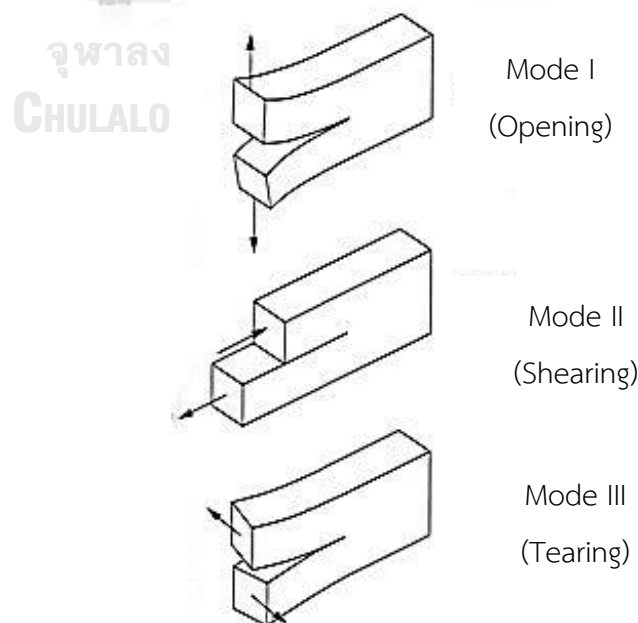
ดังนั้นในการออกแบบวัสดุรับแรงกระแทกต้องเลือกวัสดุที่มีค่า  $\gamma$  มากเพื่อให้สามารถป้องกันการเจาะทะลุได้ ซึ่งจะส่งผลให้ค่า  $E_o < E_{ab}$  จะทำให้วัสดุป้องกันแรงกระแทกได้ทั้งหมดและไม่เกิดการเจาะทะลุซึ่งค่า  $\gamma$  จะขึ้นอยู่กับความหนาและพื้นที่หน้าตัดของวัตถุที่มากระแทกและผนังทดสอบตัวอย่าง

## 2.2 ลักษณะการเสีรูป (Failure mode)

2.2.1 การเสีรูปพื้นฐานของวัสดุโดยทั่วไปจะมีรูปแบบการเสีรูปอยู่ 3 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งแต่ละรูปแบบมีดังนี้

- รูปแบบการที่ 1 หรือ รูปแบบการแบบเปิด (Opening or peel mode :Mode I)
- รูปแบบการที่ 2 หรือ รูปแบบการเฉือน (Forward sliding shear mode :Mode II)
- รูปแบบการที่ 3 หรือ รูปแบบการฉีก (Tearing mode :Mode III)

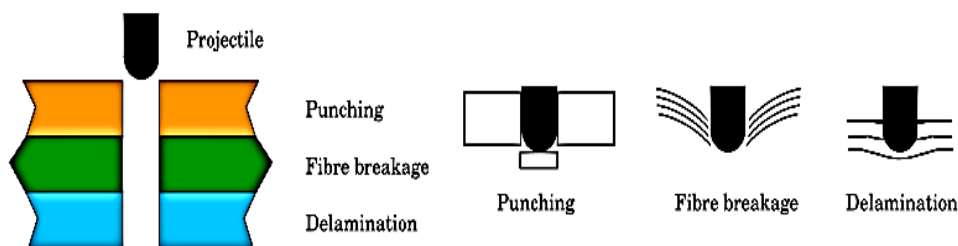
ความต้านทานการเพิ่มขึ้นของการแยกตัวออกตามแนวระนาบที่ขนานกัน (Delamination) ซึ่งจะอธิบายในรูปของค่าความเหนียวต้านการแตกหัก (Interlaminar fracture toughness) ซึ่งจะวัดค่าจาก Strain energy release rate ( $G_I, G_{II}$  or  $G_{III}$ ) ที่ปลดปล่อยพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของการเกิดรอยแยก (Delamination growth) ซึ่งในการใช้งานจริงชิ้นส่วนอาจใช้รับภาระ 2 หรือ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกัน โดยเรียกรูปแบบการนี้ว่า ภาระแบบผสม (Mixed-Load loading)



รูปที่ 2.11 รูปแบบพื้นฐานของการเกิดรอยแยก [11]



แต่รูปแบบความเสียหายที่ได้รับจากการรับแรงกระแทกของตัวกระแทก (Ballistic impact) จะมีอยู่ 3 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 2.12 คือแบบการเจาะ, ความเสียหายของเส้นใย และการแยกตัวออกตามแนวระนาบที่ขนานกัน



รูปที่ 2.12 รูปแบบความเสียหายเกิดจากตัวกระแทก [12]

## 2.2.2 การเจาะทะลุ

การเสียหายแบบเจาะทะลุ (Penetration) คือ ลักษณะความเสียหายเมื่อเส้นใยของวัสดุรับแรงที่มากกระทำมีค่าสูงสุด ส่งผลให้วัตถุที่มากกระแทกเคลื่อนที่ได้อย่างสมบูรณ์ ทะลุผ่านชั้นวัสดุนั้น ค่าพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อวัตถุที่ถูกกระแทกมีความหนาเพิ่มขึ้น [8, 13] โดยลักษณะการเคลื่อนที่และความเสียหายแบบเจาะทะลุอธิบายได้ดังรูปที่ 2.13 โดยเมื่อตัวกระแทกกระทบกับผิวหน้าของวัสดุ จะทำให้เกิดแรงอัด เมื่อพลังงานจลน์มีค่ามากกว่าพลังงานการแตกหักของวัสดุ จะส่งผลให้ผิววัสดุเกิดความเสียหายหรือการฉีกขาดด้วยแรงเฉือน นอกจากนี้ยังมีตัวแปรสำคัญอื่นๆ ที่มีผลต่อการดูดซับพลังงาน เช่น ขนาดของเส้นใย การเรียงตัวของเส้นใย ลักษณะการหักทอ เป็นต้น และมีตัวแปรอื่นๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วนั้น มีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุผสมแบบแผ่น (Composite lamina) โดยสามารถอธิบายสมการการดูดซับพลังงานโดยใช้แบบจำลองการเจาะทะลุซึ่งในการทดลองนี้จะใช้สมการที่ 2.11 สำหรับทำนายลักษณะของแผ่นวัสดุผสม [8] ดังนี้

$$E_{ab} = \sqrt{2\pi} \gamma t (t + d) \quad (2.11)$$

โดย

$E_{ab}$  พลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุหรือพลังงานที่ดูดซับโดยวัสดุ (J)

$\gamma$  พลังงานการแตกหัก<sup>2</sup> (J/m<sup>2</sup>)

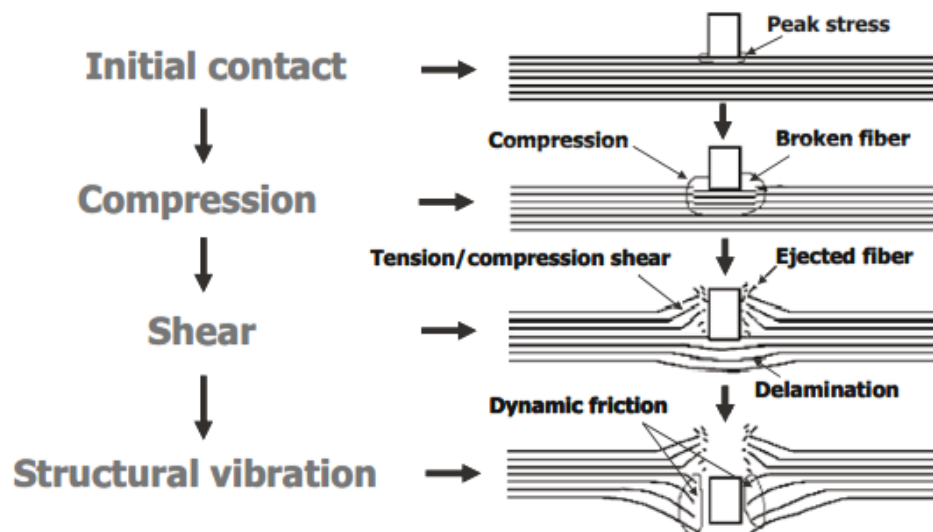
$t$  ความหนาของแผ่น (Plate Thickness) (m)

<sup>2</sup> 1 Pascal (MPa) = 1 Newton/meter<sup>2</sup> (N/m<sup>2</sup>)

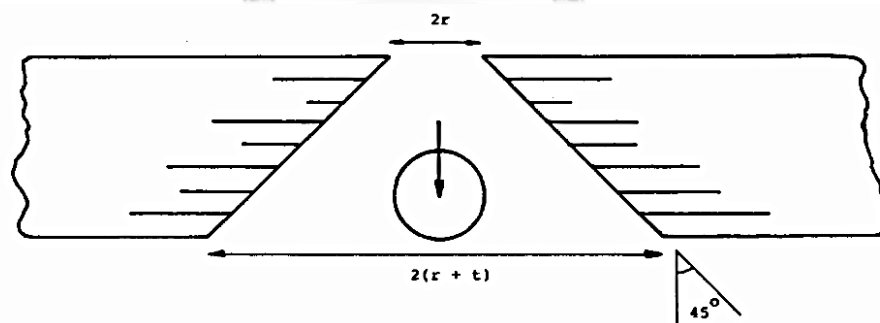
1 Newton Meter (N.m) = 1 Joule (J)

$d$  เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกระทบ (Diameter of impactor) (m)

จากสมการที่ 2.5 มีสมมุติฐานว่าลักษณะของวัตถุที่มากระทบนั้นมีลักษณะเป็นทรงกรวยหรือครึ่งวงกลมซึ่งจะทรงผลให้เกิดแรงเฉือนดังรูปที่ 2.14 โดยลักษณะแบบจำลองความเสียหายของวัสดุจะคิดเป็นสองเท่าของพื้นที่หน้าตัดของตัวกระทบ เมื่อวัสดุไม่สามารถดูดซับพลังงานจนได้ทั้งหมด โดยลักษณะการแยกตัวส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นทำมุม  $45^\circ$  [13]



รูปที่ 2.13 ลำดับการเคลื่อนที่ของตัวกระทบผ่านวัสดุผสมแบบแผ่น [8]

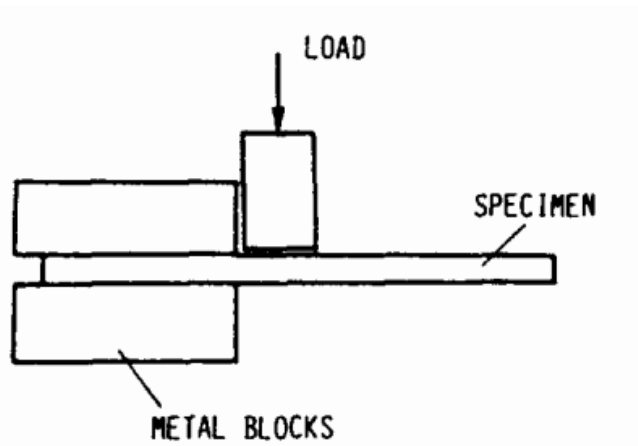


รูปที่ 2.14 ลักษณะการเกิดแรงเฉือนของบริเวณที่มีการเจาะทะลุ [13]

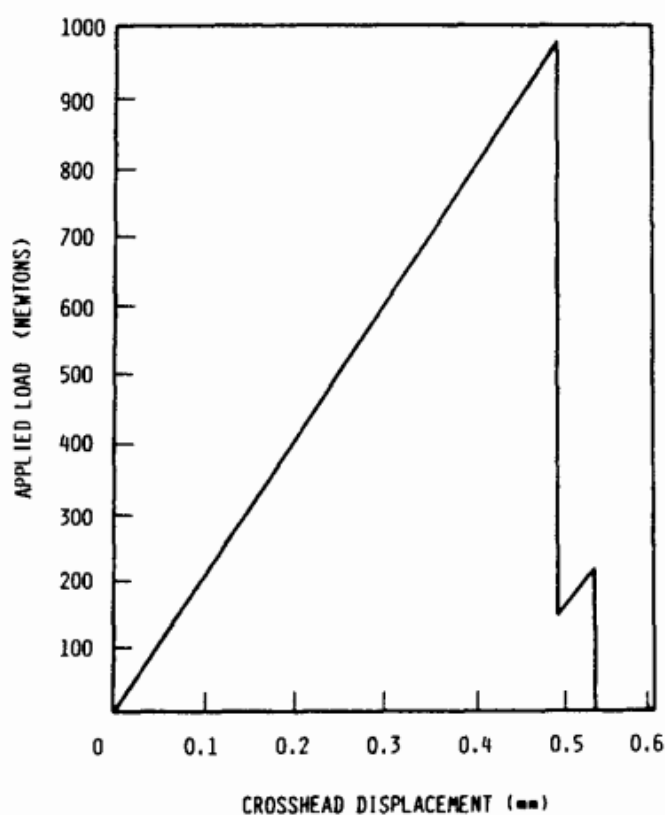
### 2.2.2.1 พลังงานการแตกหัก

การทดสอบเพื่อหาค่าพลังงานการแตกหัก (Fracture Energy) ของวัสดุจากการทดสอบของ W.J.Cantwell [13] ได้มีการทดสอบโดยการนำวัสดุผสม ที่มีลักษณะการเรียงตัวในทิศทางต่างๆ และความหนาขนาดต่างๆมาประกอบเป็นวัสดุผสมแบบไฮบริดคอมโพสิท (Hybrid composite) แล้ว

นำไปทดสอบการเสียรูป โดยลักษณะการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.15 จากนั้นเพิ่มแรงกระทำและบันทึกการเสียรูปของวัสดุเป็นระยะๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใส่กับระยะการเสียรูป (Load – displacement curve)



รูปที่ 2.15 ลักษณะการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรง (Load) และระยะการขจัด (Displacement) ซึ่งใช้วัสดุผสมประสานด้วยเรซิน [13]

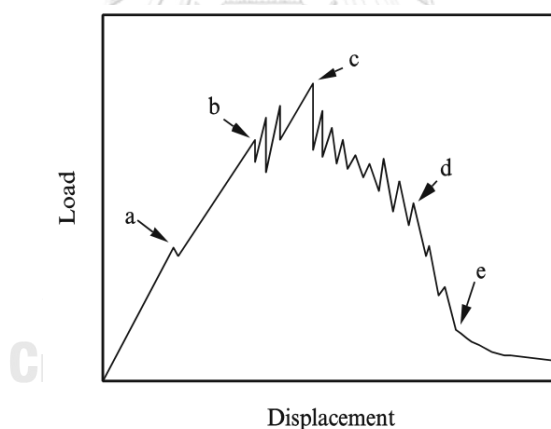


รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการเคลื่อนที่ของวัสดุผสมที่มีการจัดเรียงตามองศา และมีจำนวนชั้นเท่ากับ 4 ชั้น [13]

จากการทดสอบสามารถหาค่าพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดแล้วนำมาหารกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่ทำกรทดสอบ จะได้ค่าพลังงานแตกหัก ของวัสดุมีหน่วยเป็น  $J/m^2$  นอกจากนี้พบว่าค่าพลังงาน ของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งแปรผันตรงกับขนาดของพื้นที่หน้าตัด

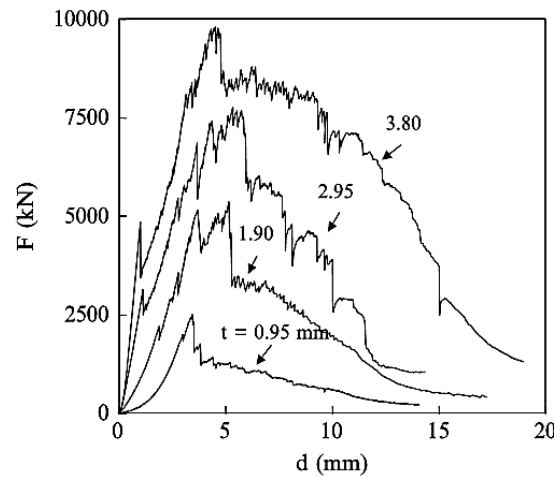
### 2.2.2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการเสียรูป

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการเสียรูป (Load-displacement curve) ซึ่งเกิดจากการทดสอบของวัสดุที่มากระเทกมีความเร็วต่ำ<sup>3</sup> จากการทดสอบนี้สามารถให้ข้อมูลในการเสียรูป ลักษณะการเสียรูปของวัสดุได้ภายใต้แรงกระทำแบบพลวัต (Dynamic load) นอกจากนี้ความแตกต่างระหว่างความหนาของวัสดุ ชนิดของวัสดุและโครงสร้างการเรียงตัวของวัสดุส่งผลให้ลักษณะของกราฟแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นถึงลักษณะแรงที่เกิดขึ้นในจุดต่างๆ และรูปที่ 2.18 แสดงถึงความสัมพันธ์ของกราฟที่เปลี่ยนไปอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความหนา [5] นอกจากนี้จำนวนชั้นและการเรียงตัวที่ต่างกันส่งผลให้พลังงานที่ใช้เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังแสดงดังรูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้นต่อการเพิ่มขึ้นของความหนาโดยมีการเรียงตัวแบบ  $45^\circ$

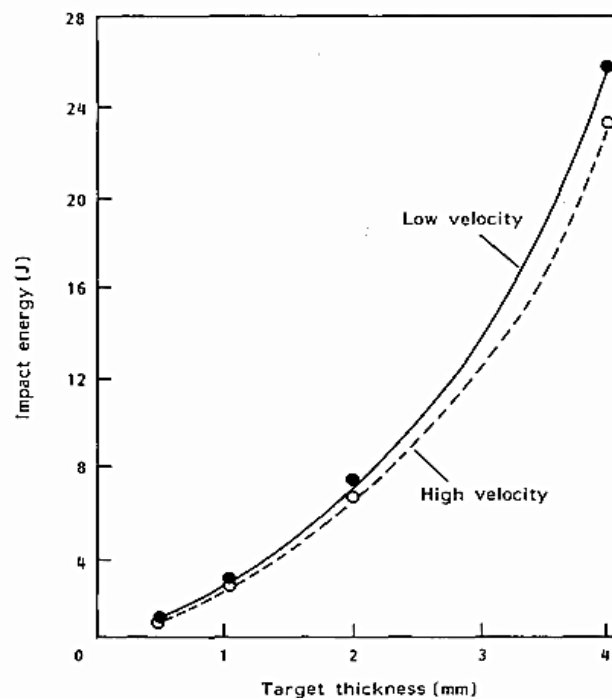


รูปที่ 2.17 ลักษณะจุดสำคัญจากการเปลี่ยนแปลงของแรงและวัสดุ [14]

<sup>3</sup> Low velocity  $<10m/s^2$



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการขจัด ที่เปลี่ยนไปตามความหนาของวัสดุ [14]

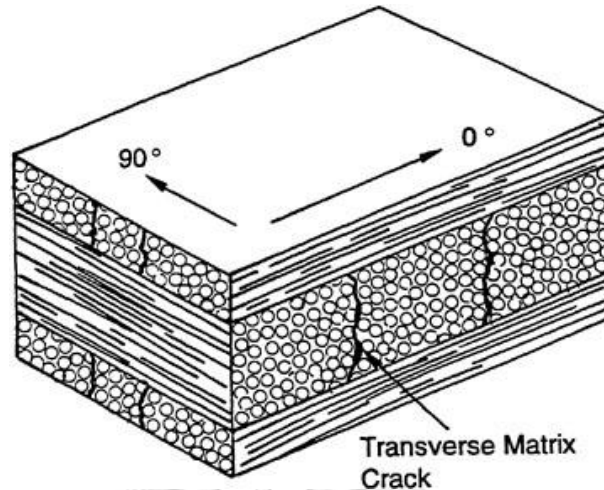


รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานต่อความหนา โดยเปรียบเทียบทั้งความเร็วต่ำและความเร็วสูง [15]

### 2.2.3 ความเสียหายของเนื้อพื้นวัสดุ

ความเสียหายแบบที่เนื้อพื้นวัสดุ (Matrix damage) จะเกิดจากแรงกระแทกที่ความเร็วต่ำ โดยปกติจะเกิดขึ้นในรูปของรอยแตก หรือรอยแตกระหว่างรอยเชื่อมของเส้นใยและเนื้อพื้นวัสดุ (Matrix) และการแยกออกจากกันของชั้นส่วนในเบื้องต้น ดังรูปที่ 2.20 โดยรอยแตกส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นขนานกับระนาบตามแนวเส้นใยของวัสดุผสมแบบเรียงตัวทิศเดียว หรือทิศตั้งฉาก โดยรอยแตก

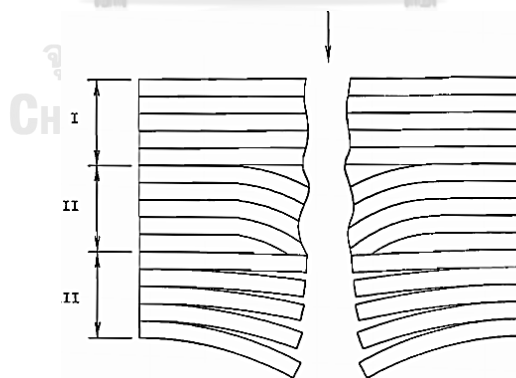
ที่เกิดขึ้นด้านตรงข้ามของวัตถุที่มากระทบ จะอยู่ในรูปของ Bending crack เพราะรอยแตกจะเกิดจากผลของ Tensile bending stress ที่มีค่าสูงมากๆ



รูปที่ 2.20 แสดงการแตกหักของแผ่นวัสดุผสม [16]

#### 2.2.4 การแตกหักของเส้นใย

การแตกหักของเส้นใย (Fiber breaking) จะเกิดขึ้นหลังจากเกิดรอยร้าวหรือการแยกออกจากกันของวัสดุผสม ซึ่งโดยปกติแล้วจะเสียหายได้ก็ต่อเมื่อได้รับแรงเฉือน และวัสดุมีค่า ความเค้นดัด (Bending stress) สูง และก่อให้เกิดความเสียหายแบบเงาะทะเลในที่สุด ดังรูปที่ 2.21 ซึ่งแสดงในการทดสอบวัสดุแต่ละครั้งสามารถเกิดการเสียหายได้ในทุกรูปแบบ การแตกหักของเส้นใยภายใต้แรงจะเกิดขึ้นในโซนที่สองและโซนที่สาม



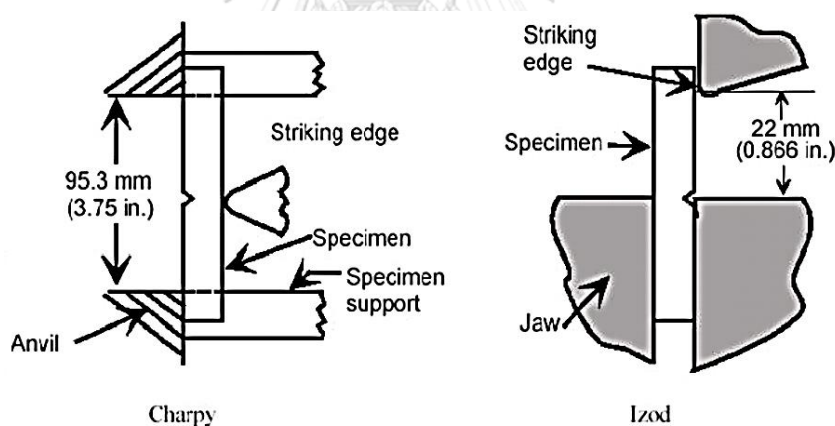
รูปที่ 2.21 แสดงความเสียหายในแต่ละโซนของวัสดุผสมแบบแผ่น โดย region I: shear of fiber, region II: tensile of fiber failure, และ region III: tensile of fiber failure and delamination [17]

## 2.3 เครื่องมือและการทดสอบแรงกระแทกในห้องทดลอง

### 2.3.1 การทดสอบแบบ Izod และ Charpy

แรงกระแทกที่มีความเร็วต่ำสามารถประยุกต์การทดสอบได้หลากหลายรูปแบบ ซึ่งโดยทั่วไป จะใช้การแกว่งของลูกตุ้ม (Pendulum) ,การตกของวัตถุ (Dropping weight), การหมุนล้อ (Rotating flywheel) และการยิงกระสุนจากเครื่องยิงแก๊ส (Gas gun) ภายใต้แรงกระทำ เช่น แรงดัด (Flexure), แรงดึง (Tension), แรงกด (Compression) และ แรงบิด (Torsion) โดยเครื่องมือที่นิยมใช้มากที่สุดในการวิเคราะห์แรงกระแทกแบบความเร็วต่ำนั้นคือการทดสอบแบบ Izod และ Charpy tester และการตกของวัตถุ ซึ่งการทดสอบแบบ Izod และ Charpy จะเป็นการทดสอบแบบการแกว่งของลูกตุ้มแสดงดังรูปที่ 2.22 โดยพลังงานจะถูกดูดซับในรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic) และ แบบพลาสติก (Plastic) ซึ่งผลกระทบของน้ำหนักของลูกตุ้มจะทำให้เกิด Stress ซึ่งเป็นเหตุให้วัสดุทดสอบเสียรูป

การทดสอบแบบ Izod และ Charpy บ่อยครั้งจะถูกทดสอบเพื่อเปรียบเทียบแรงกระแทกของวัสดุแบบ Isotropic ซึ่งมีส่วนผสมที่แตกต่างกัน การทดสอบทั้งสองแบบล้วนเป็นการแกว่งของลูกตุ้ม โดยการทดสอบแบบ Charpy จะใช้จตุรกรรับอย่างง่าย (Simple beam) ในขณะที่ Izod จะใช้จตุรกรรับแบบ Cantilever beam<sup>4</sup>



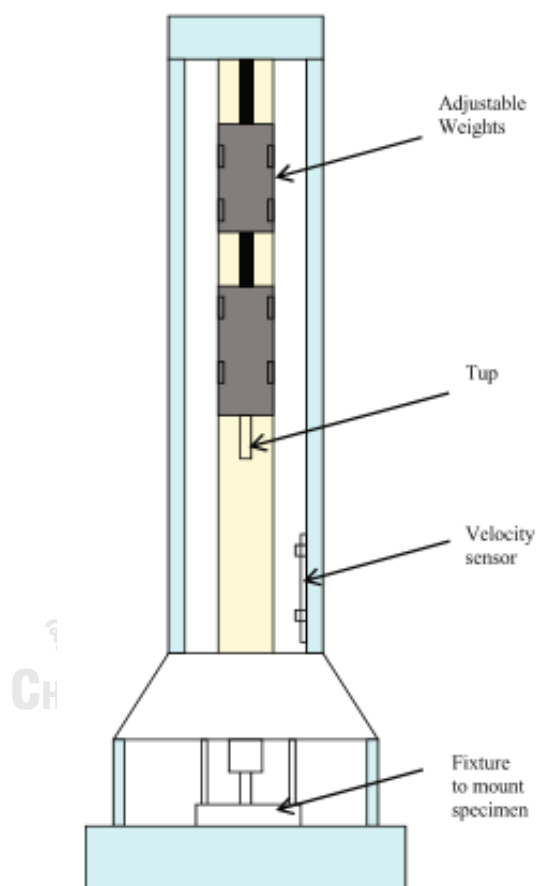
รูปที่ 2.22 การทดสอบแบบ Izod และ Charpy [13]

### 2.3.2 การทดสอบแบบตกกระทบของวัตถุ

การทดสอบแบบตกกระทบของวัตถุ (Falling weight impact testing) การทดสอบชนิดนี้ ถูกประยุกต์ใช้กับการทดสอบแรงกระแทกของของวัสดุผสมแบบลามิเนตหรือแบบแซนวิชได้ โดยรูปแบบของเครื่องมือแสดงดังรูปที่ 2.23 และ 2.24 รูปแบบอื่นๆ ซึ่งประกอบด้วยแท่นปล่อยที่ติดตั้งลูกดอก (Dart หรือ Tub) โดยเพิ่มน้ำหนักที่ต้องการทดสอบแรงกระแทกให้กับลูกดอก และปล่อยให้

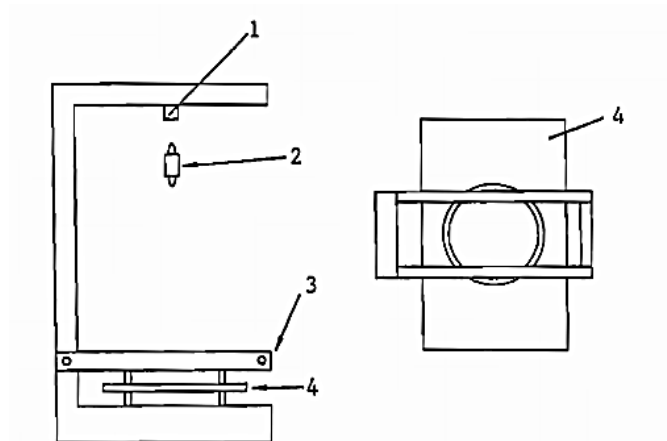
<sup>4</sup> ASTM E23 for metals and ASTM D 256 for plastic

กระแทกกับวัสดุทดสอบ นอกจากนี้ยังติดตั้งเครื่องวัดความเร็วสองตัว ซึ่งอาจจะห่างกันประมาณ 75 mm หรือ 3" และ 150 mm หรือ 6" การวัดจะขึ้นอยู่กับเวลาที่เคลื่อนที่ของหัวลูกตอกจากจุดแรก จนถึงจุดที่สอง ซึ่งจะถูกบันทึกด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเวลา จากจุดที่สัมผัสของวัสดุ และ Striker transvers ตลอดความหนาของวัสดุ พลังงานหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเวลา หรือ กราฟแรงกับระยะการขจัด และกราฟความสัมพันธ์แรง เวลา และพลังงาน เป็นต้น ซึ่งลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง - เวลา และพลังงาน - เวลาที่ได้ จากการทดสอบนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.25 a) และ 2.25 b)

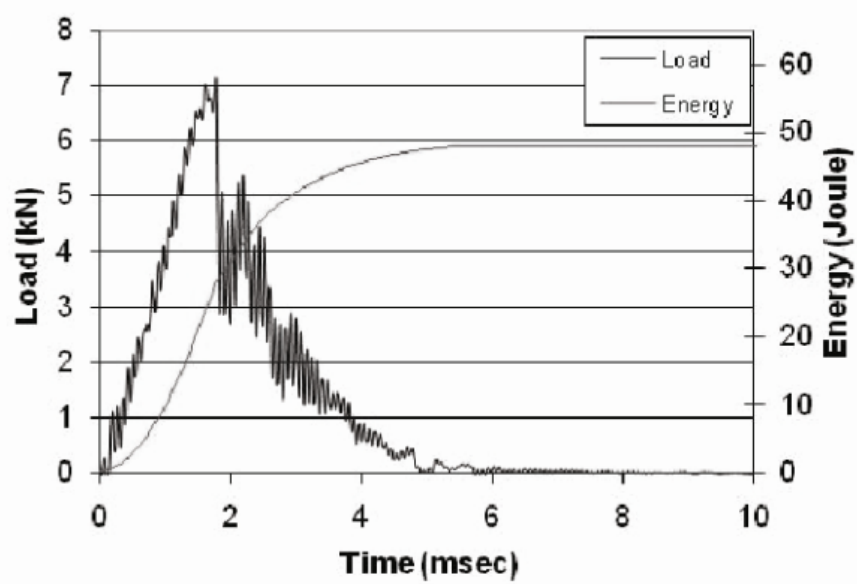
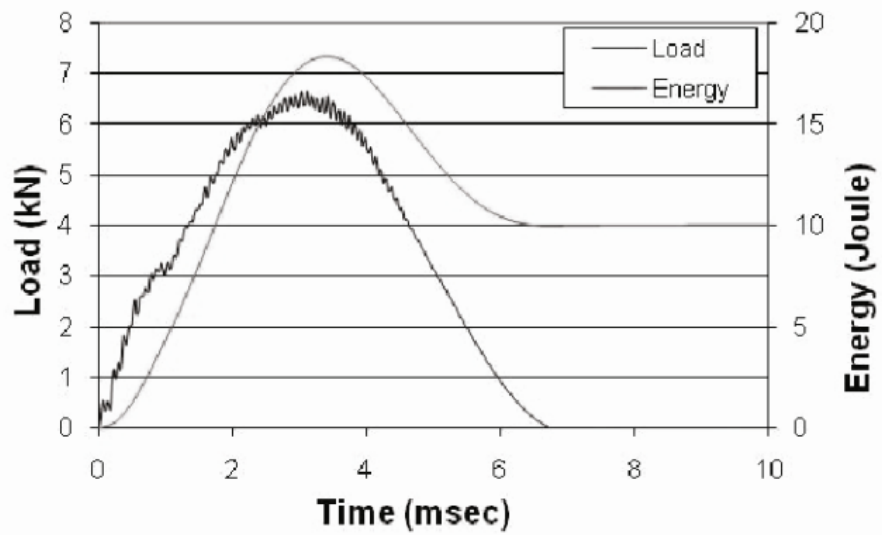


รูปที่ 2.23 เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบความเร็วต่ำโดยการปล่อยวัตถุตกกระทบ [8]



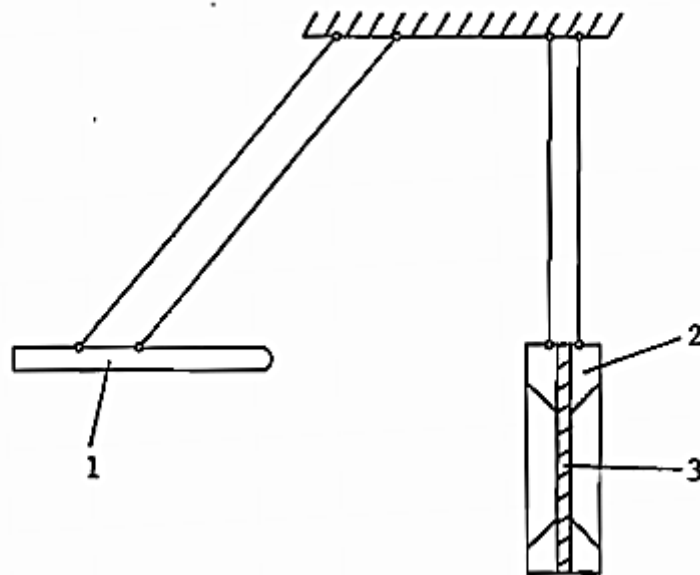


รูปที่ 2.24 เครื่องปล่อยวัตถุ 1) แม่เหล็ก 2) ตัวตกกระทบ 3) แท่นจับ 4) วัสดุทดสอบ [15]

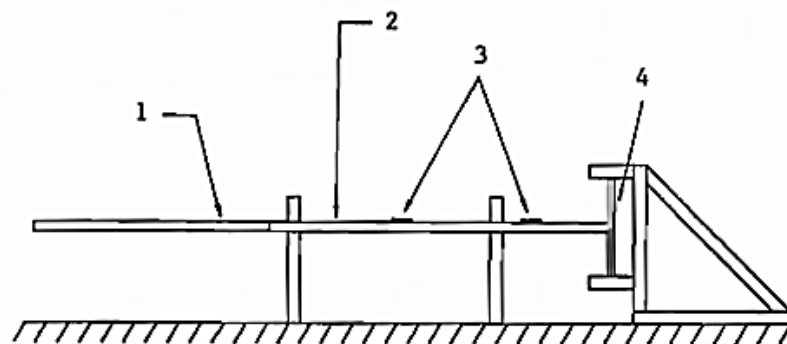


รูปที่ 2.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง-เวลา และ พลังงาน-เวลา [8]

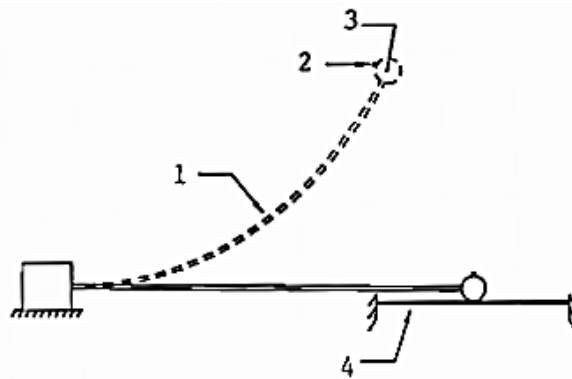
นอกจากนี้ยังมีการทดสอบรูปแบบอื่นที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อหาค่าแรงกระแทกในรูปแบบต่างๆ เช่น รูปที่ 2.26 เครื่องทดสอบแรงกระแทกโดยการแกว่งท่อ ซึ่งประกอบด้วยลูกบอลหรือท่อที่มีน้ำหนักยึดติดกับเครื่อง โดยติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร็ว หรือเครื่องวัดแรง (Force transducer) และรูปที่ 2.27 และ 2.28 แสดงการทดสอบแบบ Hopkinson-type pressure bar และ Cantilever – type ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลเหล็ก 1” ถูกติดตั้งด้วยเครื่องวัดความเร็ว ตัวคานจะทำมาจากไฟเบอร์กลาส (Fiber glass) และการทดสอบแรงกระแทกแบบความเร็วสูงที่นิยมคือการติดตั้งเครื่องทดสอบแบบเครื่องยิงกระสุนโดยใช้แก๊ส ดังรูปที่ 2.29 และในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบด้วยการยิงกระสุนปืนจริงเพื่อจำลองและวิเคราะห์การเสียรูปของการทดสอบแรงกระแทกแบบความเร็วสูง ซึ่งการทดสอบนั้นจะอ้างอิงตามมาตรฐาน NIJ ตามที่ได้กล่าวไป



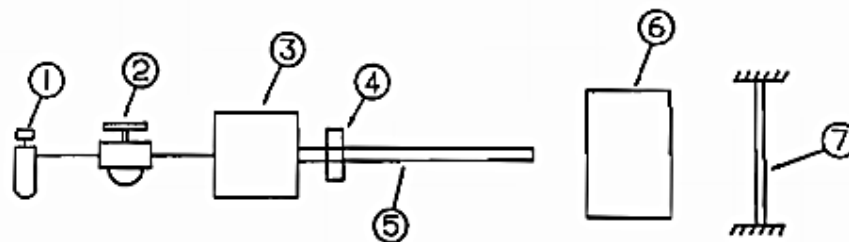
รูปที่ 2.26 เครื่องทดสอบแบบแกว่งท่อ (Pendulum tube impactor) 1) Impactor 2) Holder 3) Specimen [15]



รูปที่ 2.27 อุปกรณ์ทดสอบแบบ Hopkinson-type pressure bar 1) Projectile 2) Input bar 3) Strain gauge 4) Specimen [15]

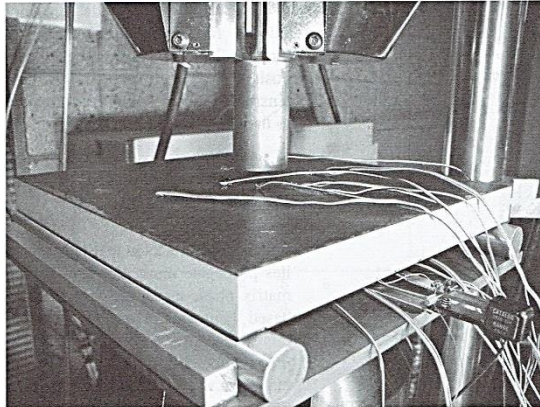


รูปที่ 2.28 อุปกรณ์ทดสอบแบบ Cantiliver type 1) Flexible beam 2) Accelerometer 3) Mass  
4) Specimen [15]

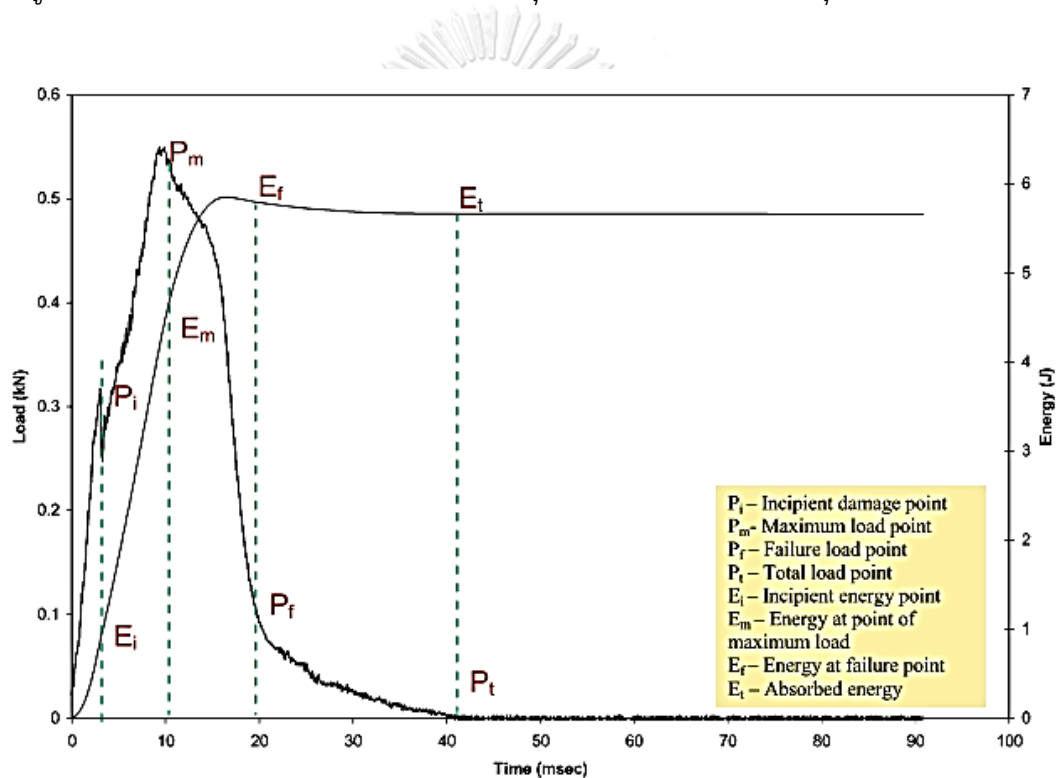


รูปที่ 2.29 Gas-gun 1) Air filter 2) Pressure regulator 3) Air tank 4) Valve 5) Tube 6)  
Velocity measuring device [15]

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างของวัสดุผสมมีความยากที่จะวิเคราะห์ เพราะว่าวัสดุมีลักษณะพฤติกรรมเป็นแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) และไม่ยืดหยุ่น (Inelastic) รวมทั้งยังมีความเสียหายแบบซับซ้อน ด้วยสาเหตุนี้อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างแบบวัสดุผสมหรือแผ่นโครงสร้างประกบแบบแซนวิช ภายใต้โหลดกระทำแสดงดังรูปที่ 2.30 ผังโครงสร้างประกบแบบแซนวิช ด้วยจุดรองรับอย่างง่าย ซึ่งจะมีจุดรองรับสี่จุดข้างใต้ โดยการทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบภายใต้ Monotonic และแรงกระแทก ซึ่งความเสียหายจะถูกประเมินแบบไม่ทำลาย โดยค่าความแข็งจะถูกวัดหลังจากที่วัสดุได้รับแรงกระแทก (Compression after impact) แรงที่กระทำสามารถถูกบันทึกด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์และพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่ง ณ จุดใดๆ บนกราฟแสดงความสัมพันธ์ ขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัสดุผสม ความหนา และลักษณะของตัวกระแทก เป็นต้น



รูปที่ 2.30 โครงสร้างประกบแบบแซนวิชด้วยจุดรองรับอย่างง่าย รับแรงจุดกึ่งกลางแผ่น [18]

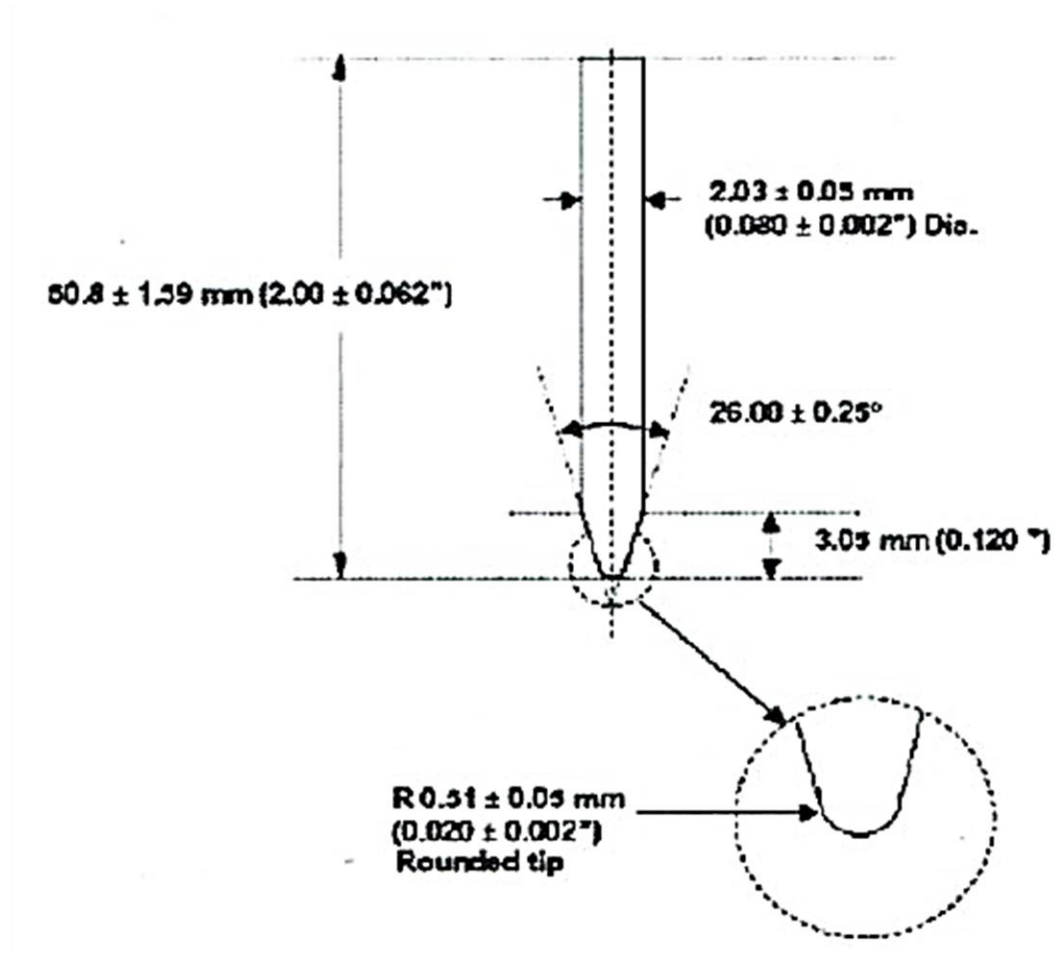


รูปที่ 2.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง-เวลา และ พลังงาน-เวลา พร้อมตัวแปรที่สำคัญที่ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเสียรูป [8]

### 2.3.3 มาตรฐานการทดสอบการเจาะทะลุ

มาตรฐานการทดสอบการเจาะทะลุอ้างอิงมาตรฐาน ASTM F1342-05: Standard test method for protective clothing material resistance to puncture [19] เป็นมาตรฐานการทดสอบวัสดุ เช่น ผ้า เส้นใยต่างๆ เป็นต้น โดยการวัดแรงจากการกดของหัวเจาะ (Puncture probe) เพื่อให้หัวกดเจาะทะลุวัสดุตัวอย่าง ซึ่งตัววัสดุทดสอบตัวอย่างจะต้องถูกวางและยึดติดกับฐานยึดเพื่อ

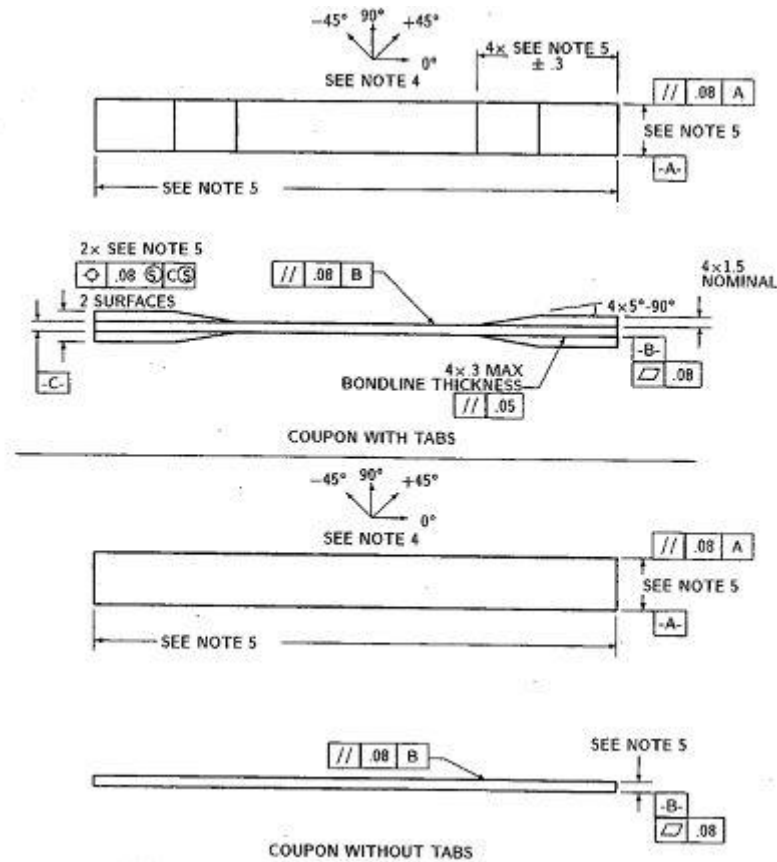
ป้องกันการเคลื่อนที่ และหัวเจาะจะถูกติดตั้งไว้ที่ด้านกด (Compression cell) ของเครื่องทดสอบ โดยหัวเจาะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตลอดการทดสอบ จนกระทั่งชิ้นงานเกิดความเสียหายจากการทะลุของหัวเจาะ โดยการทดสอบนี้จะใช้ข้อมูลของแรงกดและค่าความเหนียว (Elongation or deflection) ของชิ้นงานทดสอบตัวอย่าง ซึ่งลักษณะหัวเจาะที่ต้องเตรียมแสดงดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 ตัวอย่างรูปหน้าตัดของหัวเจาะทดสอบ [19]

#### 2.3.4 มาตรฐานการทดสอบความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสม

มาตรฐานการทดสอบความต้านทานแรงดึง อ้างอิงมาตรฐาน ASTM D3039/D3039M-00 : Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite material [20] ใช้สำหรับทดสอบความต้านทานแรงดึงสำหรับวัสดุผสมที่มีเนื้อพื้นเป็นพอลิเมอร์ เพราะว่าการทดสอบความต้านทานแรงดึงโดยทั่วไปไม่สามารถทดสอบได้เพราะ ชิ้นงานจะมีความเหนียวและยืดหยุ่นมาก จึงเป็นมาตรฐานที่ใช้รองรับการทดสอบเฉพาะกลุ่มวัสดุ แสดงลักษณะชิ้นงานดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 ลักษณะการจัดเตรียมชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง [20]

## 2.4 วัสดุผสม

วัสดุผสม (Composite material) ได้ถูกใช้งานเป็นวัสดุทางวิศวกรรมมาตั้งแต่แรกเริ่ม และในปัจจุบันได้เป็นที่รู้จักมากขึ้นทั้งในสถานที่ที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมและสาขาอื่น ๆ ทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับงานจำพวกโครงสร้างต่างๆ ในช่วงแรกวัสดุผสมเนื้อพอลิเมอร์ได้ถูกนำมาใช้งานทางการทหารในช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง ต่อมาได้ใช้ในอุตสาหกรรมทางเรือในช่วงปลายทศวรรษที่ 40 ถึงต้นทศวรรษที่ 50 ปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เครื่องบิน รถยนต์ กีฬา อิเล็กทรอนิกส์ และทางการแพทย์ได้ใช้วัสดุผสมเนื้อพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย แม้แต่วัสดุผสมเนื้อพอลิเมอร์ผสมอนุภาคหรือแร่ก็ยังถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมด้วยเพราะต้องการลดต้นทุนผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างวัสดุผสมเนื้อพอลิเมอร์แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 อย่างไรก็ตามนอกจากตัวอย่างที่แสดงถึงการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายของวัสดุผสม ซึ่งในปัจจุบันเองหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันประเทศหรือทางการทหาร ได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับวัสดุที่สามารถรับแรงกระแทกจากหัวกระสุนปืนที่ทำมาจากวัสดุผสมด้วยเช่นกัน

การพัฒนาวัสดุผสมได้ทำอย่างต่อเนื่องทั้งในเรื่องเทคโนโลยีการผลิต การเลือกใช้วัสดุ เริ่มตั้งแต่ระดับห้องทดลองและวิจัยจนกระทั่งผลิตขึ้นมาใช้ ถึงกระนั้นก็ตามวัสดุผสมก็ยังเป็นเรื่องที่ใหม่และไม่สมบูรณ์ ดังนั้น กรรมวิธีการผลิต คุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ ควรต้องมีการตรวจสอบ ปรับปรุง อีกต่อไป ในปี 1960 สหราชอาณาจักรมีเส้นใยที่ได้รับการพัฒนาสูงสุดคือเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) ขณะที่สหรัฐได้พัฒนาเส้นใยโบรอน (Boron fiber) เส้นใยทั้งสองชนิดที่กล่าวมามีค่าเชิงมอดุลัสยืดหยุ่นต่อน้ำหนักสูงจึงเพิ่มความแกร่งของวัสดุผสมและสูงกว่าวัสดุผสมที่มีใยแก้วเป็นองค์ประกอบ และมีน้ำหนักเบา

ตารางที่ 2.4 วัสดุผสมเนื้อพอลิเมอร์ที่ใช้งานในปัจจุบัน [21]

ภาคอุตสาหกรรม	ตัวอย่าง
อากาศยาน (เครื่องบิน)	Wings, Fuselage, Gears, Antennae, Tail-planes, Blades
อวกาศยาน	Seat, Floor, Interior panel, Fuel tank, Rocket motor
รถยนต์	Body panel, Cabs, Spoilers, Consoles, Instrument panel
เรือ	Hulls, Decks, Drive shafts, Gear, Bearing
อุปกรณ์เคมี	Pipe Tanks, Pressure vessels, Hoppers, Valves, Pump
ของใช้ในบ้าน	Interior and exterior panels, Chairs, tables, Baths
อุปกรณ์ไฟฟ้า	Panels, Housings, Switch gear, insulators
อุปกรณ์กีฬา	Caravans, Trailers, Golf clubs, helmet, surfboards, fishing rod

#### 2.4.1 นิยามและประเภทของวัสดุผสม

คำนิยามของวัสดุผสม โดยมีหลักเกณฑ์ดังนี้<sup>5</sup> วัสดุผสมคือวัสดุที่เกิดจากการผสมของสาร 2 ชนิดหรือ 2 เฟส เข้าด้วยกัน โดยสารทั้ง 2 ชนิดหรือเฟสนี้จะต้องมีปริมาณอยู่มากเพียงพอในวัสดุผสมนั้น (>5%) นอกจากนั้นสารหรือเฟสต้องมีคุณสมบัติดั้งเดิมต่างกันเมื่อผสมกันแล้ว คุณสมบัติของวัสดุผสมจะแตกต่างจากสารเริ่มแรกอย่างเห็นได้ชัด สุดท้ายคือวัสดุผสมจะต้องเกิดจากฝีมือมนุษย์ (Man-made) โดยพิจารณาว่ามีการผสม (Mixing) และรวมกัน (Combining) ยกเว้นวัสดุบางชนิดที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเช่น ไม้ กระดุก เป็นต้น [21]

#### 2.4.2 ประเภทวัสดุผสม

โดยทั่วไปวัสดุผสมจะแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ วัสดุผสมประเภทผงอนุภาค (Particulate or particle reinforced composite) ซึ่งเป็นการใส่ผงเข้าไปในเนื้อพื้นที่ และอีกประเภทคือ วัสดุผสมประเภทเส้นใย (Fiber reinforced composites) เป็นวัสดุที่สำคัญและเป็นที่ยอมรับใช้มากที่สุด

<sup>5</sup> Composite Material: Engineering and Science ของ F.L. Matthews และ R.D. Rawling

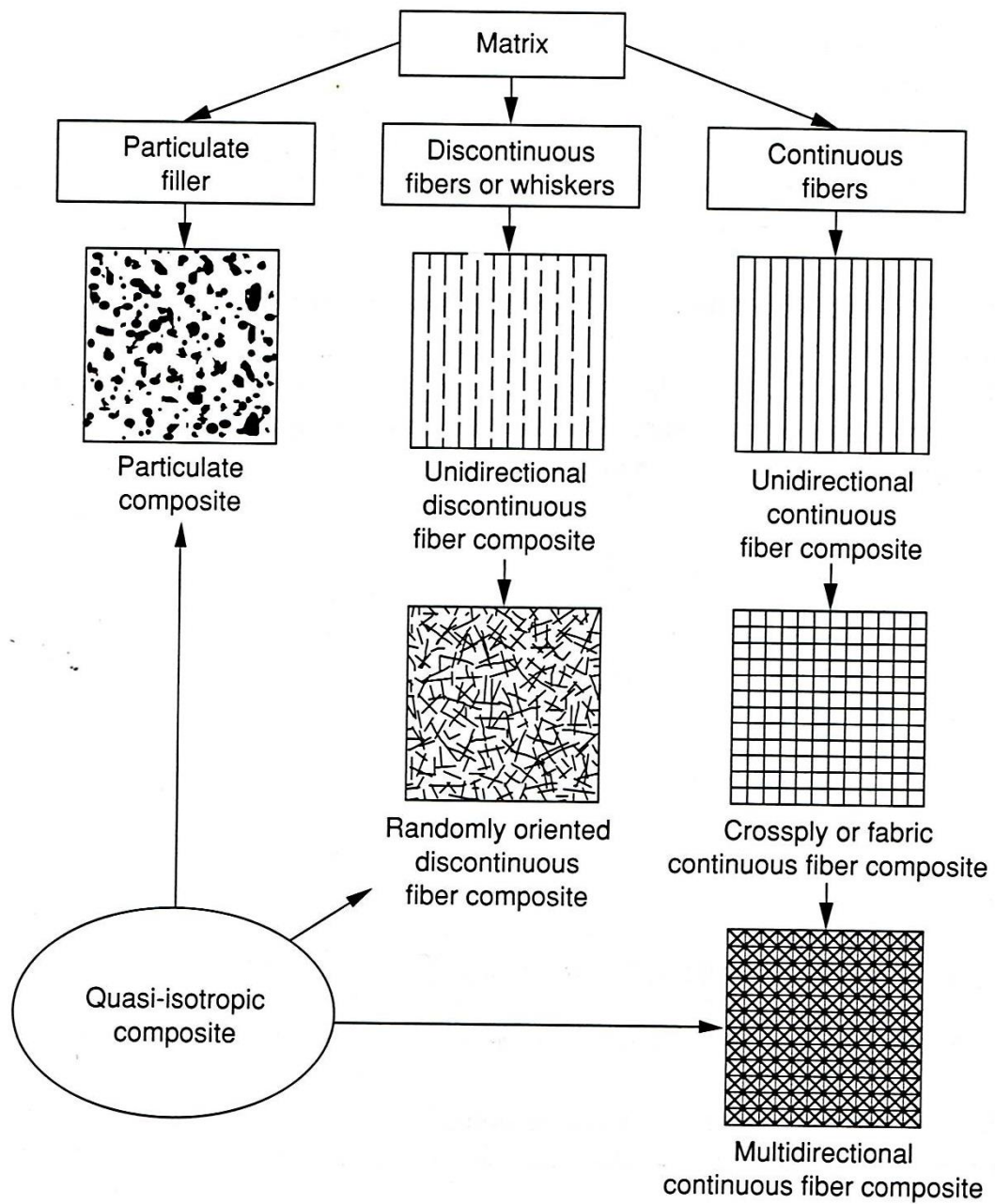
ปัจจุบัน โดยในวัสดุแบบผสมแบบเส้นใยสามารถจำแนกได้เป็นสองประเภทย่อยคือ แบบเส้นใยไม่ต่อเนื่องและแบบเส้นใยต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 2.32 และตารางที่ 2.5 ประเภทของวัสดุผสมแบบเส้นใย ในบางครั้งการแยกประเภททำได้ยากเพราะตัวเสริมแรงที่นำมาใส่ลงในเนื้อพื้นอาจจะมีลักษณะรูปทรงคล้ายกัน ดังนั้นการพิจารณาอาจจำเป็นต้องใช้การแบ่งประเภทวัสดุผสมจากชนิดของตัวเสริมแรง การศึกษาวิจัยนี้จะเน้นไปที่วัสดุแบบเส้นใยโดยมีรายละเอียดของวัสดุผสมดังนี้

- (ก) รูปร่าง (Shape)
- (ข) อัตราส่วนรูปทรง (Aspect ratio)
- (ค) การเรียงตัวของตัวเสริมแรง (Orientation of reinforcement)
- (ง) ชั้นเดียวหรือหลายชั้น (Single or multilayers)
- (จ) เป็นการสาน

ตารางที่ 2.5 ประเภทของวัสดุผสมแบบเส้นใย [18]

Matrix Type	Fiber	Matrix
Polymer	E-Glass	Epoxy
	S-Glass	Phenolic
	Carbon (Graphite)	Bismaleimide
	Aramid (Kevlar)	Polyester
	Boron	Thermoplastics
Metal	Boron	Aluminum
	Borsic	Magnesium
	Carbon(Graphite)	Titanium
	Silicon carbide	copper
	Alumina	
Ceramic	Silicon carbide	Silicon carbide
	Alumina	Alumina
	Silicon nitride	Glass-ceramic
		Silicon nitride
Carbon	Carbon	Carbon





รูปที่ 2.34 การแบ่งประเภทของวัสดุผสม [18]

#### 2.4.2.1 วัสดุผสมประเภทเส้นใย

วัสดุผสมแบบเส้นใย (Fiber reinforced composites) เป็นที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบันคือ วัสดุผสมที่มีเฟสเส้นใยกระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ จุดมุ่งหมายที่มีการนำวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยมาใช้งานเพราะต้องการคุณสมบัติด้านความแข็งแรง หรือความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงหรือที่เรียกว่า ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) และมอดุลัสจำเพาะ (Specific modulus) ค่าทั้งสองนี้สามารถหาได้จากการคำนวณอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อความถ่วงจำเพาะหรือมอดุลัสความยืดหยุ่นจำเพาะ โดยมีการพิจารณาในแต่ละประเภทดังนี้

##### (ก) รูปร่าง

การดูรูปร่างหรือรูปทรง (Shape) สามารถใช้แยกประเภทของตัวเสริมแรงได้อย่างชัดเจน เช่น วัสดุผสมที่มีตัวเสริมแรงลักษณะทรงกลม ก็สามารถบอกได้ว่าเป็นวัสดุเสริมแรงแบบอนุภาค ซึ่งในบางครั้งวัสดุไม่มีลักษณะกลมอาจจะมีรูปทรงสี่เหลี่ยมหรือหลายเหลี่ยม เป็นต้น

##### (ข) อัตราส่วนรูปทรง

อัตราส่วนรูปทรงคือ (Aspect ratio) อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อมิติในภาคตัดขวาง ถ้าเส้นใยมีภาคตัดขวางเป็นวงกลม จะมีมิติภาคตัดขวางของเส้นใย คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง อัตราส่วนของรูปทรงที่นำมาใช้พิจารณาแบ่งประเภทเส้นใยว่าเป็นเส้นใยต่อเนื่อง (Continues fiber) หรือเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (Discontinues fiber) วัสดุผสมชนิดชั้นเดียวที่เสริมแรงด้วยเส้นใยต่อเนื่อง จะถูกเรียกว่า วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยยาว (Long fiber reinforced composite) และในทำนองเดียวกัน วัสดุผสมชนิดชั้นเดียวที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไม่ต่อเนื่อง เรียกว่า วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น (Short fiber reinforced composite)

##### (ค) การเรียงตัวของตัวเสริมแรง

การเรียงตัวของตัวเสริมแรง (Orientation of reinforcement) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางกลด้วยดังนั้นการแยกประเภทของวัสดุผสมจึงดูจากการเรียงตัวของตัวเสริมแรง โดยทั่วไปวัสดุผสมมีตัวเสริมแรงเส้นใยสั้นอาจจะเรียงตัวแบบสุ่ม (Random) หรือ แบบมีทิศทางแน่นอน (Preferred orientation) ในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงลำดับชั้น (Stacking sequence) ซึ่งจะประกอบด้วยแผ่นชั้น (Ply) หลายๆ แผ่นเรียงกันเป็นลำดับ โดยแต่ละแผ่นจะเรียกว่า Layup ดังรูปที่ 2.33

Unidirectional six-ply:	$[0/0/0/0/0/0] = [0]_6$
Crossply symmetric:	$[0/90/90/0] = [0/90]_s$ $[0/90/0/90/90/0/90/0] = [0/90]_{2s}$ $[0/90/0] = [0/\overline{90}]_s$
Angle-ply symmetric:	$[+45/-45/-45/+45] = [\pm 45]_s$ $[30/-30/30/-30/-30/30-30/30] = [\pm 30]_{2s}$
Angle-ply asymmetric:	$[30/-30/30/-30/30/-30/30/-30] = [\pm 30]_4$
Multidirectional:	$[0/45/-45/-45/45/0] = [0/\pm 45]_s$ $[0/0/45/-45/0/0/0/0/-45/45/0/0] = [0/\pm 45/0]_s$ $[0/15/-15/15/-15/0] = [0/\pm 15/\pm 15/0]_T = [0/(\pm 15)_2/0]_T$
Hybrid:	$[0^K/0^K/45^C/-45^C/90^G/-45^C/45^C/0^K/0^K]_T = [0^K/\pm 45^C/\overline{90^G}]_s$

where subscripts and symbols signify the following:

number subscript = multiple of plies or group of plies

$s$  = symmetric sequence

$T$  = total number of plies

$\overline{\quad}$  (overbar) = laminate is symmetric about the midplane of the ply

In the case of the hybrid laminate, superscripts K, C, and G denote Kevlar (aramid), carbon (graphite), and glass fibers, respectively.

### รูปที่ 2.35 การเรียงตัวของวัสดุผสมในแต่ละประเภท [18]

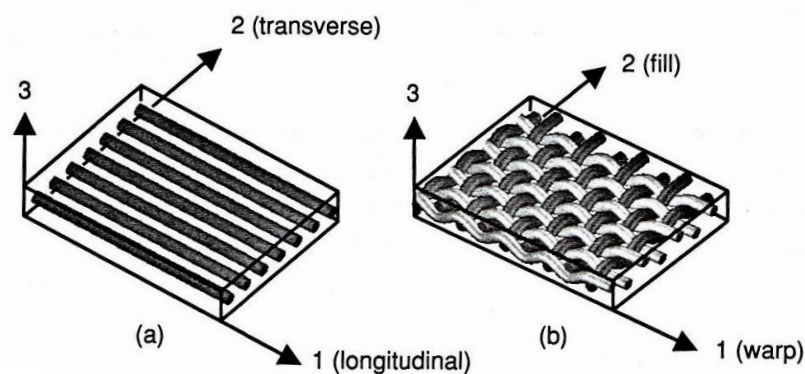
(ง) ชั้นเดียวหรือหลายชั้น

วัสดุผสมชั้นเดียวหรือหลายชั้น (Single or multilayers) โดยปกติวัสดุผสมที่ใช้ในทางวิศวกรรมจะเป็นวัสดุผสมประเภทหลายชั้น (Multilayered composite) เพราะการผลิตเส้นใยหรืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีสมบัติทางกลดีเท่ากับเส้นใยหรืออนุภาคขนาดเล็กทำได้ยาก ผนวกกับค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง ทำให้ผลิตภัณฑ์เสริมแรงถูกผลิตขึ้นในขนาดเล็ก วัสดุผสมแต่ละแผ่นจึงมีความหนาแน่นต่ำหรือบาง เมื่อนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรมจึงต้องเพิ่มความหนาของผลิตภัณฑ์โดยการนำแผ่นวัสดุมาซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ (Stacking layers) โดยปกติจะมีความหนาตั้งแต่ 4-40 ชั้น และสามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มย่อยคือ กลุ่มลามิเนต (laminates) และกลุ่มไฮบริด (Hybrids)<sup>6</sup>

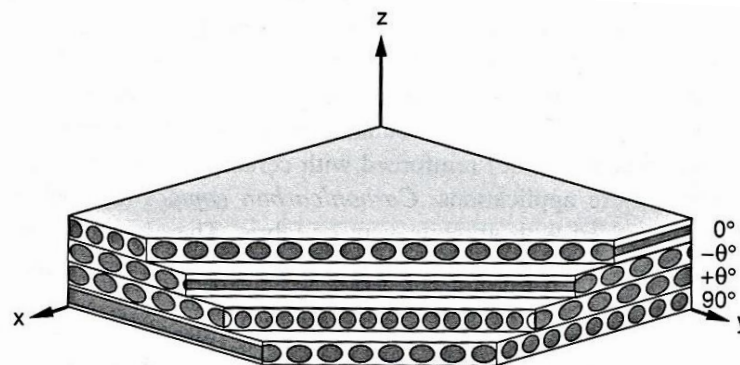
<sup>6</sup> เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, วัสดุผสม 1, เอกสารประกอบการสอน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หน้า 15

## (ง.1) ลามิเนต

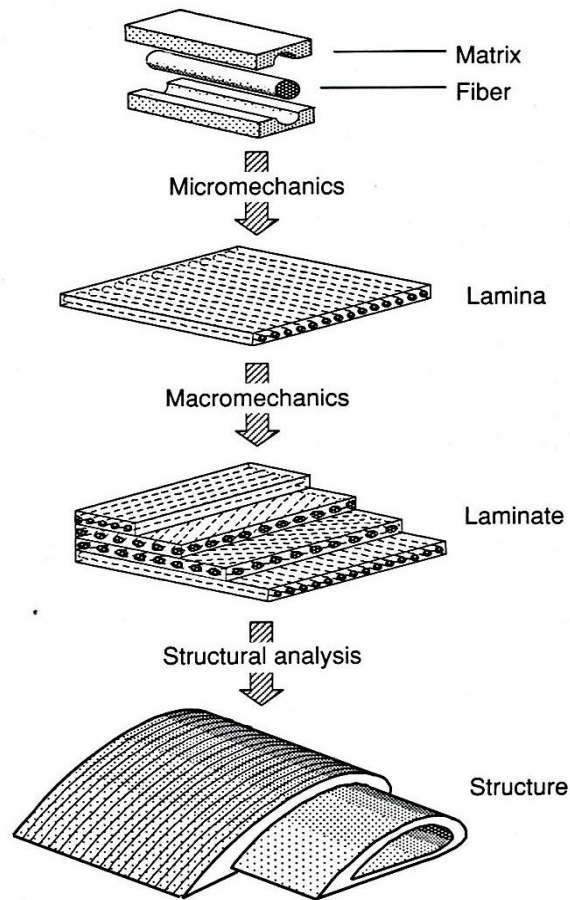
ลามิเนตคือ แผ่นที่ถูกนำมาประกอบเป็นชั้นๆ โดยแต่ละชั้นจะเรียกว่าแผ่น (Ply) หรือ ลามิเน (Lamina) และการเรียงตัวของเส้นใยแต่ละชั้นจะเป็นการเรียงเส้นใยแบบเส้นใยทางเดียว (Unidirectional orientation) แสดงดังรูปที่ 2.34 การเรียงแผ่นลามิเนตลงในวัสดุผสมอาจจัดให้มีการเรียงตัวของเส้นใยลามิเนต เปลี่ยนจากชั้นหนึ่งไปยังอีกชั้นหนึ่งได้ ไม่จำเป็นต้องมีทิศทางการเรียงเส้นใยในแต่ละชั้นไปในแนวทางเดียวกันตลอด ตัวอย่างเช่น วัสดุผสมแบบ 0/90° คือการเรียงเส้นใยทางเดียวของชั้นบนสุดจะกำหนดให้เป็นทิศทาง 0° และชั้นที่สองจะนำมาวางในทิศทาง 90° กับชั้นบนสุด และจะเรียงสลับกันไปอย่างนี้ตลอดทั้งความหนาของวัสดุผสม วัสดุผสมชนิดนี้จะถูกเรียกว่า วัสดุผสมครอสพาย (Cross ply composite) ดังรูปที่ 2.35 แสดงการเรียงตัวแบบลามิเนตและการระบุพิกัดอ้างอิง (Reference coordinate system) และเมื่อนำวัสดุผสมหลายชนิดมาเรียงเป็นโครงสร้างจะมีชื่อเรียกที่ต่างกันดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 การเรียงชั้นและการแสดงพิกัดอ้างอิง a) การเสริมแรงแบบเส้นทางเดียว และ b) การเสริมแรงแบบประสานของเส้นใย (Woven fabric reinforcement) [18]



รูปที่ 2.37 การเสริมแรงแบบหลายทิศทางของลามิเนต (Multidirectional laminate) และการระบุพิกัดอ้างอิง [18]



รูปที่ 2.38 การเรียงลำดับการวิเคราะห์ของวัสดุผสมตั้งแต่วัสดุผสมแยกชนิดจนเป็นโครงสร้างแบบผสม (Composite structure) [18]

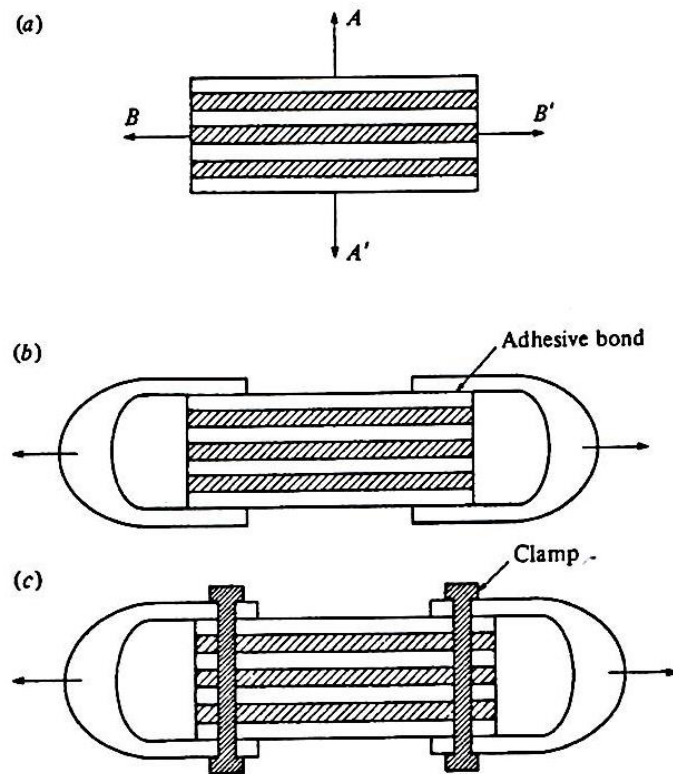
## (ง.2) ไฮบริดหรือแบบผสม

แบบไฮบริดหรือที่เรียกว่าแบบผสม คือวัสดุที่ประกอบขึ้นจากชั้นหลายชั้นที่แต่ละชั้นอาจจะเป็นเส้นใยชนิดสั้นหรือยาวก็ได้หรือมีบางชั้นเป็นตัวเสริมแรงชนิดอนุภาคหรือชนิดผสมเส้นใยกับอนุภาคก็ได้ วัสดุผสมแบบไฮบริดนี้อาจจะจัดว่าเป็นวัสดุผสมแบบลูกผสม วัตถุประสงค์ที่ผลิตขึ้นก็เพื่อต้องการประโยชน์จากตัวเสริมแรงที่ผสมกันหลายแบบนี้ ตัวอย่างเช่น เส้นใยแก้วผสมกับกับเส้นใยคาร์บอนใส่เข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ เส้นใยแก้วจะช่วยลดต้นทุนให้กับวัสดุผสมเพราะเส้นใยแก้วมีราคาถูกขณะที่เส้นใยคาร์บอนราคาแพงแต่มีความแข็งแรงสูงส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของวัสดุผสมสูง

### 2.4.3 รอยต่อระหว่างเนื้อพื้ัน-ตัวเสริมแรง

การเกิดพันธะที่เหมาะสมระหว่างตัวเสริมแรงกับเนื้อพื้ัน (Reinforcement-matrix interface) เป็นสิ่งที่สำคัญมากเพราะว่าแรงกระทำที่เกิดขึ้นที่เนื้อพื้ันจะต้องถูกส่งผ่านไปยังตัว

เสริมแรงโดยอาศัยเส้นทางรอยต่อระหว่างกัน ดังนั้นถ้าตัวเสริมแรงมีพันธะการยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงมากกับเนื้อพื้น ก็จะทำให้มีความแข็งแรงที่สูงและมอดูลัสของเส้นใยสามารถเสริมคุณสมบัติวัสดุผสมได้เต็มที่ ถ้ารอยต่อไม่แข็งแรง จะส่งผลให้ความแข็งแรงต่ำและมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำ แต่จะมีความต้านทานการแตกหักสูง ขณะที่ถ้ารอยต่อแข็งแรงก็มีผลให้ค่าความแข็งแรงและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นสูง แต่ความต้านทานการแตกหักต่ำหรือชิ้นงานมีพฤติกรรมการแตกแบบเปราะ ไม่ว่าตัวเสริมแรงเป็นเส้นใยยาวหรือเส้นใยสั้นหรือผงอนุภาค รอยต่อก็ยังคงความสำคัญสูงแม้ว่าบทบาทรอยต่อจะให้สมบัติที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไปตามชนิดของตัวเสริมแรงก็ตาม ถ้ามีช่องว่างหรือช่องอากาศมากไป ก็จะได้รอยต่อที่ไม่แข็งแรง หรือมีการปนเปื้อนเกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.37 เพื่อเปรียบเทียบรอยต่อที่มีความแข็งแรงของแต่ละชั้นผิวสัมผัส จากรูปนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของรอยต่อได้อย่างชัดเจน ในกรณีที่ต้องการความแข็งแรงและมอดูลัสของวัสดุผสมสูงนอกเหนือจากการเลือกเส้นใยมาใช้งานแล้ว ยังต้องคำนึงถึงตัวเสริมแรงเหล่านี้ โดยต้องมีการยึดเหนี่ยวกับเนื้อพื้นอย่างพอดี เพื่อประสิทธิภาพการใช้งานและความแข็งแรงสูงสุด จากรูปที่ 2.37 a) วัสดุผสมประกอบขึ้นจากแผ่นวัสดุต่างกันสองชนิด จึงมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นต่างกันซึ่งในกรณีนี้จะไม่มีการยึดเหนี่ยวกัน พันธะทางกายภาพหรือแม้แต่พันธะระหว่างแผ่นวัสดุ วัสดุผสมก็จะไม่มีความต้านทานการดึงในทิศทาง AA' ที่ตั้งฉากกับระนาบแผ่น ส่วนทิศทาง BB' ที่ขนานกับระนาบแผ่นค่าความแข็งแรงหรือมอดูลัสยืดหยุ่นก็จะขึ้นกับการยึดจับชั้นในแต่ละชั้นของวัสดุผสม ในส่วนของรูปที่ 2.37 b) ในรูปนี้จะสอดคล้องกับรูป 2.37 a) คือไม่มีพันธะระหว่างชั้นแต่มีตัวจับชิ้นงาน ยึดจับวัสดุผสม ไว้ที่ชั้นนอกสุดดังนั้นความแข็งแรงในทิศทาง BB' จะมีค่าสูงแต่ก็มีค่าไม่เกินความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างตัวจับกับชั้นนอกสุดได้ และรูปที่ 2.37 c) แสดงถึงชั้นแต่ละชั้นในวัสดุผสมจะถูกยึดไว้ด้วยตัวสกรู ดังนั้นในทุกชั้นของชิ้นงานวัสดุผสมสามารถรับภาระแรงกระทำได้พร้อมกันและวัสดุผสมชั้นนี้จะมีค่าความแข็งแรงสูงสุด โดยสรุปคือจำเป็นต้องลดช่องว่างระหว่างพื้นผิวเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุผสมให้มากที่สุด



รูปที่ 2.39 แสดงการยึดจับชิ้นงานเพื่อเพิ่มความแข็งแรงระหว่างชั้นพื้นผิว [21]

#### 2.4.4 คุณสมบัติพื้นฐานของลามิเนต

การพิจารณาคุณสมบัติของโครงสร้างการเรียงตัวของวัสดุผสม ทั้งแบบการเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและการเรียงตัวแบบประสานของเส้นใย ซึ่งจะพิจารณาในแต่ละชั้นพายโดยมี รูปแบบคุณสมบัติ (Characterized) ดังนี้

- |                                |   |   |
|--------------------------------|---|---|
| $E_1, E_2, E_3$                | = | ค่ามอดูลัสของยังค์ตามแนวแกน   |
| $G_{12}, G_{23}, G_{13}$       | = | ค่ามอดูลัสเฉือน ในพิกัดระนาบ 1-2, 2-3 และ 1-3 ตามลำดับ                              |
| $\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$ | = | อัตราส่วนของปัวซอง โดยตัวห้อยแรกระบุทิศทางของแรง และ ตัวห้อยสองแสดงทิศทางของ Strain |
| $F_{1t}, F_{2t}, F_{3t}$       | = | Tensile strengths ตามแนวแกนของพาย   |
| $F_{1c}, F_{2c}, F_{3c}$       | = | Compressive strengths ตามแนวแกนของพาย   |
| $F_{12}, F_{23}, F_{13}$       | = | Shear Strengths ของระนาบ 1-2, 2-3 และ 1-3 ตามลำดับ                                  |

อัตราส่วนปริมาตรของเส้นใย

$$V_f = \frac{\text{volume of fiber}}{\text{volume of composite}} \quad (2.12)$$

อัตราส่วนน้ำหนักของเส้นใย

$$W_f = \frac{\text{weight of fibers}}{\text{weight of composite}} \quad (2.13)$$

อัตราส่วนปริมาตรของเมทริกซ์

$$V_m = \frac{\text{volume of matrix}}{\text{volume of composite}} \quad (2.14)$$

Void volume ratio

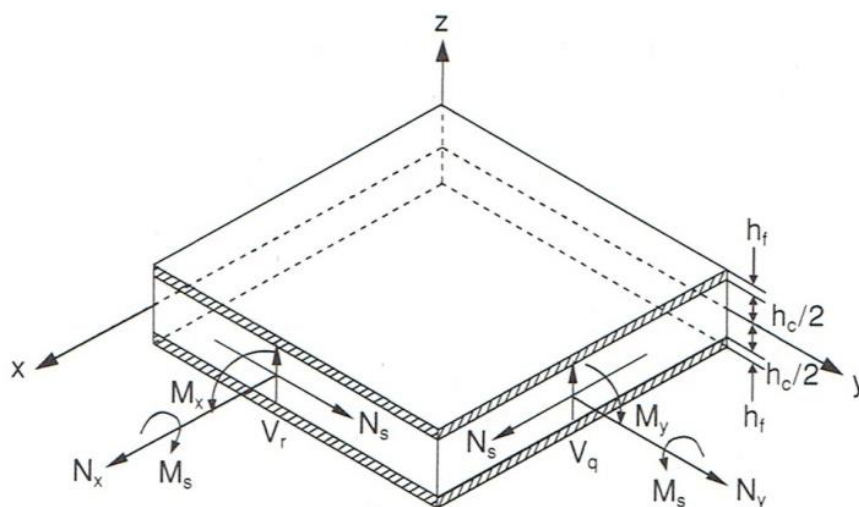
$$V_v = 1 - V_f - V_m = \frac{\text{volume of voids}}{\text{volume of composite}} \quad (2.15)$$

#### 2.4.5 แผ่นประกบแบบแซนวิช

โครงสร้างของแผ่นประกบแบบแซนวิช (Sandwich plates) มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย หลากหลายรูปแบบและชนิดของวัสดุ เพราะว่ามีจุดเด่นในเรื่องของน้ำหนักเบา และมีความแข็งแรงสูง แผ่นประกบแบบแซนวิชเป็นโครงสร้างแบบชนิดพิเศษของลามิเนต ซึ่งประกอบด้วย แผ่นประกบด้านหน้าที่มีลักษณะบางและน้ำหนักเบาสองด้านทั้งด้านหน้าและด้านหลัง (Face sheets) และจะมีวัสดุความแข็งแรงต่ำอยู่ภายใน (Low-stiffness core) โดยวัสดุที่เหมาะสมจะนำมาเป็น Facing ได้แก่ โลหะ และวัสดุผสมแบบลามิเนต ในส่วนของวัสดุแกนกลางทำมาจาก Metallic หรือ Non-metallic honeycombs, โฟม (Cellular foams), ไม้ (Wood) เป็นต้น โดยคุณสมบัติของวัสดุที่นิยมนำมาทำแกนกลางต่างๆ สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากตาราง ข.1 ในภาคผนวก ข.

แผ่นประกบหน้ามีหน้าที่รับแรงดัด (Bending) และ in-plane load เกือบทั้งหมด โดยแกนกลางจะช่วยรักษาเสถียรภาพของแผ่นประกบไว้ ลักษณะรูปร่างของโครงสร้าง (ความหนาแกนกลาง, อัตราส่วน) สามารถถูกวิเคราะห์โดยใช้หลักการเหมือนกับ ทฤษฎีของแผ่นลามิเนต ดังรูปที่ 2.38 แสดงภาคตัดของแผ่นโครงสร้างประกบแบบแซนวิช ภายใต้แรงกระทำและแรงดัด (Moment) ซึ่งในรูปที่ 2.38 จะสามารถวิเคราะห์ในรูปแบบแผ่นลามิเนตสามชั้นได้ [22] ประกอบด้วยแกนกลางหนึ่งชั้นและแผ่นประกบหน้าหลังสองชั้น





รูปที่ 2.40 แสดงภาพตัดของโครงสร้างประกบแบบแซนวิชภายใต้แรงกระทำใดๆ [18]

## 2.5 ยางพารา

ยางธรรมชาติหรือยางพารา (Natural Rubber) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย สายพันธุ์ ยางธรรมชาติ ที่พบมากในประเทศไทยคือ *Hevea brasiliensis* ซึ่งจะผลิตน้ำยางธรรมชาติที่เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเองตามชาติซึ่งมีแค่สองสายพันธุ์ที่ผลิตน้ำยางจนเป็นที่น่าสนใจ ในทางการค้าอีกสายพันธุ์ชื่อว่า *Perthenium argentatum* (Guayule) ยางธรรมชาติจัดเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญสำหรับการส่งออกของประเทศไทย โดยยางพาราจะแบ่งออกเป็นสองลักษณะคือ ยางพาราดิบที่ยังไม่ผ่านการบวนการปรุงแต่งและยางพาราที่นำไปพัฒนาตัดแปลงโครงสร้างเพื่อให้ได้ลวดข้อต่อของยางพาราธรรมชาติได้

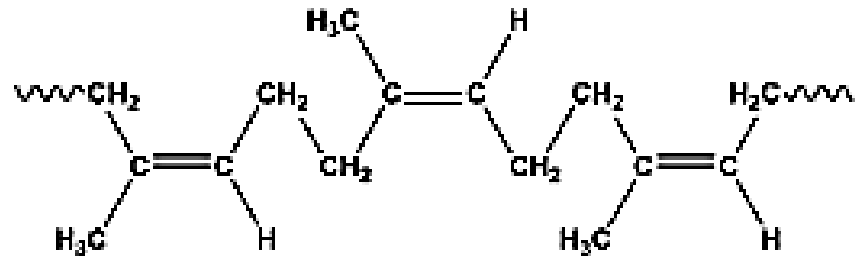
### 2.5.1. ยางพาราธรรมชาติดิบ

น้ำยางสดที่กรีตได้จากต้นยางมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นหรือเรียกว่าลาเท็กซ์ (Latex) และมีเนื้อยางแห้ง (Dry rubber) ประมาณ 33% แขนวลอยอยู่ในน้ำ 60% ถ้านำน้ำยางที่ได้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifugal) จนกระไดน้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60% จะเรียกว่าน้ำยางข้น (Concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพน้ำยางข้นให้เก็บรักษาไว้ได้นาน โดยมีสารจำพวกโปรตีน 1-1.5% สารจำพวกเรซิน 1-1.5% ซีลี้น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1% น้ำตาล 1% และมีสารประกอบอื่นๆ เช่น กรดอะมิโน ลิพิด ฟอสโฟลิพิดและเกลือของกรดไขมัน อยู่ 0.50-1.60% [23] อนุภาคยางพารามีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1-1.0  $\mu\text{m}$  โดยมีโปรตีนล้อมรอบอยู่ที่บริเวณของอนุภาค ค่าน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight,  $M_w$ ) มวลโมเลกุลเฉลี่ยอยู่

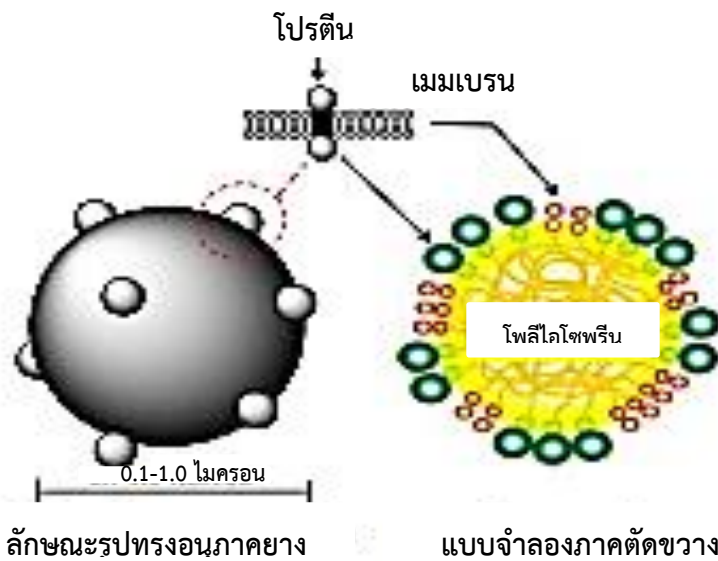
ในช่วง  $10^4$  ถึง  $10^6$  Daltons โดยที่  $M_n$  มีค่าประมาณ 105 Daltons ในขณะที่  $M_w$  มีค่าที่สูงกว่า  $M_n$  คือประมาณ 106 Daltons และค่า MWD มีความแปรปรวนค่อนข้างสูงอยู่ระหว่าง 2-11 ซึ่งบ่งบอกถึงความแตกต่างของโมเลกุลของยางธรรมชาติ [23] ซึ่งรายละเอียดโครงสร้างโมเลกุลของยางพาราแสดงดังรูปที่ 2.39 โครงสร้างเคมีซิส-1, 4-พอลิไอโซพรีน

ยางพาราหรือยางธรรมชาติซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่โดดเด่นแตกต่างจากยางสังเคราะห์ ที่ผลิตได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น สมบัติความยืดหยุ่น ความทนทานต่อการฉีกขาด แต่อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติยังมีสมบัติบางประการดีกว่ายางสังเคราะห์ เช่น การเชื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดดและความร้อนหรือการบวมตัวเมื่อสัมผัสกับตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นต้น การส่งออกยางธรรมชาติส่วนมากจะอยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ผ่านการแปรรูป เช่น น้ำยางข้น ยางแผ่นรมควันหรือ ยางแท่ง<sup>7</sup> [23] เพื่อนำ ไปใช้เป็นวัตถุดิบในหลายอุตสาหกรรม เช่น การผลิตยางล้อรถยนต์ หรือชิ้นส่วนรถยนต์ ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ปะเก็นยาง อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ รองเท้าถุงมือยาง เป็นต้น ผลผลิตส่วนใหญ่ ถูกจำหน่ายในรูปแบบสินค้าปฐมภูมิที่มีมูลค่าต่ำ [24] อนุภาคยางธรรมชาติมีลักษณะรูปทรงค่อนข้างกลมโดยมีโปรตีนล้อมรอบอยู่บริเวณผิวของอนุภาค [25] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.40 แบบจำลองอนุภาคยางธรรมชาติ ซึ่งทำให้ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติเชิงกลที่โดดเด่นกว่ายางสังเคราะห์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเชื่อมโยงตามธรรมชาติของหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่โมเลกุล โดยมีสมบัติเด่น ได้แก่ ความทนต่อแรงดึงสูง ทนต่อการฉีกขาดมีความยืดหยุ่นในที่อุณหภูมิต่ำและสมบัติความต้านทานต่อการขูดถู ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่ายางพาราเชื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดดอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่ประกอบด้วยพันธะคู่ของคาร์บอน (C=C) เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะแปรสภาพจากความสามารถในการยืดหยุ่นกลายเป็นยางที่แข็งเปราะและไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป จึงมีงานวิจัยหลากหลายที่พัฒนา ดัดแปลง ปรับปรุงข้อดีของยางธรรมชาติหรือปรับปรุงให้ยางธรรมชาติมีประสิทธิภาพเทียบเคียงกับยางสังเคราะห์จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก สามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การผสมยางธรรมชาติกับยางเคราะหฺ์ชนิดอื่นๆ การเติมหมู่คลอรีน (Chlorination) การเติมไฮโดรเจนให้กับพันธะคู่ (Hydrogenation) การเกิดโครงสร้างวงแหวน (ไซโคลเซชัน) การเติมหมู่ออกซิเจน (Epoxidation) เป็นต้น ทั้งนี้การปรับปรุงด้วยวิธีต่างๆตามที่ได้กล่าวมา ทำให้คุณสมบัติของยางธรรมชาติที่ได้รับการดัดแปลงจะมีคุณสมบัติของยางแตกต่างกันออกไป ไม่ว่าจะเป็นระยะเวลาในการเก็บรักษาได้ยาวนานยิ่งขึ้นโดยไม่เสียลักษณะเด่นของยางไป หรือ ความยืดหยุ่น เป็นต้น

<sup>7</sup> สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2555



รูปที่ 2.41 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (*cis*-1,4-polyisoprene) [25]



รูปที่ 2.42 แบบจำลองอนภาคยางธรรมชาติ [25]

## 2.5.2 ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการตัดแปลงคุณสมบัติ

คุณสมบัติโดยทั่วไปของยางธรรมชาติจะมีความยืดหยุ่นได้ดี แต่เมื่อได้รับความร้อนจากภายนอกจะทำให้ยางมีความอ่อนตัว ถ้าได้รับความร้อนสูงเกินไปก็จะมีลักษณะเหนียวและเสื่อมสภาพ แต่เมื่อเผชิญกับอุณหภูมิต่ำลงจะแข็งและเปราะแตกหักได้ง่าย รวมทั้งไม่คงทนต่อสารเคมีหรือตัวดําละลายอินทรีย์ต่างๆ การปรับปรุงหรือพัฒนาคุณสมบัติยางธรรมชาติจึงเป็นที่นิยมในการศึกษาวิจัย และมีคุณสมบัติต่างๆ แตกต่างกันไปโดยมีวิธีและขั้นตอนการดัดแปลงดังนี้

### 2.5.2.1 การเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์

การเชื่อมระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เป็นการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติโดยอาศัยหลักการเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดการเชื่อมระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายแบบร่างแห (Cross-linked network) การเชื่อมระหว่างสายโซ่ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้โครงสร้างของยางธรรมชาติมีความแข็งแรงมากขึ้น ยางที่ผ่านการเชื่อมขวางเรียกว่ายางคงรูป ระบบที่นิยมใช้ในการเชื่อมคือระบบวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ยางคงรูปที่ได้ส่วนมากมีสมบัติเชิงกลและพลวัตดีขึ้น เช่นค่า

มอดูลัส ระยะเวลายืด ผน จุดขาด ความต้านทานแรงดึง แรงกด หรือแรงกระแทก รวมทั้งทนต่อสภาพอากาศได้สูงขึ้น ตัวอย่างที่มีการเชื่อม เช่น ยางอีโบนิต (Ebonite) หรือยางแข็ง (Hard rubber) ที่ถูกคิดค้นขึ้นจากบริษัท Goodyear เป็นต้น

#### 2.5.2.2 การผสมยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

ในการผสมยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้เหมาะสมต่อลักษณะการนำไปใช้งานสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีหลักๆ คือ การผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์และการผสมยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติก

##### 2.5.2.2.1 การผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์

การผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์เป็นการนำพอลิเมอร์มากกว่าสองชนิดมาผสมกัน เพื่อให้ได้ยางผสมที่มีคุณสมบัติที่ดีเหมาะสมกับการใช้งาน ยางสังเคราะห์ที่นิยมนำมาผสม เช่น ยางสไตรีน (SBR) ยางไนไตรล์ (NBR) ยางบิวตะไดอิน (BR) และยางอีพิตีเอ็ม (EPDM) เป็นต้น ตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้งานของยางผสมได้แก่ ยางธรรมชาติผสมยาง SBR ซึ่งพบมากในอุตสาหกรรมการผลิตล้อรถยนต์ ยางอะไหล่หรือสายพาน สมบัติโดดเด่นของยางผสมชนิดนี้ คือ มีความร้อนต่ำ มีความเหนียวติดที่ดี ความต้านทานต่อการขีดสีและการทนต่อสภาพอากาศที่สูง เหมาะกับการใช้งานเป็นวัสดุรับแรงกด

##### 2.5.2.2.2 การผสมยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติก

เทอร์โมพลาสติกมีสมบัติพิเศษคือสามารถนำมาหลอมแล้วขึ้นรูปกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นการผสมยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกจะได้วัสดุที่มีสมบัติระหว่างยางและเทอร์โมพลาสติก กล่าวคือมีความยืดหยุ่นเหมือนยางและความแข็งแรงที่อุณหภูมิปกติแต่จะอ่อนตัวและหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน รวมทั้งสามารถนำมาหลอมซ้ำได้ วัสดุที่เรียกว่าเทอร์โมพลาสติก-อีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer หรือ TPE) ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกที่นำมาผสม เช่น พอลิโพรพิลีน (PP) พอลิเอไมด์ (PA6) พอลิยูรีเทน (PU) หรือ พอลิสไตรีน (PS) เป็นต้น ตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่น ยางธรรมชาติผสมกับพอลิเอไมด์ ยางคงรูปที่ได้จะมีสมบัติด้านการทำปฏิกิริยากับน้ำมันได้ดี และสามารถทนความร้อนสูงได้ถึง 200 องศาเซลเซียส ในกระบวนการผลิตทั้งสองกรณีอาจมีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) เพื่อให้พอลิเมอร์ทั้งหมดผสมได้ดี หรือในบางกรณีอาจมีการเติมสารเสริมแรง (Reinforcing agent) เพื่อให้วัสดุที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างเช่น การเตรียมวัสดุผสม (Composite) ระหว่างยางธรรมชาติและซิลิกา (ของแข็งโครงสร้างผลึกของซิลิกอนไดออกไซด์:  $\text{SiO}_2$ ) สามารถปรับปรุงความต้านทานแรงดึง ระยะเวลายืด ผน จุดขาด การขีดสีและลดการบวมตัว

### 2.5.2.3 การทำให้เกิดโครงสร้างวงแหวน

การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างยางธรรมชาติเกิดขึ้นโดยผ่านปฏิกิริยาไซโคลเซชัน (Cyclization) เป็นการเชื่อมกันภายในโมเลกุลของยางธรรมชาติ โดยยางธรรมชาติที่มีโครงสร้างวงแหวน สามารถเกิดขึ้นได้ในสถานะที่เป็นกรด มีตัวเร่งปฏิกิริยา หรือมีการให้ความร้อน โดยเกิดเป็นโครงสร้างวงแหวนเชื่อมต่อกันส่งผลให้ความไม่ยืดหยุ่นในโครงสร้างยางธรรมชาติลดลงและสมบัติความยืดหยุ่นลดลงในขณะที่สมบัติความเหนียวมีค่าเพิ่มมากขึ้น ยางธรรมชาติที่มีร้อยละการเกิดโครงสร้างวงแหวนสูงจะมีความแข็งแรงคล้ายพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิปกติโดยเมื่อได้รับความร้อนจะหลอมเหลวและนอกจากนี้ยังมีสมบัติการยึดเกาะที่ดี ช่วยเพิ่มแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่างชนิดกัน (Adhesion) ทำให้ประยุกต์ใช้เป็นสารยึดติด (Adhesive)

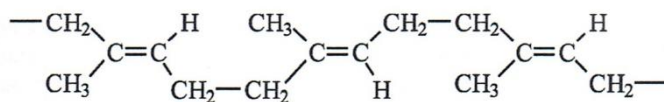
### 2.5.2.4 การเกิดโครงสร้างไอโซเมอร์

ไอโซเมอร์ไรเซชันเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีนเป็นทรานส์-1,4-พอลิไอโซพรีนดังรูปที่ 2.41 สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีปัจจัยภายนอกมากระตุ้นเช่น ความร้อน แสง หรือตัวเร่งปฏิกิริยา การปรับโครงสร้างทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างผลึกของยางธรรมชาติจากซิส-1,4-พอลิไอโซพรีนสามารถยืดหยุ่นได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ เปลี่ยนเป็น ทรานส์-1,4-พอลิไอโซพรีน ซึ่งทำให้ยางมีลักษณะการยืดหยุ่นน้อยกว่าเดิมเนื่องจากสายโซ่ของยางธรรมชาติสามารถอยู่ใกล้กันมากขึ้น ทำให้การจัดเรียงตัวของสายโซ่มีความเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้ยางธรรมชาติที่มีโครงสร้างแบบ ทรานส์-1,4-พอลิไอโซพรีนมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะเหมาะสม เช่น แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{NO}_2$ ) หรือเป็นผลจากการฉายรังสียูวี รังสีแกมมา เป็นต้น

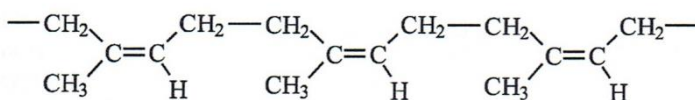
### 2.5.2.5 การเกิดปฏิกิริยาพันธะคู่ในยางธรรมชาติ

การทำปฏิกิริยาที่บริเวณพันธะคู่ ( $\text{C}=\text{C}$ ) ในยางธรรมชาติสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเติมหมู่คลอรีน หรือเติมไฮโดรเจนเข้าไปที่ตำแหน่งพันธะคู่หรือการเติมหมู่ออกซิเจนของออกซิเจน เป็นต้น เป็นการปรับปรุงพื้นผิวของยางด้วยกระบวนการคลอรีเนชัน (Chlorination) โดยใช้สารละลายผสมระหว่างโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ( $\text{NaOCl}$ ) และกรดไฮโดรคลอริก ( $\text{HCl}$ ) ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีหมู่คลอรีน ( $\text{Cl}$ ) ซึ่งเป็นหมู่ที่มีขั้วแทนที่บริเวณพันธะคาร์บอนไม่อิ่มตัวตั้งนั้นยางธรรมชาติที่ผ่านการคลอรีเนชันจะมีสมบัติการทนต่อแรงดึงสูงขึ้น ทนแรงอัดจากภายนอกและสามารถทนน้ำมันและตัวทำละลายไม่มีขั้วได้ดีรวมทั้งทนต่อแสงแดดได้ดี นอกจากนี้ การทำไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการพัฒนาเสถียรภาพทางความร้อนของยางธรรมชาติโดยการลดความไม่อิ่มตัวของพันธะ

คู่ทำให้ยางธรรมชาติที่ผ่านการทำไฮโดรจิเนชันมีสมบัติที่ทนต่อโอโซนและมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้นและใกล้เคียงกับยางสังเคราะห์พอลิเอธิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM)



*trans*-Polyisoprene (repeat units,  $n = 100$ ;  $M_w = 7000$ )



*cis*-Polyisoprene (repeat units,  $n = 1500$  to  $15,000$ ;  $M_w = 100,000$  to  $1,000,000$ )

รูปที่ 2.43 โครงสร้าง CIS และ โครงสร้าง Trans ของยางธรรมชาติ [26]

#### 2.5.2.6 การกราฟต์พอลิเมอร์บนสายโซ่ยางธรรมชาติ

กระบวนการกราฟต์โคพอลิเมอร์โรเซชัน (Graft copolymerization) เป็นกระบวนการตัดแปลงโครงสร้างภายในสายโซ่ยางธรรมชาติ โดยการนำยางธรรมชาติมาทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้เหมาะสมต่อการใช้งานในรูปแบบต่างๆ วัสดุที่ได้จะมีสมบัติร่วมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ ได้แก่ ปริมาณยางธรรมชาติ ตัวริเริ่ม มอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์ และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เป็นต้น ในการเลือกหมู่ฟังก์ชันที่นำมาผ่านกระบวนการต้องพิจารณาลักษณะของแต่ละฟังก์ชันที่สอดคล้องกับการนำไปประยุกต์ใช้ หมู่ฟังก์ชันที่นำมากราฟต์สามารถเป็นได้ทั้งหมู่ฟังก์ชันแบบไม่มีขั้ว (Hydrophobic) และหมู่ฟังก์ชันแบบมีขั้ว (Hydrophilic) ตัวอย่างการนำหมู่ฟังก์ชันแบบไม่มีขั้วมากราฟต์ยางธรรมชาติ เช่น สไตรีน โดยยางธรรมชาติที่ได้จะมีความเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์และมีสมบัติเชิงกลดี สำหรับกระบวนการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันแบบมีขั้ว ตัวอย่างเช่น อะคริเลต (Acrylate) สามารถเพิ่มความแข็งแรงใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ สารตัวเติมหรือสารยึดติดสำหรับการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

- อะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทนต่อน้ำมันและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทนน้ำมัน

- มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้
- แป้ง (Starch) สำหรับการเตรียมเป็นเยื่อเลือกผ่านในการควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย
- พอลิไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinyl-pyrrolidone) เพื่อใช้ในการเตรียมเป็นสารรักษาเสถียรภาพในการสังเคราะห์โลหะอนุภาคนาโน

#### 2.5.2.7 ยางธรรมชาติเหลว

ยางธรรมชาติเหลว (Liquid natural rubber: LNR) เป็นการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ โดยที่มวลโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน ( $M_n$ ) น้อยกว่า  $10^4$  Daltons นอกจากนี้ยังสามารถดัดแปรยางธรรมชาติให้มี  $M_n$  ต่ำและมีหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของยางธรรมชาติได้หรือเรียกว่า Telechelic Liquid Natural Rubber (TLNR) หมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ เช่น หมู่คาร์บอนิล เป็นต้น ตัวอย่างการนำยางธรรมชาติเหลวไปประยุกต์ใช้ เช่น ใช้ในการเตรียมเป็นวัสดุติดสำหรับสารยึดติด (Adhesive) ตัวเชื่อมประสาน (Sealant) หรือ สารตัวเติม (Reactive Plasticizer)

#### 2.5.2.8 ยางแท่ง

ยางแท่ง คือ ยางที่ผ่านการย่อยเป็นชิ้นเล็กๆ และอบให้แห้งด้วยความร้อน แล้วจึงอัดเป็นแท่งเป็นยางที่มีการกำหนดมาตรฐาน คุณสมบัติทางเทคนิคตามกระบวนการวิทยาศาสตร์ การผลิตยางแท่ง สามารถผลิตได้ทั้งจากน้ำยางหรือยางแท่งที่จับตัวแล้ว เช่น ยางก้อนกัวยางแผ่น ฯลฯ หลักสำคัญของการผลิตยางแท่ง คือ การตัดย่อยก้อนยางให้เป็นเม็ดหรือชิ้นเล็กๆ อย่างรวดเร็ว ล้างสิ่งสกปรกออก นำยางไปอบแห้ง และอัดเป็นแท่งสี่เหลี่ยมให้น้ำหนัก 33.33 กิโลกรัม ต่อก้อนหรือมีขนาดตามต้องการ ประเทศไทยเริ่มมีการผลิตยางแท่งตั้งแต่ปี 2511 เรียกชื่อในขณะนั้นว่า ยางแท่ง “ทีทีอาร์” (TTR: Thai Tested Rubber) โดยมีสถาบันวิจัยยางกรมวิชาการเกษตรเป็นผู้ดูแลรับผิดชอบในเรื่องของมาตรฐานและการควบคุมคุณภาพ และได้มีการปรับปรุงพัฒนามาตรฐานคุณภาพยางแท่งเรื่อยมา จนปัจจุบันได้เปลี่ยนชื่อใหม่เป็น ยางแท่ง “เอสทีอาร์” (STR : Standard Thai Rubber)

ยางแท่ง มีกระบวนการผลิตที่ได้มาตรฐานมีการคัดเลือกวัตถุดิบที่ได้คุณภาพ ผ่านกระบวนการผลิตที่ทันสมัย สะอาด ลดขนาดให้ได้ ตามที่กำหนดจากนั้น เข้าสู่กระบวนการอบยางให้สุกในอุณหภูมิที่เหมาะสม เข้าสู่กระบวนการอัดแท่ง ซึ่งน้ำหนักให้ได้ตามที่กำหนด จนถึงการบรรจุภัณฑ์ ยางจะผ่านกระบวนการทดสอบด้วยห้องปฏิบัติการที่ได้มาตรฐาน ให้ผลทดสอบที่มีความแม่นยำสูง

- Standard Thai Rubber 5 (STR 5)

- Standard Thai Rubber 10 (STR 10)
- Standard Thai Rubber 20 (STR 20)
- Standard Thai Rubber 10'cv' (STR 10'cv')
- Standard Thai Rubber 20'cv' (STR 20'cv')
- Standard Thai Rubber CV 50 (STR 50'cv')
- Standard Thai Rubber CV 60 (STR 60'cv')
- Standard Thai Rubber 5L (STR 5L)

## 2.6 กระบวนการผลิตยางคอมพาวด์

ยางคอมพาวด์ (Rubber compound) คือยางที่มีการผสมเคมีต่างๆ เช่น สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารตัวเติม เป็นต้น พร้อมทั้งจะนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ การจะผลิตยางคอมพาวด์ต้องอาศัยเทคโนโลยีต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการออกสูตรเคมียางและการผสมยางเพื่อให้ได้ยางคอมพาวด์ที่นำไปขึ้นรูปและคงรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ การออกสูตรเคมียางให้เหมาะสมเป็นขั้นตอนแรกที่มีความสำคัญอย่างมากในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากจะส่งผลต่อสมบัติหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางดังกล่าว การออกสูตรเคมียางที่ดีนั้นต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับสมบัติและการใช้งานของยางแต่ละชนิดโดยละเอียด ต้องรู้หน้าที่การทำงานของสารเคมีต่างๆ ที่จะผสมลงไปเป็นอย่างดี และเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต

- จุดประสงค์หลักของการออกสูตรเคมียาง
  - เพื่อให้สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ
  - เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติตามต้องการ
  - เพื่อควบคุมต้นทุน ราคาตามต้องการ
- ส่วนประกอบต่างๆในสูตรเคมียาง
  - ยางธรรมชาติ
  - สารวัลคาไนซ์
  - สารตัวเร่งปฏิกิริยา
  - สารกระตุ้นปฏิกิริยา
  - สารป้องกันยางเสื่อม
  - สารตัวเติม



- สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต
- สารอื่นๆ เช่น สี สารทำให้เกิดฟอง สารหน่วงการติดไฟ เป็นต้น

### 2.6.1 ประเภทของสารเคมี

#### 2.6.1 สารวัลคาไนซ์

สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) คือ สารที่ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ผ่านปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จะมีความยืดหยุ่นสูง และมีสมบัติที่เสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ การวัลคาไนซ์ยางที่ใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมคือ กำมะถัน ซึ่งเป็นสารวัลคาไนซ์ที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยางเพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นได้รวดเร็ว และยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ระบบนี้นิยมใช้กับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ซึ่งระบบนี้จะมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถใช้วัลคาไนซ์ยางที่ไม่มันระคู่อยู่ในโมเลกุลเช่น ยางซิลิโคน หรือ ยาง EPM ได้

#### 2.6.2 สารตัวเร่งปฏิกิริยา

สารตัวเร่ง (Accelerators) คือ สารที่เติมลงไปในยางปริมาณเล็กน้อยเพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้ยางวัลคาไนซ์ให้เร็วขึ้น ทำให้ลดเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ลง และทำให้ยางวัลคาไนซ์มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ซึ่งการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยานี้เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน เช่น ไทยูราม (Thiurams) เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไทูรามที่มีประสิทธิภาพในการเร่งอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูงมากในขณะที่ให้ระยะเวลาสกรอชที่ยาวกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไดไทโอคาร์บาเมตเล็กน้อย ตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ได้แก่ เทตระเมทิลไทยูรามไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulfide; TMTD) เป็นต้น นอกจากสารในกลุ่มนี้ยังมีสารตัวเร่งกลุ่มเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (Benzothiazole Sulfenamide) เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้ระยะเวลาสกรอชที่ยาวขึ้น แต่ให้อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูงและให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง ดังนั้น ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จึงมีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่นสูง และมีความต้านทานต่อการล้าสูง ตัวอย่างที่สำคัญของสารเคมีกลุ่มนี้ได้แก่ ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide; CBS) เป็นต้น

#### 2.6.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยา

สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators) คือสารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นให้สารเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดียิ่งขึ้น สารกระตุ้นปฏิกิริยาสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริก โดยทั่วไปนิยมใช้ซิงก์ออกไซด์ในปริมาณ 2-5 Phr ร่วมกับกรดสเตียริกในปริมาณ 1-2 Phr

#### 2.6.4 สารป้องกันยางเสื่อม

สารป้องกันยางเสื่อม (Antidegradants) เป็นสารเคมีที่เติมลงไปในสูตรเคมีเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่นิยมเติมลงไปปริมาณ 1-3 Phr สารป้องกันการเสื่อมสภาพมีหลายชนิดทั้งที่เปลี่ยนสียาง และไม่เปลี่ยนสียาง โดยสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่เปลี่ยนสียางอย่างรุนแรง จะมีประสิทธิภาพในการปกป้องยางสูงกว่าสารป้องกันเสื่อมสภาพที่ไม่เปลี่ยนสียาง ตัวอย่างสำคัญของสารป้องกันการเสื่อมสภาพคือ วิงสเตย์ แอล (Wingstay L)

#### 2.6.5 สารตัวเติม

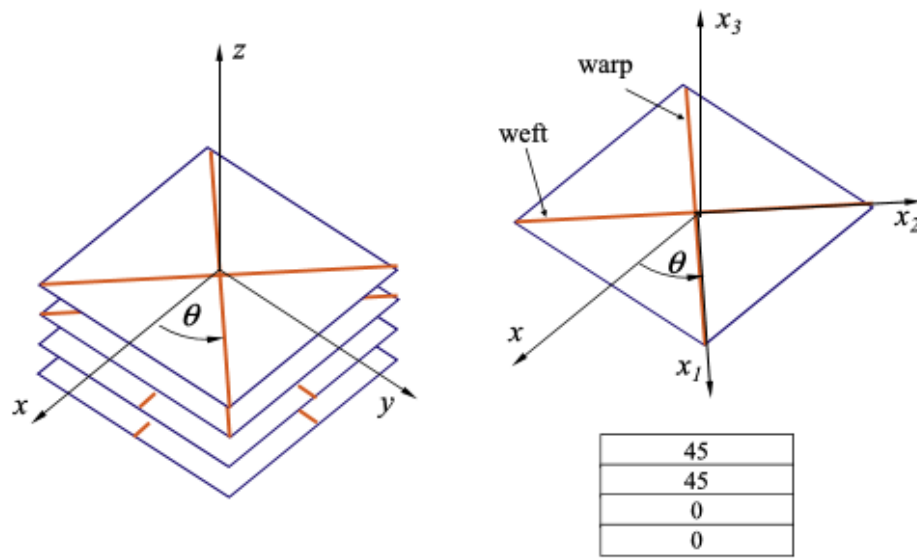
สารตัวเติม (Fillers) คือ องค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่างเช่น เสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต หรือ เพื่อลด ต้นทุน สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกตามประสิทธิภาพของการเสริมแรงได้เป็นสองกลุ่มคือ

- สารตัวเติมเสริมแรงได้แก่ เขม่าดำ และ ซิลิกา
- สารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง ได้แก่ ดินขาว แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

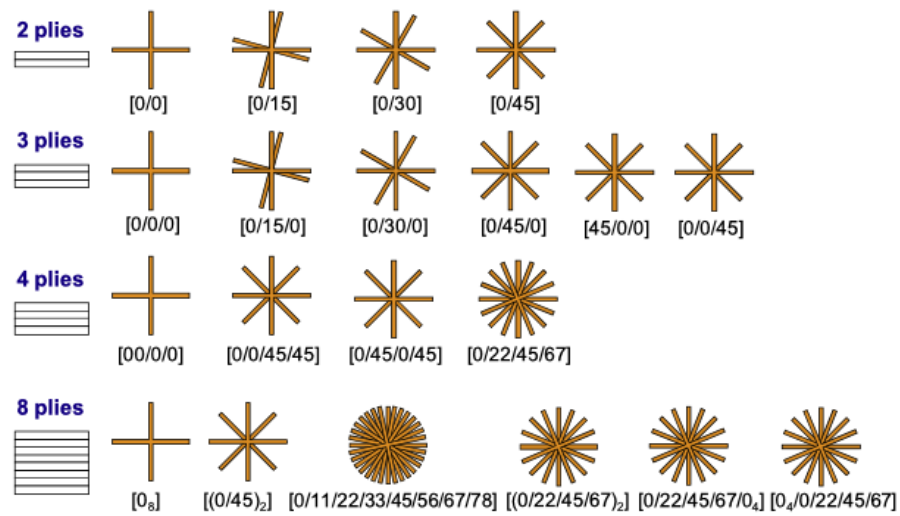
### 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบวัสดุที่สามารถป้องกันการกระแทกของวัตถุกระสุนต้องคำนึงถึงตัวแปรต่างๆ ที่สำคัญในการออกแบบเช่น ความแข็งแรงของวัสดุ (Toughness) ความหนา (Thickness) ความเร็วของวัตถุกระสุน การเรียงตัวของแผ่นวัสดุ ชนิดของวัสดุ เป็นต้น

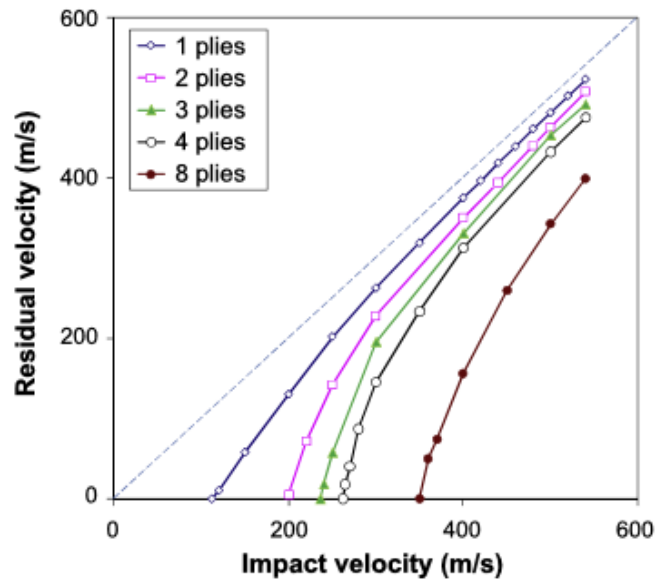
Ying W. [27] ได้ทำการทดสอบโดยนำแผ่นผ้าที่มีการจัดเรียงของเส้นใยในทิศทางต่างกัน มาทับซ้อนให้เกิดเป็นความหนาที่ต้องการดังรูปที่ 2.42 เพื่อทดสอบพลังงานดูดซับของตัวกระแทก และแสดงรูปแบบการจัดเรียงที่ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS ดังรูปที่ 2.43 เพื่อการวิเคราะห์และเปรียบเทียบจากการนำวัสดุที่เรียงตัวแตกต่างการนำมาซ้อนกันและหาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ดูดซับและความหนารวมทั้งการเรียงตัวของแต่ละผิวชั้นวัสดุ จากการทดสอบพบว่าจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการรับแรงเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.44 และการเรียงตัวของมุมเส้นใยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงกระแทกได้ดังรูปที่ 2.45 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำแผ่นผ้าทดสอบมาจัดเรียงให้มีทิศทางที่แตกต่างกันจะช่วยลดแรงกระแทกได้ ซึ่งส่งผลให้ดูดซับพลังงานไว้มากกว่าประมาณ 20% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเรียงตัวในทิศทางเดียว และการเรียงตัวที่ให้ผลการดูดซับพลังงานที่ดีที่สุด คือ  $0/22.5/45/67.5/2$



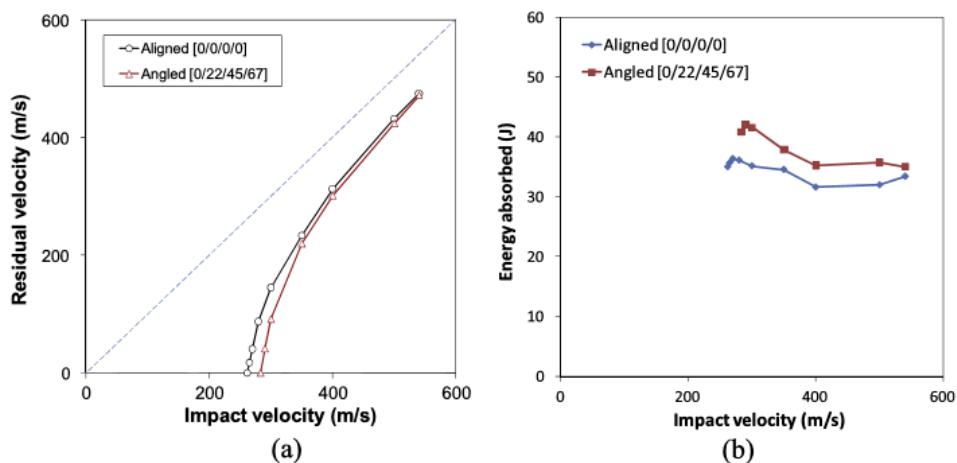
รูปที่ 2.44 การอ้างอิงของตำแหน่งการจัดเรียงอ้างอิงจากแกน x [27]



รูปที่ 2.45 แสดงการจัดเรียงเพื่อเป็นรูปแบบในการวิเคราะห์ FEA [27]



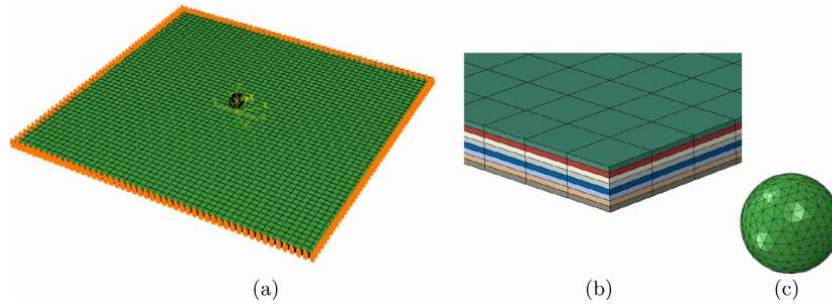
รูปที่ 2.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเริ่มต้นและหลังการกระแทกในแต่ละจำนวนชั้นของแผ่นผ้าที่ซ้อนกัน [27]



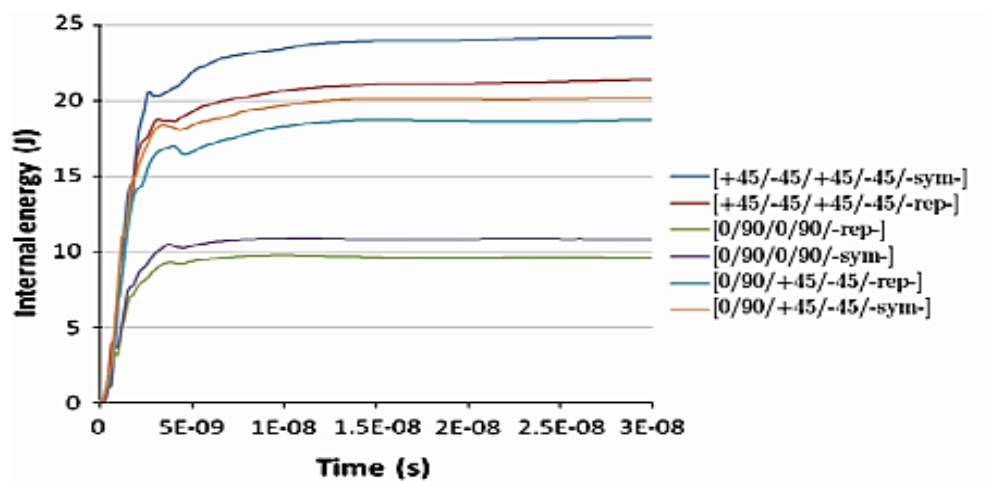
รูปที่ 2.47 แสดงความสัมพันธ์ที่ระหว่างความเร็วกระแทกเริ่มต้นและความเร็วหลังการกระแทก โดย a) เปรียบเทียบระหว่างการเรียงตัวและไม่เรียงตัว และ b) พลังงานที่ดูดซับจากการเรียงตัวของแผ่นผ้าทดสอบ [27]

Sudhir Sastry Y.B. [12] ศึกษาวัสดุกันการกระแทกโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งวัสดุที่นำมาทดสอบนั้นทำมาจากเส้นใยไฟเบอร์ CFRP, E-glass/Epoxy, Kevlar/Epoxy โดยมีแผ่นทดสอบมีความหนาถึง 8 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นนั้นมีความหนาเท่ากันแต่เรียงตัวไม่เหมือนกัน และใช้วัตถุทรงกลมเพื่อเป็นตัวกระแทกและมีความเร็วสูงแสดงดังรูปที่ 2.46 โดยการทดสอบนี้จะยิงลูกทรงกลมเข้าไปใกล้กับจุดศูนย์กลางของแผ่นทดสอบด้วยความเร็ว 100 m/s จากผลการทดสอบสามารถสรุป

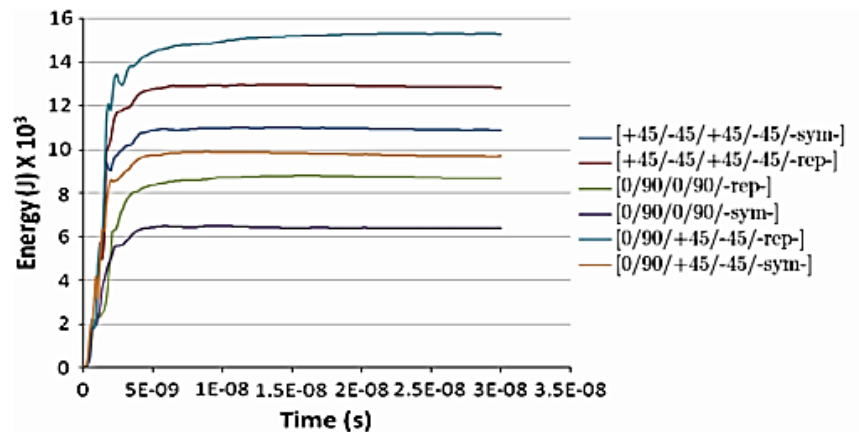
ได้ดังนี้ คือ การเรียงตัวของวัสดุที่ทำจากเส้นใยไฟเบอร์คือ [12] สามารถดูดซับพลังงานได้ 39.8 kJ และการเรียงตัวของวัสดุที่ทำจาก E-glass/Epoxy คือ 0/90/+45/-45/0/90/+45/-45 ซึ่งดูดซับพลังงานได้เพียง 15.6 kJ โดยวัสดุที่ทำจาก Kevlar/Epoxy สามารถดูดซับพลังงานได้ดีที่สุดเท่ากับ 43.8 kJ และมีการเรียงตัวแบบ +45/-45/+45/-45/-45/+45/-45/+45 แสดงดังรูปที่ 2.47, 2.48 และ 2.49



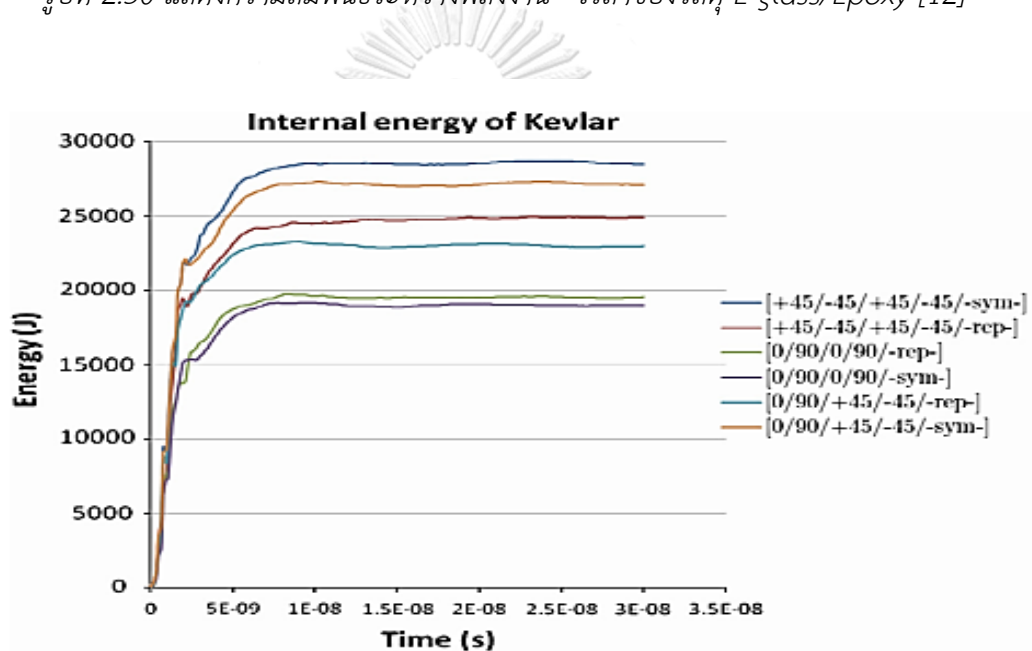
รูปที่ 2.48 รูปแบบการทดสอบ  $\alpha$  ขนาดแผ่นทดสอบ  $100 \times 100$  mm รับแรงกระแทกที่จุดศูนย์กลาง  
b) แผ่นทดสอบเรียงซ้อนกันจำนวน 8 แผ่น ที่ความหนาแต่ละแผ่นเท่ากัน และ c) วัตถุทรงกลมที่  
พิจารณา [12]



รูปที่ 2.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน - เวลาของวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ [12]



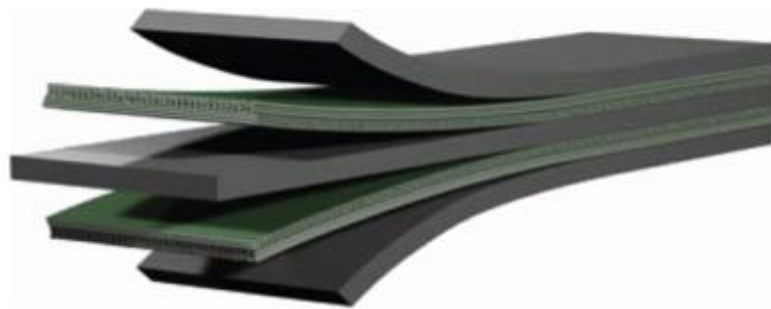
รูปที่ 2.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน - เวลาของวัสดุ E-glass/Epoxy [12]



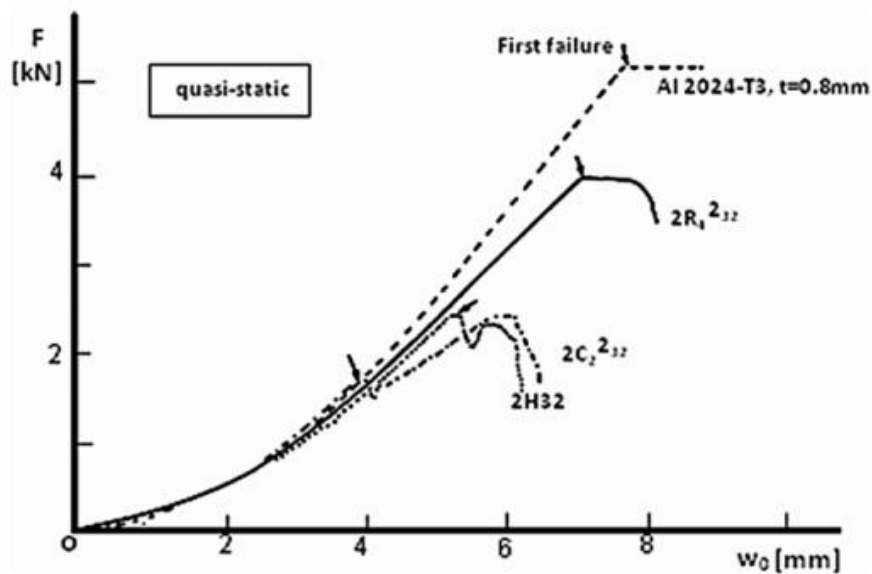
รูปที่ 2.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน - เวลาของวัสดุ Kevlar/Epoxy [12]

จากบทความของ M.Sadighi และคณะ [28] ได้ทำการวิเคราะห์วัสดุที่นำมาใช้ในการออกแบบเพื่อการป้องกันแรงกระแทกโดยมีชื่อเรียกว่า Fiber metal laminates (FMLs) ซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างเส้นใยและโลหะ ภายใต้การออกแบบในแนวคิดของวัสดุผสมชนิดใหม่ แสดงดังรูปที่ 2.50 การผสมผสานระหว่างโลหะและเส้นใยเพื่อออกแบบให้เป็นวัสดุผสม ซึ่งโดยทั่วไปจากหลายการทดลอง ได้ใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นตัวเสริมแรง (High-Strength aluminum alloy sheets) ซึ่งมีความหนา ระหว่าง 0.3-0.5 mm และผสมกับเส้นใยจำพวก Aramid และ Glass fiber ประสานด้วยเรซิน ซึ่งจากการทดสอบโดยการทดสอบแรงกระแทกด้วยความเร็วสูง พบว่าอะลูมิเนียมเกรด 2024-T3 เหมาะที่จะนำมาออกแบบร่วมกับเส้นใยแสดงดังรูปที่ 2.51 เพราะเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมอื่น จะ

เห็นว่าวัสดุผสมที่ประกอบด้วยอะลูมิเนียมเกรด 2024-T3 ที่ความหนา 0.8 mm จะใช้พลังงานเพื่อทำให้วัสดุผสมเกิดการเสียหายมากกว่าการใช้เส้นใยและเรซิน เพียงอย่างเดียว โดยจากรูปเป็นการทดสอบแบบ Static load เพื่อให้เกิดความเสียหายเริ่มต้น โดยอะลูมิเนียมเกรด 2024-T3 และ 7075-T6 (7475-T6) เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นส่วนประกอบหลักของ FMLs มากกว่าโลหะชนิดอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามอะลูมิเนียมเกรด 7075-T6 ใช้พลังงานในการเสียรูปต่ำกว่า อะลูมิเนียมเกรด 2024-T3 ถึง 3 เท่า



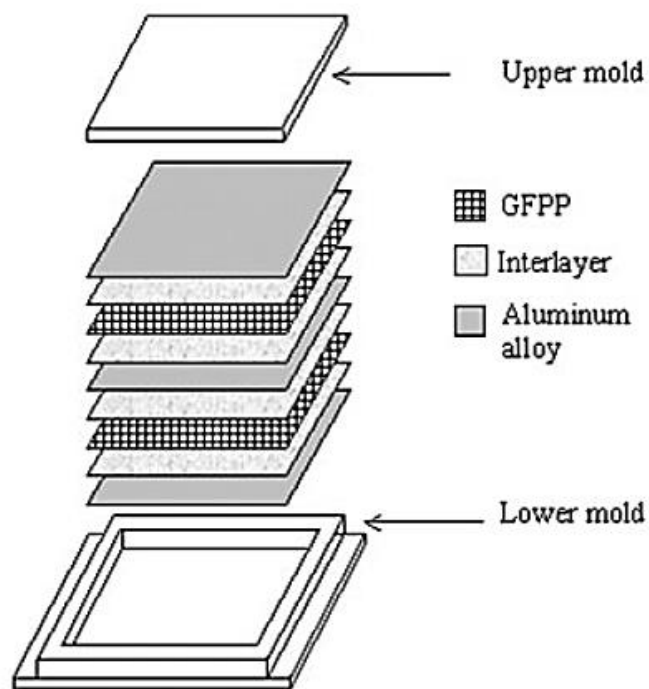
รูปที่ 2.52 วัสดุผสมแบบเส้นใย-โลหะ (FMLs) [28]



รูปที่ 2.53 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการทำให้วัสดุเกิดการเสียรูป [28]

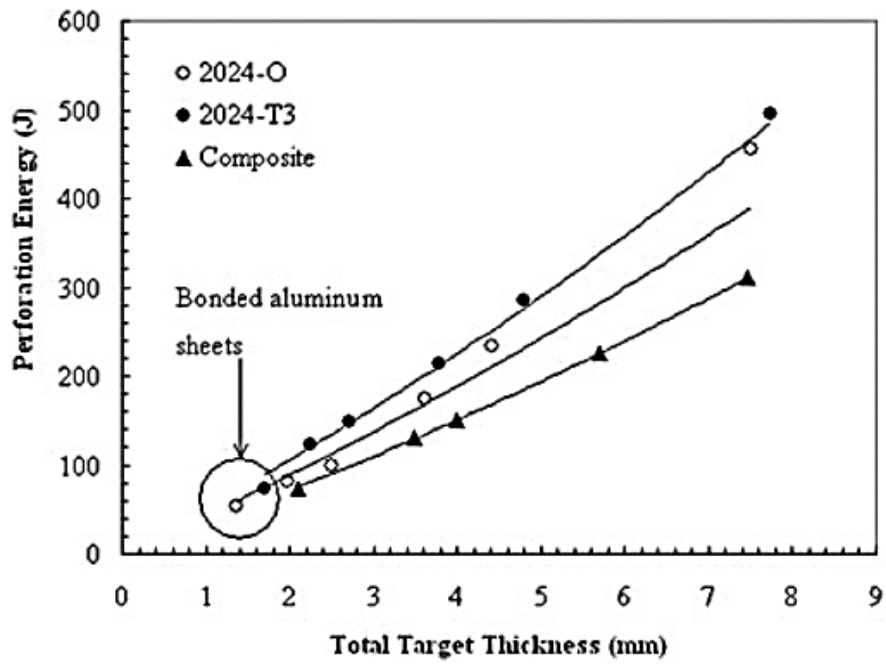
M.R. Abdullah, Cantwell [29] ได้ทำการทดสอบเส้นใยผสมโลหะหรือ FLMs ทดสอบที่แรงกระแทกความเร็วสูง (150 m/s) โดยใช้โลหะสองชนิดเพื่อทำการเปรียบเทียบคือ อะลูมิเนียมเกรด 2024-T3 และ 2024-O ซึ่งอะลูมิเนียมสองชนิดมีค่าความหนาแน่นเท่ากันเท่ากับ  $2,770 \text{ kg/m}^3$  โดยความหนาของอะลูมิเนียม 2024-T3 อยู่ 0.3 และ 0.8 mm และ อะลูมิเนียม 2024-O มีความหนาเท่ากับ 0.6 mm ซึ่งนำมาผสมกับเส้นใยเช่น GLARE (Glass fiber/Aluminum), ARALL (Aramid

fiber/Aluminum) และ CALL (Carbon fiber/Aluminum) ซึ่งล้วนแต่ต้องใช้พลังงานเพื่อทำให้เกิดความเสียหายมากกว่าวัสดุแบบดั้งเดิมทั้งสิ้น โดยการทดสอบนี้ได้ทำเลือกวัสดุทดสอบแบบ GFPP (Woven glass fiber reinforced polypropylene) ผสมกับอลูมิเนียมทั้งสองชนิดตามที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยผิวด้านหน้าและด้านหลังจะเป็นแผ่นอลูมิเนียมดังรูปที่ 2.52 จากผลการทดสอบพบว่า อลูมิเนียมเกรด 2024-T3 สามารถดูดซับพลังงานและป้องกันการเจาะทะลุได้มากกว่าอลูมิเนียม เกรด 2024-O ดังรูปที่ 2.53 และ 2.54 และความแตกต่างระหว่างความหนาของอลูมิเนียม 2024-T3 ดังรูปที่ 2.55

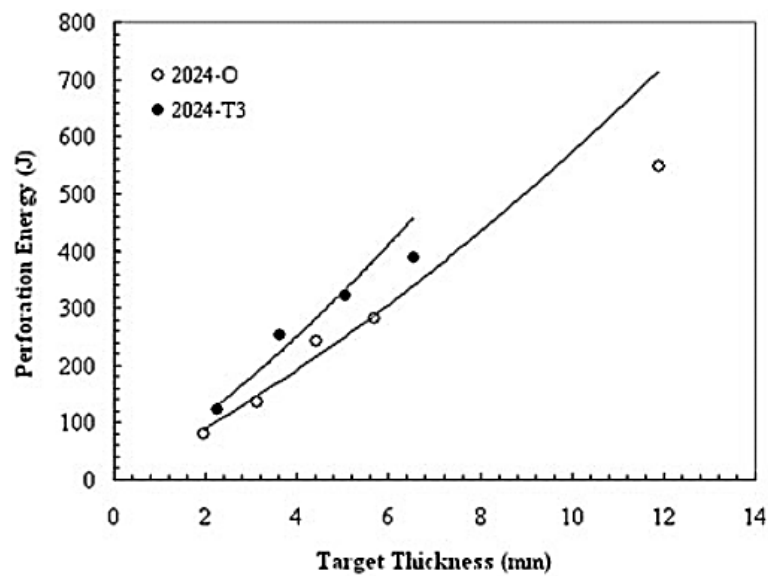


รูปที่ 2.54 แสดงการเรียงลำดับชั้นของแผ่นโดยมี 3 อลูมิเนียมและ 2 GFPP [29]

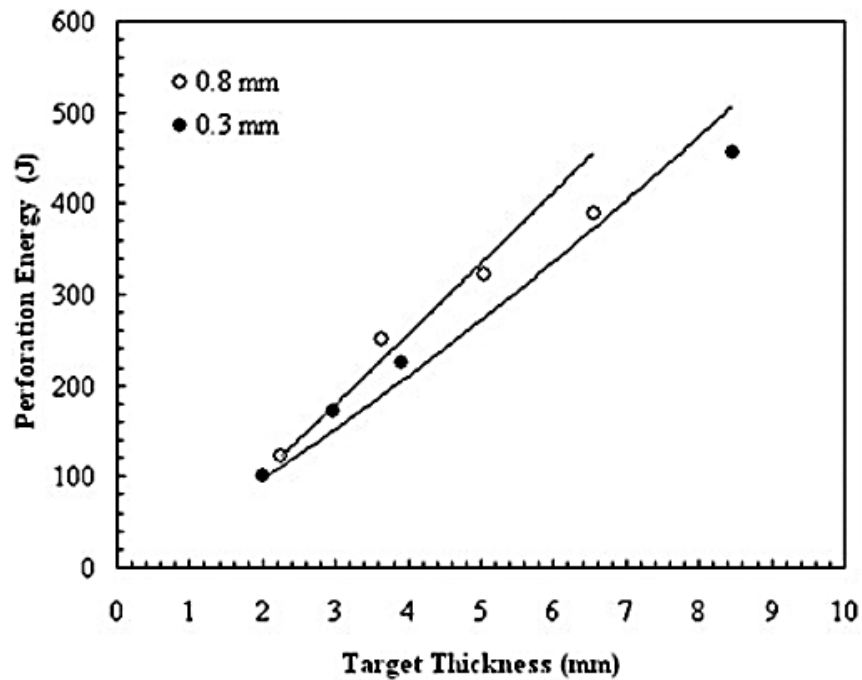




รูปที่ 2.55 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุของแผ่นทดสอบหลายชั้น [29]



รูปที่ 2.56 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุระหว่างแผ่นประกบด้วย อลูมิเนียมเกรด 2024-O และ อลูมิเนียมเกรด 2024-T3 [29]



รูปที่ 2.57 เปรียบเทียบความหนาของอลูมิเนียม 2024-T3 [29]

จากการทดสอบของ W.J. Cantwell & J.Morton [13] ได้ทดสอบเพื่อทำนายการเจาะทะลุผ่านวัสดุ ซึ่งผลนั้นขึ้นอยู่กับรูปทรงของวัสดุ, ลักษณะของตัวกระแทก และวัสดุที่นำมาใช้ รวมถึงความเร็วปะทะ ซึ่งจากการพยายามที่จะทำนายพลังงานที่ใช้ในการเจาะให้วัสดุเสียหายโดยการนำไฟเบอร์ผสมด้วยอีพ็อกซีจำนวน 6 ชั้นเรียงตัวในทิศทางต่างกัน ตามตารางที่ 2.6 และนำไปทดสอบทั้งแบบความเร็วต่ำและความเร็วสูง ซึ่งจากการทดสอบได้พบว่าลักษณะการเสียหายที่วิเคราะห์จากเครื่องไมโครกราฟ (Micrographs) มี 3 ลักษณะคือ การเสียหายของเนื้อพื้นวัสดุ, การแยกตัวออกตามแนวระนาบที่ขนานกัน และการเสียหายแบบเส้นใย ซึ่งโดยส่วนใหญ่เนื้อวัสดุจะแยกตัวออกทำมุมประมาณ  $45^{\circ}$  แสดงลักษณะดังรูปที่ 2.56

ตารางที่ 2.6 แผ่นวัสดุผสมที่ใช้ในการทดสอบ [13]

Laminate	No. of plies	Nominal thickness (mm)
$(\pm 45^\circ)_4$	4	0.5
$((\pm 45^\circ)_2)_8$	8	1.0
$((\pm 45^\circ)_4)_8$	16	2.0
$((\pm 45^\circ)_8)_8$	32	4.0
$(0_2^\circ, \pm 45^\circ)_8$	8	1.0
$((0_2^\circ, \pm 45^\circ)_2)_8$	16	2.0

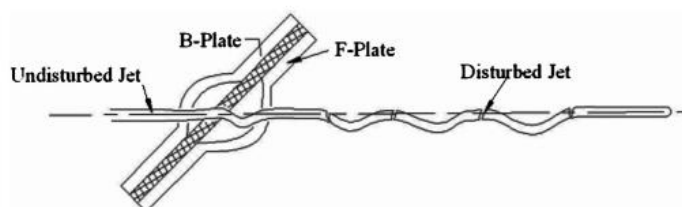


รูปที่ 2.58 วัสดุผสมที่มีจำนวนชั้น 32 ชั้น ทดสอบแบบความเร็วต่ำ โดยใช้พลังงาน 4.2J และขยายด้วยเครื่องมือโครกราฟ [13]

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบโดยการนำวัสดุซ้อนกันเข้าเครื่องทดสอบและกดด้วยหัวสี่เหลี่ยมด้วยความเร็ว 2 mm/min และวัดระยะการขจัดด้วย Standard dial gauge จะทำให้ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการขจัดของหัวกด จากนั้นคำนวณพื้นที่ใต้กราฟและหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของของวัสดุทดสอบจะสามารถคำนวณพลังงานการแตกหักได้ และเมื่อนำวัสดุทดสอบแบบชนิดเดียวไปทดสอบด้วยความเร็วสูง พบว่าพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุคล้ายกัน ทั้งๆที่ผลการตอบสนองการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันระหว่างความเร็วต่ำและความเร็วสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าไม่ว่าวัสดุทดสอบจะปะทะกับความเร็วต่ำหรือสูง พลังงานการแตกหักของวัสดุจะเป็นค่าคงที่ ซึ่งไม่แปรผันกับความเร็วปะทะ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำยามาทดสอบเพื่อการป้องกันกระสุนของ Xudong Zu และคณะ [30] ทำการศึกษาวิจัยโดยการนำยามาเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างแขนวิช โดยใช้แผ่นประกบหน้าและแผ่นประกบหลังเป็นหลักดังรูปที่ 2.57 ซึ่งมีแบบจำลองโดยใช้ระเบิดเพื่อให้เกิด

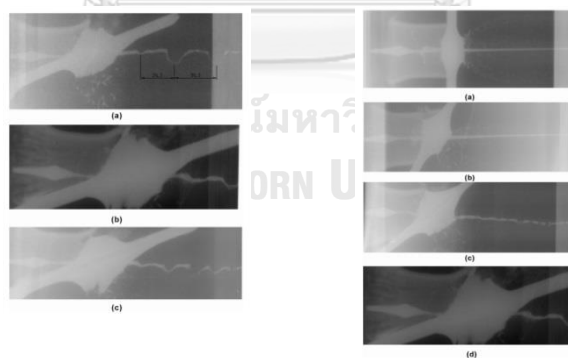
สะเก็ดกระทบกับชิ้นงานดังรูปที่ 2.58 โดยมีตัวแปรการทดสอบที่เกี่ยวข้องคือ ความหนาของแผ่นยาง ตั้งแต่ 2-8 mm มุมองศาที่รับสะเก็ดระเบิดตั้งแต่ 0-68° โดยเปรียบเทียบกับขนาดความลึกที่เจาะทะลุ ดังรูปที่ 2.59 จากการทดสอบพบว่ามุมองศารับสะเก็ดระเบิด (Anti-Shaped Charge) ที่มีประสิทธิภาพจากการทดลองมีมุมเท่ากับ 60° และความหนาของแผ่นยางอยู่ที่ 3-3.5 mm.



รูปที่ 2.59 การทดสอบป้องกันสะเก็ดระเบิดของเกราะป้องกันแบบยางผสม [30]



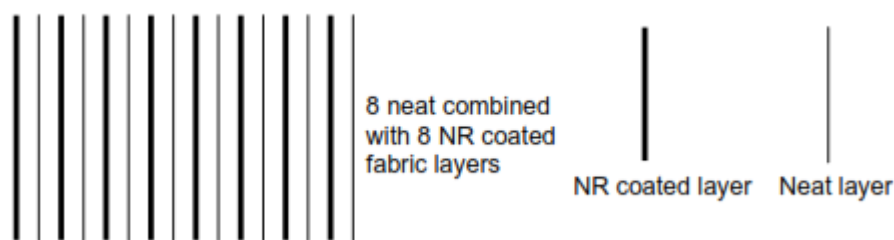
รูปที่ 2.60 แสดงการทดสอบโดยใช้ระเบิดในแต่ละองศา [30]



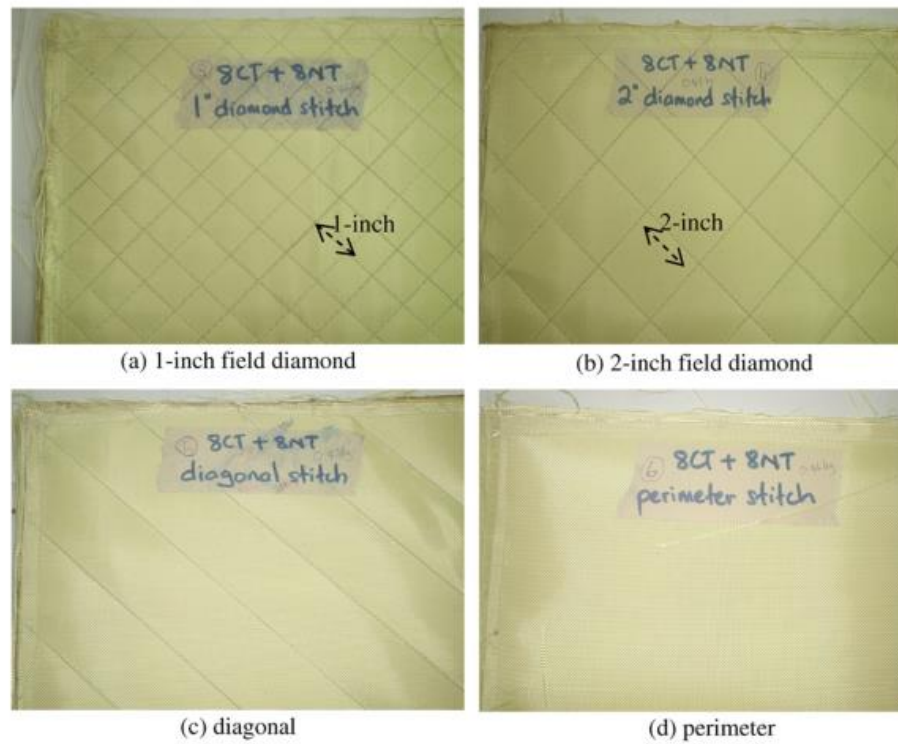
รูปที่ 2.61 ภาพเอ็กซเรย์การกระแทกของสะเก็ดระเบิด ต่างความหนาและมุมองศารับแรง [30]

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับยางธรรมชาติ ซึ่งการศึกษาวิจัยของ Mohd R.A และ คณะ [31] โดยได้นำผ้ามาผสมกับยางธรรมชาติ แล้วนำไปทดสอบการป้องกันกระสุน นอกจากนี้ยังมีรูปแบบการเย็บที่แตกต่างกันคือ การเย็บแบบ 1" Field diamond, 2" Field diamond, Diagonal และ Perimeter ซึ่งผ้าที่นำมาใช้นั้นทำมาจาก Kevlar 29 รูปแบบ 731 ความ

หนาแน่น 280 g/m<sup>2</sup> ผสานด้วยยางธรรมชาติก่อนการตัดแปลง (Pre- vulcanized) ชนิดมีมอดูลัสสูง และมีของแข็งผสม 60.5% ค่าความหนืด 35 s ที่อุณหภูมิ 25 °C โดยตัวอย่างชิ้นงานมีขนาด 0.32x0.32 m ในขั้นตอนการผลิต จะนำผ้าไปเคลือบกับน้ำยางธรรมชาติสักสองถึงสามวินาที ก่อนนำขึ้นมา โดยต้องการให้การเคลือบนั้นมีลักษณะคล้ายกับชั้นฟิล์มบางๆ และปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ในแต่ละชั้นดังรูปที่ 2.60 และนำ ผ้าเคฟลาร์ ซ้อนกัน 4 ชั้นและเย็บตามรูปแบบที่แตกต่างกัน โดยทั้งหมดจะเปรียบเทียบกับไม่มีการเย็บ โดยรูปแบบการเย็บแต่ละลายแสดงดังรูปที่ 2.61 โดยหลังจากการเย็บแล้วชิ้นงานทดสอบจะมีความหนาแน่นใกล้เคียงกันในแต่ละแบบแสดงดังตารางที่ 2.7 จากนั้นมาทดสอบด้วยเครื่องยิงกระสุนตามรูปที่ 2.62 โดยจะใช้เครื่องวัดความเร็วก่อนและหลังการปะทะ จำนวน 2 เครื่อง จากการทดสอบพบว่า การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับพลังงาน โดยใช้การเคลือบด้วยชั้นยางธรรมชาติสามารถให้ผลเพิ่มขึ้น 60% เมื่อเทียบกับไม่มีการเคลือบ และผลการทดสอบดังรูปที่ 2.63 ซึ่งผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า รอยเย็บมีผลต่อการเพิ่มเพิ่มประสิทธิภาพต่อการดูดซับพลังงาน และรอยเย็บแบบ 1” Field diamond ให้ผลที่ต่ำสุด และต่ำกว่าแบบไม่มีการเย็บ นอกจากนี้การเย็บที่มีผลการทดสอบดีที่สุดคือ การเย็บแบบ 2” Field diamond และแนะนำให้ใช้การเย็บเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและประสิทธิภาพการดูดซับพลังงาน



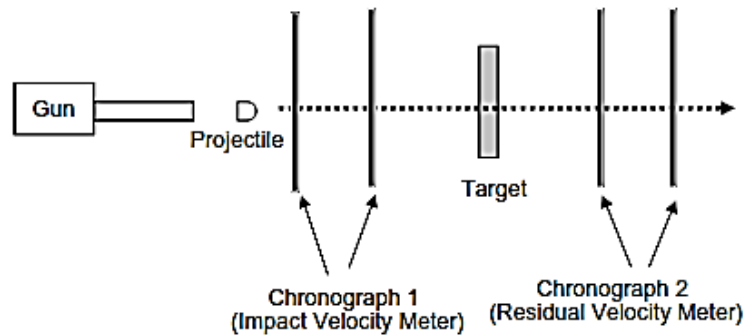
รูปที่ 2.62 การประกอบชิ้นงานและการจัดเรียงระหว่างผ้ากับยางธรรมชาติ [31]



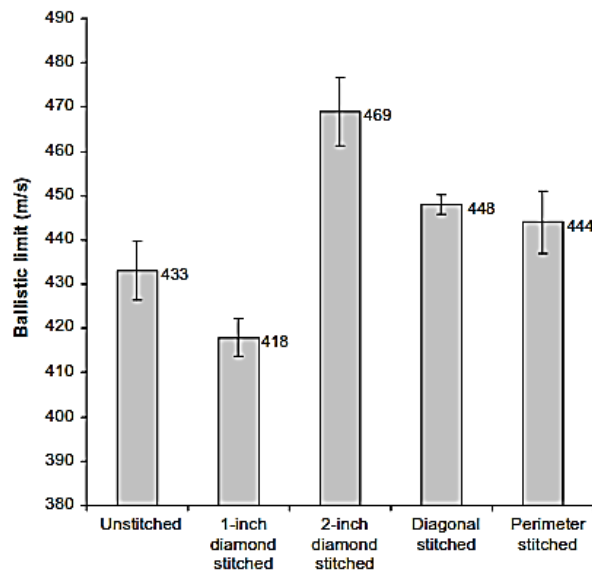
รูปที่ 2.63 แสดงรูปแบบการเย็บเพื่อเพิ่มความแข็งแรงระหว่างชั้นของชิ้นงาน [31]

ตารางที่ 2.7 สรุปลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานแต่ละแบบ [31]

Description of fabric systems for backface deformation assessment			
Fabric system	Descriptions	Number of layers	System areal density (g/m <sup>2</sup> )
A	32-neat layers unstitched	32	8992
B	28-neat layers unstitched	28	7868
C	(8 NR coated + 8 neat) 2 in. diamond stitched panel + 10 neat layers	26	8938
D	(8 NR coated + 8 neat) 2 in. diamond stitched panel + 8 neat layers	24	8376



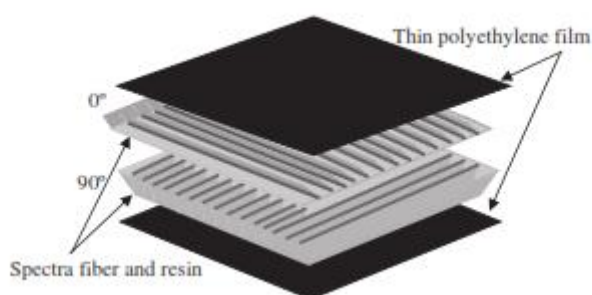
รูปที่ 2.64 แสดงอุปกรณ์การทดสอบ [31]



รูปที่ 2.65 ผลการทดสอบในแต่ละรูปแบบการเย็บของชิ้นงาน [31]

การนำยางธรรมชาติมาผสมสำหรับใช้ในการป้องกันการเจาะทะลุยังขึ้นกับจำนวนความหนาของการเคลือบผิว จากการศึกษาวิจัยของ Normal H. Mohd R.A. และ คณะ [32] ได้ทำการศึกษาโดยการนำเส้นใยผ้ามาเคลือบด้วยยางธรรมชาติ โดยเส้นใยผ้าที่เลือกใช้เป็นเส้นใยพอลิเอทิลีน แบบเรียงตัวทิศทางเดียวแสดงดังรูปที่ 2.64 มีความหนาแน่นเท่ากับ  $150 \text{ g/m}^2$  และมีความหนา  $0.16 \text{ mm}$ . นำมาเคลือบด้วยยางธรรมชาติก่อนการดัดแปลง ซึ่งมีส่วนผสมของของแข็ง  $60.5\%$  ความหนืด  $35 \text{ s}$  ที่อุณหภูมิ  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยนำมาเคลือบที่ความหนาต่างกัน ดังนี้ การเคลือบผิวแบบชั้นเดียว (Single dipping: UD), การเคลือบผิวสองชั้น (Double dipping: DD) และ การเคลือบผิวแบบสามชั้น (Triple dipping: TD) ซึ่งวัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุของชิ้นงานดังกล่าว โดยทำการทดสอบจากการประยุกต์ด้วยเครื่อง Testometric tensile tester

สำหรับการทดสอบการเจาะทะลุ ดังรูปที่ 2.65 a) และ 2.66 b) โดยสรุปผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 2.8 จากการทดสอบพบว่า การเคลือบผิวให้กับเส้นใยด้วยยางธรรมชาติ แบบชั้นเดียว (Single dipping: UD), การเคลือบผิวสองชั้น (Double dipping: DD) และ การเคลือบผิวแบบสามชั้น (Tripple dipping: TD) ให้ผลการต้านทานการเจาะทะลุเพิ่มขึ้น 39% ,47%, และ 62% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เคลือบด้วยยางธรรมชาติ ซึ่งอัตราการดูดซับพลังงานจะขึ้นอยู่กับเพิ่มความหนาแน่นและจำนวนชั้นที่เคลือบเส้นใยผ้า และนอกจากนี้การเคลือบผิวด้วยยางธรรมชาติยังช่วยลดความเสียหายที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างเส้นใยกับหัวทดสอบได้

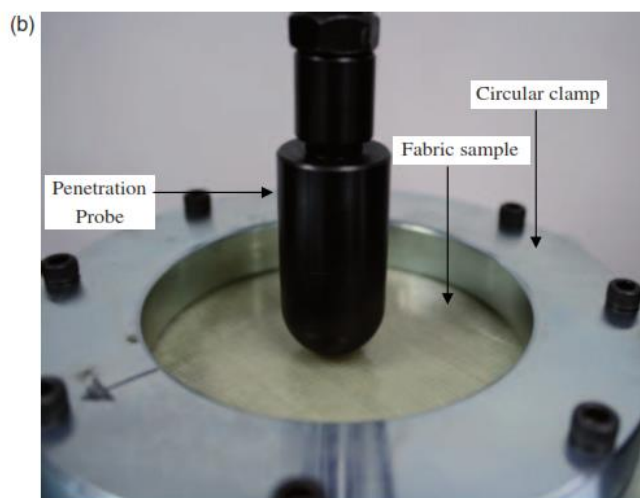


รูปที่ 2.66 โครงสร้างการเรียงตัวแบบเส้นใยเดี่ยว [32]



รูปที่ 2.67 a) เครื่องทดสอบการเจาะทะลุ [32]





รูปที่ 2.68 b) แสดงการวางชิ้นงานทดสอบ [32]

ตารางที่ 2.8 ผลการทดสอบการเจาะทะลุ [32]

Sample	Areal density (g/m <sup>2</sup> )	Thickness (mm)	Puncture load (N)	Specific puncture load (Nm <sup>2</sup> /g)
Uncoated	141	0.16	836	5.929
Single dip (SD)	230	0.26	1162	5.052
Double dip (DD)	321	0.34	1229	3.828
Triple dip (TD)	479	0.53	1350	2.818

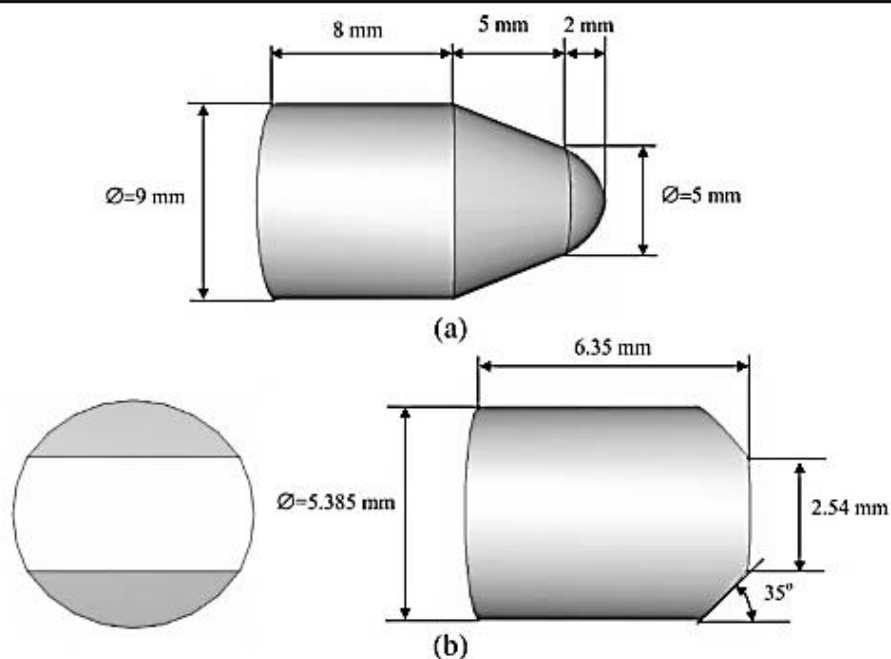
การทดสอบเสื่อเกราะกันกระสุนของ พ.ต.ท.กฤษฎากร เชนวงศ์ดีโสภาคย์ [33] ได้ทำการทดสอบเสื่อเกราะกันกระสุนจากส่วนประกอบของฟิล์มเอ็กซเรย์โดยมีชื่อเรียกว่า เสื่อเกราะพระเจ้าตาก โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ NIJ 0101.04 ระดับความรุนแรง 2A ซึ่งพบว่า สามารถป้องกันปืนพกได้ทุกชนิดซึ่งใช้เหมาะสำหรับเจ้าหน้าที่ตำรวจ และเจ้าหน้าที่ของรัฐที่มีหน้าที่ป้องกันและปราบปราม สำหรับปืนเล็กยาวนั้น ต้องเสริมแผ่นโลหะเข้าไป ซึ่งผลการทดสอบสามารถหยุดลูกกระสุนปืน M16 A1 ได้ โดยการเสริมแผ่นอะลูมิเนียมด้านหน้าเกราะเพื่อลดแรงปะทะและดูดซับพลังงาน และผ่านเกราะกันกระสุน และเสริมแผ่นสแตนเลสด้านหลังเกราะเพื่อรับแรงและเศษสะเก็ดโลหะที่หลอมละลายกับหัวลูกกระสุนปืนไว้ได้

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสื่อเกราะของ M. Colakoglu และ คณะ [34] ได้ทำการทดสอบเกราะป้องกันส่วนบุคคล โดยเปรียบเทียบระหว่างสองวัสดุเนื้อพีนพอลิเมอร์คือ Kevlar 29/Polivnyl butyral และ Polyethylene fiber ซึ่งวัสดุสองชนิดนี้เหมาะที่จะนำมาผลิตเป็นเสื่อเกราะป้องกันกระสุนน้ำหนักรเบจากการทดสอบสามารถอธิบายและวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นด้านหลังชิ้นงาน

ทดสอบ และความเร็วในการเจาะทะลุของกระสุน โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นสองประเภทคือ การทดสอบแรงดึงของวัสดุทั้งสองชนิดเพื่อหาคุณสมบัติทางกลแสดงดังตารางที่ 2.9 ซึ่งวิธีการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุสองชนิด โดยออกแบบให้มีลักษณะคล้ายคานที่มีความหนา 10 ชั้น ความกว้าง 30 mm และความยาว 300 mm ที่ความหนา 4 mm สำหรับ Kevlar 29 และ 2.9 mm สำหรับ Polyethylene และการทดสอบการป้องกันกระสุน โดยใช้กระสุนชนิด 9 mm แบบ FMJ และใช้ลูกระสุนแบบ STANAG 2920 เพื่อการทดสอบการเจาะทะลุ แสดงดังรูปที่ 2.67 โดยชิ้นงานทดสอบมีลักษณะซ้อนทับ 20 ชั้น ที่ความหนา 8 mm สำหรับ Kevlar 29 และ 5.6 mm สำหรับ Polyethylene ซึ่งการทดสอบนี้จะใช้สมการพลังงานจลน์เข้ามาวิเคราะห์ และความเสียหายด้านหลังแผ่นทดสอบพบว่าทั้งสองชนิดมีลักษณะความเสียหายแบบยืดหยุ่นและแบบพลาสติก นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการป้องกันกระสุนของ Kevlar 29/Polivnyl butyral สามารถป้องกันกระสุนที่ความเร็ว 680 m/s ดีกว่า Polyethylene fiber ที่ความเร็ว 480 m/s แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อนำมาหารด้วยความหนาแน่นของ Kevlar 29/Polivnyl butyral เท่ากับ  $73.3 \text{ m}^3/\text{kgs}$  และ  $95.2 \text{ m}^3/\text{kgs}$  สำหรับ Polyethylene fiber ซึ่งจะเห็นว่า Polyethylene fiber ให้ประสิทธิภาพดีกว่า ถึง 30%

ตารางที่ 2.9 แสดงคุณสมบัติทางกลของวัสดุทดสอบ [34]

Materials	Modulus E(GPa)	Density $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	Tensile Strength(MPa)	Failure strain (%)
Kevlar-29 Laminate	9	1160	450	9
Polyethylene Laminate	19.5	900	653	7



รูปที่ 2.69 ลักษณะกระสุนทดสอบ a) 9 mm. FMJ และ b) STANAG 2920 [34]

งานศึกษาวิจัยของ J.T. South [35] ได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกลของยางธรรมชาติผสมและการเชื่อมสภาพทางความร้อน จากการทดสอบการเชื่อมสภาพทางความร้อนพบว่าการทดสอบเชื่อมสภาพในช่วงอุณหภูมิ 80-120 °C ในระยะเวลา 3-24 วัน ผลการเชื่อมสลายวัดค่าจากเปลี่ยนแปลงของสารผสมซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา ซึ่งทำนายได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมสภาพและสารเคมีผสมทำให้คุณสมบัติทางกลพัฒนาขึ้นหรือขึ้นอยู่กับสัดส่วน Poly และ Monosulfidic crosslink โดยหลังจากนั้นนำไปทดสอบการแตกหักซึ่งจากการทดสอบพบว่า อัตราการเกิดการแตกหักขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มขึ้นของการเชื่อมสภาพทางความร้อน

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่านอกจากความเร็วและความหนาที่มีผลต่อการป้องกันกระสุนแล้ว ยังมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเรียงตัวของชั้นวัสดุในทิศทางต่างๆ พบว่าการเรียงตัววัสดุสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์และลดแรงกระแทกเพิ่มขึ้นได้ดีกว่าทางเรียงตัวทิศทางเดียว และการใช้งานร่วมกับแผ่นวัสดุโลหะเช่นแผ่นอะลูมิเนียมเกรด T2024-T3, T2024-O และ T7075-T6 ยังมีส่วนช่วยในการรับพลังงานจลน์ เนื่องจากวัสดุมีน้ำหนักเบาและความหนาให้เลือกใช้งานหลายความหนา อย่างไรก็ตามแผ่นอะลูมิเนียมที่เลือกใช้ต้องสอดคล้องกับตลาดภายในประเทศ ซึ่งงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วัสดุที่หาได้ง่ายภายในประเทศเป็นหลัก เพื่อลดค่าใช้จ่ายต่างๆ เช่น ค่านำเข้าวัสดุในจำนวนที่น้อย ค่าขนส่ง ค่าภาษี เป็นต้น ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ที่พบได้ทั่วไปส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุผสมชนิดใหม่ที่ออกจำหน่ายแล้ว เช่น เคพลา ไบแก้ว และคาร์บอนไฟเบอร์ เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง เมื่อเทียบกับความหนาแน่น ซึ่งส่งผลให้มีราคาที่สูงมากเช่นกัน แต่การออกแบบวัสดุผสมป้องกันกระสุน ไม่ได้มีข้อจำกัดแค่เพียงวัสดุดังกล่าวเท่านั้น จากงานวิจัยยังมีวัสดุอื่นที่มีความสามารถเทียบเท่าในการป้องกันกระสุน หรือ ดูดซับพลังงานจลน์ เช่น ยางพารา จากงานวิจัยโดยการนำยางพารามาเคลือบผิววัสดุ สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ได้ ซึ่งจากงานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นจุดเด่นของยางพาราที่มีผลต่อการดูดซับพลังงานจลน์ ซึ่งยางพาราเป็นวัสดุที่มีมากในประเทศและยังเป็นวัสดุทางเศรษฐกิจในการส่งออกอันดับต้นของประเทศ ส่งผลให้ผลผลิตมีราคาต่ำเหมาะแก่การนำศึกษาวิจัยในด้านวัสดุใหม่ๆ เห็นได้จากรูปแบบของผนังป้องกันที่นำยางพาราความหนา 2-8 mm มาประกบกับแผ่นอะลูมิเนียมด้านหน้าและด้านหลัง โดยนำมาทดสอบการป้องกันสะเก็ดระเบิด ในส่วนของการทดสอบจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ลักษณะคือ การทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ ในห้องทดสอบ และการทดสอบเพื่อการป้องกันกระสุนจริงในภาคสนาม ซึ่งการทดสอบในห้องทดลองจะเน้นในเรื่องการวิเคราะห์พลังงานการแตกหักของวัสดุ โดยใช้วิธีการการทดสอบแบบเจาะทะลุของวัสดุ ซึ่งมีหลักการคือการวิเคราะห์พลังงานพื้นที่ใต้กราฟจากการเจาะนำมา

หารด้วยพื้นที่ผิวของหัวทดสอบที่ทำการเจาะ ซึ่งจะสามารถคำนวณค่าพลังงานการแตกหักซึ่งเป็นค่าคงที่ ได้ ซึ่งหลักการนี้สามารถนำไปให้ได้ในหลายเครื่องมือที่มีวัตถุประสงค์ที่ต้องการทดสอบเดียวกัน การนำยางพาราธรรมชาติมาให้เป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติ มีจุดด้อยคือ อายุการใช้งาน การเก็บรักษา เป็นต้น ซึ่งจำเป็นต้องนำมาแปรรูปก่อน ก่อนการนำมาผลิตเป็นวัสดุผสมเพื่อการป้องกันกระสุน โดยงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวกับยางพาราเช่น การเพิ่มการเก็บรักษา การเพิ่มความเหนียว การทนทานต่อแสงแดด การเพิ่มความแข็ง เป็นต้น



## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย

3.1.1 ยางพาราธรรมชาติ STR5L

3.1.2 ลวดตาข่ายเหล็กเกรด SS400 ขนาด 1/2"x1/2" เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 mm เป็นเส้นลวดตาข่ายเหล็กเคลือบด้วยสังกะสี หาซื้อได้จากร้าน Global house แสดงส่วนผสมในภาคผนวก ค.

3.1.3 แผ่นอะลูมิเนียมเกรด 5083 T จากร้านเมธาเมทัล แสดงส่วนผสมในภาคผนวก ค.

3.1.4 แผ่นเหล็กกล้าเกรด SS400 จากร้านเมธาเมทัล แสดงส่วนผสมในภาคผนวก ค.

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบในห้องทดลอง

3.2.1 การทดสอบเพื่อหาค่าพลังงานการแตกหักแบบใช้หัวเข็มจำลองการกด

- เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Universal Testing Machine (UTM) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบแรง UTM

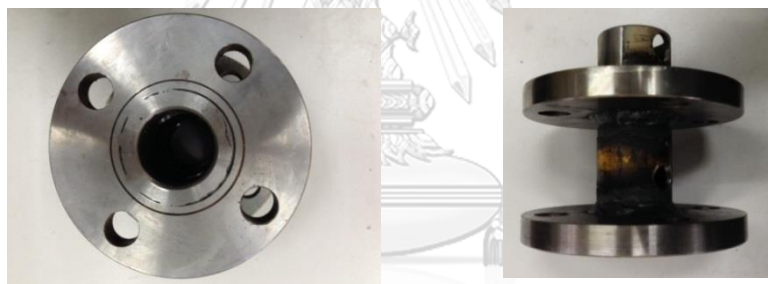
- หัวเข็มเหล็กทรงกระบอกและแป้นยึดจับชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงกดดังรูปที่ 3.2 และ 3.3 มีรายการวัสดุดังนี้

### วัสดุ

- ท่อเหล็กกล้า ขนาด 1 ¼.” (40A) Schedule 40 ASTM 53 GRADE A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48.3 mm ความหนาผนังท่อ 3.68 mm ความยาว 6 m จำนวน 1 ท่อน
- หน้าแปลนเหล็กดำ มาตรฐาน JIS 10K ขนาด 1 ¼.” จำนวน 2 แผ่น
- ข้อต่อเกลียวในเหล็กดำขนาด 1 ¼” จำนวน 1 ตัว
- เพลากลึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ยาว 70 mm จำนวน 1 ท่อน
- สกรูหัวเหลี่ยมเหล็กชุบ ขนาด ½” . X 2” พร้อมหัวน็อต

### การประกอบชิ้นงาน

- ออกแบบหัวเข็มจำลองการเจาะทะลุและแป้นยึดจับชิ้นงานโดยใช้วิธีการเชื่อมและการกลึงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3 ซึ่งอ้างอิงมาตรฐาน ASTM F1342 [19]



รูปที่ 3.2 แป้นจับชิ้นงาน



รูปที่ 3.3 หัวเข็มเจาะทะลุ

#### 3.2.2 การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน

- เครื่องทดสอบแรงดึง พร้อมอุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 หัวทดสอบแรงดึงชิ้นงาน

### 3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบภาคสนาม

#### 3.2.3.1 อาวุธปืน M16 และกระสุนปืนดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กระสุนปืน M16

#### 3.2.3.2 เครื่องวัดความเร็วกระสุน (Chronograph) 2 ชุดรุ่น BETA Model รูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความเร็วกระสุน

### 3.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและเครื่องมือทดสอบ

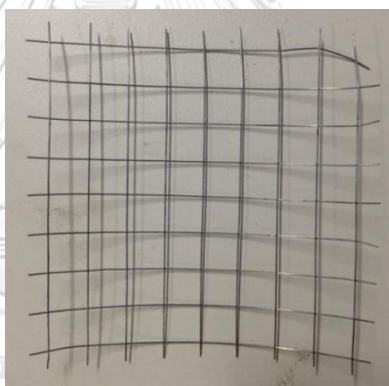
#### 3.3.1 การเตรียมวัสดุสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน

##### 3.3.1.1 ยางพาราแท่ง STR 5L ดังรูปที่ 3.7



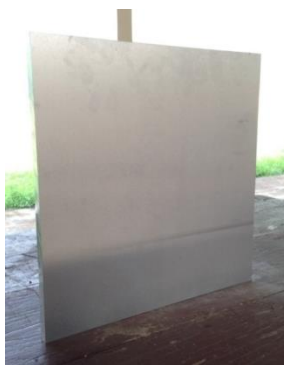
รูปที่ 3.7 ยางพารา STR 5L

3.3.1.2 ลวดตาข่ายเหล็กขนาด  $1/2'' \times 1/2''$  โดยความยาวต่อม้วน 30 m มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.05 mm ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ลวดตาข่ายเหล็กขนาด  $1/2'' \times 1/2''$  ตัดขนาด 11 x 11 cm

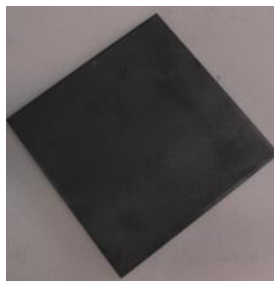
3.3.1.3 แผ่นอะลูมิเนียมตัดสำเร็จขนาด 30.5 x 30.5 cm โดยมีขนาดความหนา 6 mm, 8 mm, 10 mm และ 12 mm ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผ่นอะลูมิเนียมตัดสำเร็จขนาด 30.5 x 30.5 cm



3.3.1.4 แผ่นเหล็กกล้า ขนาด 30.5 x 30.5 cm โดยเลือกความหนาที่ 6,8,10 และ 20 mm ดังรูป 3.10



รูปที่ 3.10 แผ่นเหล็กตัดสำเร็จตามขนาด 30.5 x 30.5 cm

3.3.2 การเตรียมอัตราส่วนผสมสำหรับผลิตชิ้นงาน

สูตรสารเคมีและอัตราส่วนผสมที่นำมาใช้ขึ้นรูปชิ้นงานจะใช้สูตรการพัฒนายางพาราของสถาบันวิจัยยางแห่งชาติ [24] ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบสำหรับอัดขึ้นรูปชิ้นงานยางพารา [35]

กลุ่ม	ส่วนผสม	อัตราส่วน (ต่อน้ำหนัก)	Phr <sup>8</sup>
1	STR 5L	1,000	100
2	Zno	50	5
	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (Stearic acid)	20	2
3	CaCO <sub>3</sub>	3,000	300
	สี	50	5
4	WSL (Wing Stay L)	10	1
5	CBS <sup>9</sup>	15	1.5
	TMTD <sup>10</sup>	2	0.2
6	S (Sulfur)	25	2.5

<sup>8</sup> Phr: (Part per hundred of rubber) = ส่วนต่อยาง 100 ส่วน

<sup>9</sup> N-Cyclohexylbenzothiazole-2-sulphenamide

<sup>10</sup> Tetra methyl thiuramdisulphide

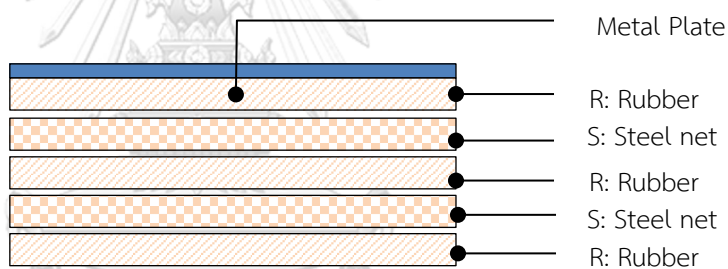
### 3.3.3 การขึ้นรูปชิ้นงานยางพาราแบบอัดขึ้นรูป

การขึ้นรูปชิ้นงานโดยการอัดจะมีขั้นตอนการเรียงตัวของวัสดุตามตารางที่ 3.2 ซึ่งดังรูปที่

### 3.11 โดยแต่ละชั้นจะถูกวางไว้ก่อนที่จะทำการอัดโดยมีลำดับชั้นดังนี้

ตารางที่ 3.2 แสดงลำดับชั้นของผนังกันกระสุน

No	Layer
Cover Plate	Metal
Layer 1 (Top Surface )	Rubber :R
Layer 2	Steel net : S
Layer 3	Rubber: R
Layer 4	Steel net : S
Layer 5	Rubber: R



รูปที่ 3.11 แสดงโครงสร้างการเรียงตัวของชิ้นงานประเภทที่ (ยางพารา+ตาข่ายเหล็ก)

### ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานยางพารา

- นำลวดตาข่ายเหล็กขนาด 1/2”x1/2” มาเรียงซ้อนทับกันเพื่อลดช่องว่างขนาดของลวดตาข่ายลง แล้วยึดติดกันด้วยการบัดกรี โดยขนาดช่องที่หลังจากเชื่อมติดกันแล้วจะมีขนาด 1/4”x1/4” หรือ ¼ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ลวดตาข่ายเหล็กเชื่อมข้อติดกันด้วยกาบดกรี

- ชั่งน้ำหนักยางพารา STR 5L 1,000 g ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ยางพารา STR 5L 1,000 g

- ชั่งน้ำหนัก ZnO และ  $C_{18}H_{36}O_2$  50 และ 20 g ตามลำดับ
- ชั่งสารป้องกันยางเสื่อม WSL 20 g
- ชั่งสารเร่งปฏิกิริยา CBS 15 g
- ชั่งสารเร่งปฏิกิริยา TMTD 2 g
- ชั่งสารตัวเติม  $CaCO_3$  3000 g
- ชั่ง S 25 g
- ตัดสีผสมยางและชั่งน้ำหนัก 50 g

- นำยางพาราแท่ง STR 5L ที่ซึ่งนำหนักตามสัดส่วนน้ำหนักแล้ว มาบดเข้ากับเครื่องบดตั้งรูปที่ 3.14 และ 3.15 โดยจะใช้ที่อุณหภูมิ 70°C เพื่อให้ยางนิ่ม



รูปที่ 3.14 เครื่องบดยางพาราและผสมสารเคมี



รูปที่ 3.15 ยาง STR 5L ที่เข้าเครื่องบดที่อุณหภูมิ 70°C

- จากนั้นเติมสารเคมีทีละกลุ่มโดยกลุ่มแรกคือกลุ่มสารกระตุ้นประกอบด้วย ซิงค์ออกไซด์ (Zno) และ กรดสเตียริก ( $C_{18}H_{36}O_2$ ) พร้อมกัน ทั้งระยะห่างในการเติมสารแต่ละชนิดเล็กน้อย จากนั้นรอประมาณ 2 นาที จนส่วนผสมเข้ากันได้
- เมื่อบดได้ที่แล้วยางที่ได้จะทำปฏิกิริยากับสารกระตุ้นทำให้ยางมีสีขาว
- เติมสารกลุ่มที่สอง สารตัวเติม  $CaCO_3$  ลงครึ่งหนึ่งและใส่ชั้นสี และใช้ระยะเวลาบดประมาณ 2 นาที

- เติม  $\text{CaCO}_3$  อีก 1,500 g และ WSL 10 g พร้อมบดให้ส่วนผสมเข้ากันจนยางที่ได้จะเปลี่ยนเป็นสีตามสีที่กำหนด
- เติมสารกลุ่มที่ 5 สารเร่ง CBS และ TMTD 15 g และ 2 g ตามลำดับ
- เมื่ออบแล้วยางที่ได้จะมีสีเข้มขึ้น
- เติมสารกลุ่มสุดท้าย S 25 g เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ยางสุก
- เมื่ออบส่วนผสมครบแล้วเทชิ้นงานออกจากเครื่องอบ จะได้ชิ้นงานพร้อมนำไปขึ้นรูป ดังรูปที่

3.16

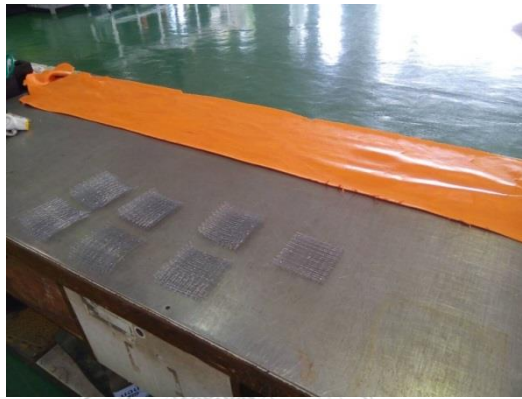


รูปที่ 3.16 ยางที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแล้ว

- นำยางพาราที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแล้วมาเข้าเครื่องรีดดังรูปที่ 3.17 โดยจะปรับขนาดความหนาของเนื้องานโดยการหมุนพวงมาลัยควบคุมของเครื่องในแนวแกน X และ Y โดยความหนาที่ต้องการในแต่ละชั้นแสดงดังตารางที่ 3.3 สำหรับแม่พิมพ์ขนาดความหนา 12 mm ซึ่งชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.18 โดยเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของลวดตาข่ายเหล็กเป็น 7 ชั้น ตามตารางที่ 3.3 ผลปรากฏว่าชิ้นงานเสียรูป โดยจะมีช่องตาข่ายโผล่ออกมาจากเนื้องานพารา คิดเป็นสัดส่วนน้ำหนักระหว่างลวดตาข่ายเหล็กกับความหนายาง 12 mm อยู่ที่ 15 g ต่อ ความหนา 12 mm



รูปที่ 3.17 เครื่องบดยางพาราให้ได้ขนาดความหนาตาที่ต้องการ

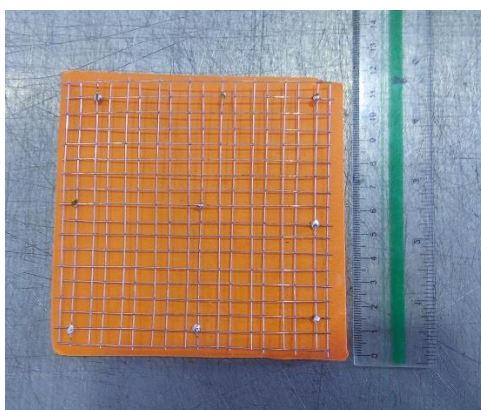


รูปที่ 3.18 ยางที่ผ่านการบดตามความหนาที่ต้องการแล้ว

ตารางที่ 3.3 แสดงความหนาของแผ่นยางในแต่ละชั้นสำหรับแม่พิมพ์ขนาดความหนา 12 mm

จำนวนชั้น	จำนวน Layer	ความหนาแต่ละชั้นของยาง (cm)	จำนวนชั้นของยาง	จำนวนชั้นลวดช่องขนาด 1/4"x1/4"
1	1	0.7	2	ไม่มีลวด
2	3	0.7	2	1
3	5	0.5	3	2
4	7	0.5	4	3
5	9	0.4	5	4
6	11	0.3	6	5
7	13	0.2	7	6

- ปรับขนาดความหนา ความกว้าง และความยาวของชิ้นงานตามตารางที่ 3.3 ข้างต้น
- ตัดชิ้นยางพาราด้วยคัตเตอร์ให้มีขนาดใกล้เคียงพอที่จะใส่ลงในลงแม่พิมพ์ และตัดลวดตาข่ายเหล็กให้มีขนาดเท่ากับชิ้นยางพารา พร้อมทั้งนำมาซ้อนทับกันเพื่อให้ความห่างระหว่างช่องเสীগอง และเชื่อมระหว่างแผ่นเข้าด้วยกันด้วยการบัดกรีโดยแต่ละชั้นให้แทรกด้วยชิ้นลวดตาข่ายเหล็กดังรูปที่ 3.19 และ 3.20

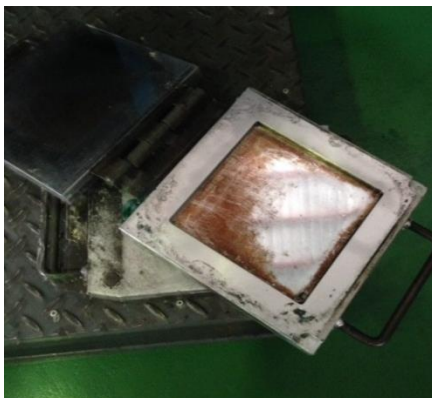


รูปที่ 3.19 วางลวดตาข่ายเหล็กสลับกับชิ้นยางพาราตามความหนาที่กำหนด



รูปที่ 3.20 ตัวอย่างชิ้นงานที่ประกบกันเรียบร้อยแล้วพร้อมใส่ลงแม่พิมพ์และเครื่องอัดตามลำดับ

- ผลิตแม่พิมพ์ชิ้นงานสำหรับการขึ้นรูปแบบอัดขนาด 30.5 cm x 30.5 cm โดยแม่พิมพ์จะทำมาจากเหล็กกล้าดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แม่พิมพ์เหล็กขนาด 12.5x12.5 cm

- นำยางพาราที่ขนาดความหนาตามการออกแบบมาซ้อนทับกันโดยจะแทรกด้วยตาข่ายเหล็กหรือวัสดุเสริมแรงชนิดอื่นๆ วางลงในแม่พิมพ์ โดยให้เพิ่มเนื้อเยื่ออีกประมาณ 10% ก่อนนำเข้าแม่พิมพ์
- อุณหภูมิเครื่องอัดให้มีอุณหภูมิใช้งานอยู่ที่ 155-165°C
- ให้เครื่องอัดอัดแผ่นชิ้นงานให้เข้ารูปตามแม่พิมพ์ และทำการวัลคาไนซ์อย่างใดอย่างหนึ่งด้วยความร้อนเพื่อหลอมเหลวชิ้นงานให้เป็นชิ้นเดียวกัน ใช้เวลาอัดเท่ากับ 15 นาที โดยสามารถควบคุมเวลาและอุณหภูมิได้ที่แผงควบคุมด้านข้างเครื่องอัดดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงขณะกำลังอัดชิ้นรูปชิ้นงานตามแม่พิมพ์

- นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และตัดแต่งความเรียบร้อยของชิ้นงาน ซึ่งหากต้องการตัดชิ้นงานให้ทำการตัดในขณะที่ชิ้นงานยังมีความร้อนสะสมอยู่



ซึ่งชิ้นงานที่ขึ้นรูปเสร็จแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.23 โดยชิ้นงานและวัสดุที่ทำการทดสอบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.4, 3.5 และ 3.6 โดยผลของการทดสอบตารางที่ 3.4 จะนำผลที่ได้ไปเปรียบค่าพลังงานจลน์ที่ใช้กับการยิงกระสุนปืนจริง และเมื่อนำไปประกอบเป็นชิ้นงานที่สมบูรณ์แล้วแสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.23 ชิ้นงานทดสอบขนาด 30.5 x30.5 cm ที่ขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูป



รูปที่ 3.24 ชิ้นงานทดสอบที่ประกอบแล้วและยึดด้วยสกรูทั้งสี่ด้าน

ตารางที่ 3.4 แสดงชิ้นงานสำหรับการทดสอบการเจาะทะลุและการทดสอบแรงกด

ความหนา (mm.)	ลักษณะโครงสร้าง ขนาด 6 x 6 cm	
	ทดสอบการเจาะทะลุ (ยางเสริมแรงด้วยตาข่ายเหล็ก)	ทดสอบแรงกด (ยางเสริมแรงด้วยตาข่ายเหล็ก)
12	R	R
	R/S/R	R/S/R
	R/S/S/R	R/S/S/R
	R/S/S/S/R	R/S/S/S/R
	R/S/S/S/S/R	R/S/S/S/S/R
	R/S/S/S/S/S/R	R/S/S/S/S/S/R
จำนวน	6 ชิ้น	6 ชิ้น

หมายเหตุ R: Rubber, S: Steel net

ผลการทดสอบของวัสดุตารางที่ 3.5 จะสามารถพิสูจน์ได้ว่าวัสดุแต่ละประเภทแต่ละชนิดสามารถรับแรงได้แตกต่างกัน โดยนำค่าพลังงานที่ได้นำไปเลือกความหนาของวัสดุใช้งานในการป้องกันกระสุน และเปรียบเทียบน้ำหนักของผนังกันกระสุนที่ความหนาที่สามารถป้องกันได้

ตารางที่ 3.5 แสดงชิ้นงานแผ่นประกบหน้าสำหรับการทดสอบด้วยกระสุนจริง

ความหนา แผ่นประกบหน้า	แผ่นอะลูมิเนียม 5083	แผ่นเหล็กกล้า SS400
6 mm	1 แผ่น	1 แผ่น
8 mm	1 แผ่น	1 แผ่น
10 mm	1 แผ่น	1 แผ่น
12 mm	1 แผ่น	1 แผ่น
<b>รวม</b>	<b>4 แผ่น</b>	<b>4 แผ่น</b>

ผลการทดสอบของวัสดุตารางที่ 3.6 โดยค่าพลังงานที่ได้จากการยิงทดสอบของกลุ่มที่ 1 จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าพลังงานที่ได้จากพื้นที่ได้กราฟของวัสดุทดสอบจากตารางที่ 3.3 เพื่อพิสูจน์ค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ทดสอบ และกลุ่มที่ 2 ถึงกลุ่มที่ 5 จะพิจารณาความหนาของวัสดุที่นำมาเป็นผนังทดสอบเพื่อนำไปวิเคราะห์ โดยจะสามารถตอบสมมุติฐานที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรความหนาได้ โดยจะสามารถคำนวณความหนาที่สามารถป้องกันกระสุนได้ ซึ่งจะนำความหนาทั้งหมดไปเปรียบเทียบกับน้ำหนัก ค่าใช้จ่ายต่อแผ่น เป็นต้น

ในทำนองเดียวกับตารางที่ 3.7 โดยกลุ่มที่ 6 ถึงกลุ่มที่ 9 โดยจะนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ 2 ถึงกลุ่มที่ 5 โดยกำหนดให้มีความหนาคงที่ของยางพาราผสมที่ 12 mm พร้อมทั้งเปรียบเทียบพลังงานจากกระสุนปืนที่สามารถดูดซับไว้ได้ และตารางที่ 3.8, และตารางที่ 3.9 จะเป็นการเปรียบเทียบการเรียงตำแหน่งของแผ่นโลหะ ซึ่งจะนำแผ่นโลหะไปประกบด้านหลังวัสดุผสม

ตารางที่ 3.6 แสดงชิ้นงานสำหรับการทดสอบยิงด้วยกระสุนจริง

วัสดุเสริมแรง	ความหนา ยาง (mm)	ลักษณะโครงสร้าง 30.5 x 30.5 cm	
		ประเภทที่ 1 แผ่นประกบอะลูมิเนียม (ยางเสริมแรงด้วยตาข่ายเหล็ก)	
กลุ่มที่1 ไม่มีวัสดุ ปิดหน้า	12	R	-
		R/S/R	-
		R/S/S/R	-
		R/S/S/S/R	-
		R/S/S/S/S/R	-
		R/S/S/S/S/S/R	(R/S/S/S/S/S/R) x2 (R/S/S/S/S/S/R) x3
จำนวน		6 ชิ้น	5 ชิ้น
กลุ่มที่ 2 แผ่น อะลูมิเนียมหนา 6 mm	12	A/R/S/S/S/S/R	A(R/S/S/S/S/S/R) x2 A(R/S/S/S/S/S/R) x3
จำนวน		1 ชิ้น	5 ชิ้น
กลุ่มที่ 3 แผ่น อะลูมิเนียมหนา 8 mm	12	A/R/S/S/S/S/R	A(R/S/S/S/S/S/R) x2 A(R/S/S/S/S/S/R) x3
จำนวน		1 ชิ้น	5 ชิ้น
กลุ่มที่ 4 แผ่น อะลูมิเนียมหนา 10 mm	12	A/R/S/S/S/S/R	A(R/S/S/S/S/S/R) x2 A(R/S/S/S/S/S/R) x3
จำนวน		1 ชิ้น	5 ชิ้น
กลุ่มที่ 5 แผ่น อะลูมิเนียมหนา 12 mm	12	A/R/S/S/S/S/R	A(R/S/S/S/S/S/R) x2 A(R/S/S/S/S/S/R) x3
จำนวน		1 ชิ้น	5 ชิ้น
<b>รวมทั้งสิ้น</b>		<b>10 ชิ้น</b>	<b>25 ชิ้น</b>

หมายเหตุ R: Rubber, S: Steel net, A:Aluminium

ตารางที่ 3.7 แสดงชิ้นงานสำหรับการทดสอบยิงด้วยกระสุนจริง

วัสดุเสริมแรง	ความหนา (mm)	ลักษณะโครงสร้าง 30.5 x 30.5 cm
		ประเภทที่ 2 แผ่นประกบเหล็กกล้า (ยางเสริมแรงด้วยตาข่ายเหล็ก)
กลุ่มที่ 6 แผ่น เหล็กกล้า 6 mm	12	(6)M(R/S/S/S/S/R)
จำนวน		1 ชิ้น
กลุ่มที่ 7 แผ่น เหล็กกล้า 8 mm	12	(8)M(R/S/S/S/S/R)
จำนวน		1 ชิ้น
กลุ่มที่ 8 แผ่น เหล็กกล้า 10 mm	12	(10)M(R/S/S/S/S/R)
จำนวน		1 ชิ้น
กลุ่มที่ 9 แผ่น เหล็กกล้า 12 mm	12	(12)M(R/S/S/S/S/R)
จำนวน		1 ชิ้น
รวมทั้งสิ้น		3 ชิ้น

หมายเหตุ R: Rubber S: Steel net M : Steel Plate

ตารางที่ 3.8 แสดงชิ้นงานสำหรับการทดสอบแผ่นอะลูมิเนียมประกบหลังยิงด้วยกระสุนจริง

วัสดุเสริมแรง	ความหนา (mm)	ลักษณะโครงสร้าง 30.5 x 30.5 cm
		ประเภทที่ 3 แผ่นประกบหลังอะลูมิเนียม (ยางเสริมแรงด้วยตาข่ายเหล็ก)
กลุ่มที่ 10 แผ่น อะลูมิเนียม 6 mm	12	(R/S/S/S/S/R) x2/A (R/S/S/S/S/R) x3/A (R/S/S/S/S/R) x4/A
จำนวน		9 ชิ้น
กลุ่มที่ 11 แผ่น อะลูมิเนียม 8 mm	12	(R/S/S/S/S/R) x2/A (R/S/S/S/S/R) x3/A
จำนวน		5 ชิ้น
กลุ่มที่ 12 แผ่น อะลูมิเนียม 10 mm	12	(R/S/S/S/S/R) x2/A (R/S/S/S/S/R) x3/A
จำนวน		5 ชิ้น
กลุ่มที่ 13 แผ่น อะลูมิเนียม 12 mm	12	(R/S/S/S/S/R)A (R/S/S/S/S/R) x2/A
จำนวน		3 ชิ้น
รวมทั้งสิ้น		22 ชิ้น

หมายเหตุ R: Rubber S: Steel net M : Steel Plate

ตารางที่ 3.9 แสดงชิ้นงานสำหรับการทดสอบแผ่นเหล็กกล้าประกบหลังยิงด้วยกระสุนจริง

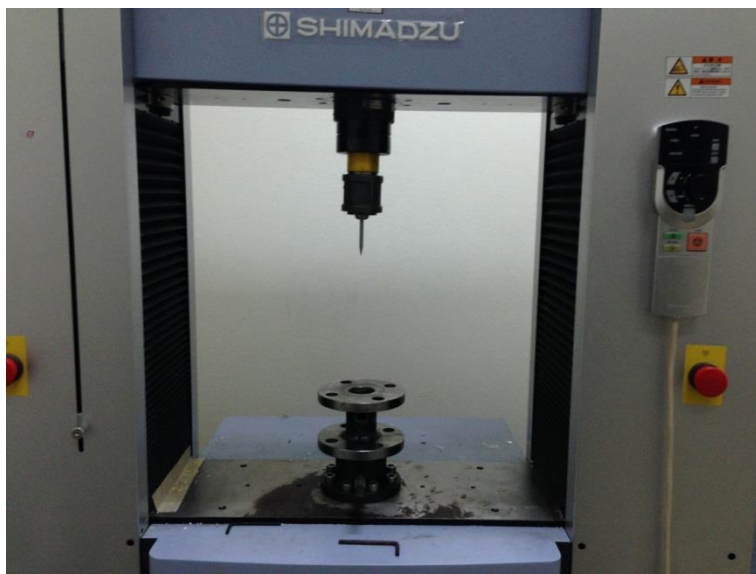
วัสดุเสริมแรง	ความหนา (mm)	ลักษณะโครงสร้าง 30.5 x 30.5 cm
		ประเภทที่ 3 แผ่นประกบหลังเหล็กกล้า (ยางเสริมแรงด้วยตาข่ายเหล็ก)
กลุ่มที่ 14 แผ่น เหล็กกล้า 6 mm	12	(R/S/S/S/S/R) x2/(6)M (R/S/S/S/S/R) x3/(6)M
จำนวน		5 ชิ้น
กลุ่มที่ 15 แผ่น เหล็กกล้า 8 mm	12	(R/S/S/S/S/R) x2/(8)M (R/S/S/S/S/R) x3/(8)M
จำนวน		5 ชิ้น
กลุ่มที่ 12 แผ่น เหล็กกล้า 10 mm	12	(R/S/S/S/S/R) x2/(10)M (R/S/S/S/S/R) x3/(10)M
จำนวน		5 ชิ้น
<b>รวมทั้งสิ้น</b>		<b>15 ชิ้น</b>

หมายเหตุ R: Rubber S: Steel net M : Steel Plate

### 3.4 วิธีดำเนินการทดสอบ

#### 3.4.1 การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุผสมโดยการเจาะทะลุ

##### 3.4.1.1 ติดตั้งหัวเจาะและแป้นยึดจับชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ UTM ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการเจาะทะลุบนเครื่องทดสอบแรง

##### 3.4.1.2 บันทึกพารามิเตอร์ที่จำเป็นลงในโปรแกรมของเครื่องทดสอบ โดยใส่ขนาดชิ้นงาน ความเร็วในการเจาะ รูปทรง และค่าความปลอดภัย เป็นต้น

##### 3.4.1.3 เริ่มกดชิ้นงานจนชิ้นงานทะลุ

##### 3.4.1.4 สังเกตและบันทึกความเสียหาย พร้อมทั้งนำผลที่ได้มาวาดกราฟ Load-Displacement curve เพื่อหาค่าพื้นที่ใต้กราฟซึ่งจะค่าพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุของชิ้นงาน

##### 3.4.1.5 ทำการทดสอบชิ้นงานจนครบตัวอย่าง

##### 3.4.1.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

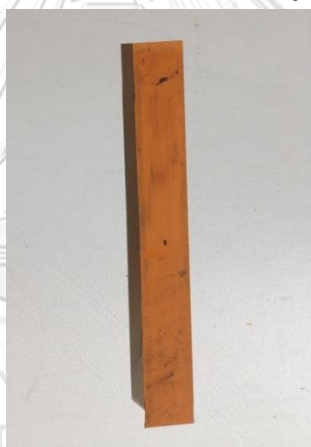
### 3.4.2 การทดสอบแรงดึงของวัสดุผสม

#### 3.4.2.1 ติดตั้งเครื่องทดสอบแรงดึงดังรูปที่ 3.26 สำหรับทดสอบการดึงชิ้นงาน



รูปที่ 3.26 เครื่องทดสอบแรงดึง

#### 3.4.2.2 ตัดชิ้นงานตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 3039 [20] โดยตัดชิ้นงานที่ขนาดความกว้าง 15 mm ยาว 175 mm และมีความหนา 12 mm ดังรูปที่ 3.27 จำนวน 5 ชิ้น



รูปที่ 3.27 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง

#### 3.4.2.3 บันทึกพารามิเตอร์ที่จำเป็นลงในโปรแกรมของเครื่องทดสอบ โดยใส่ขนาดชิ้นงาน ความเร็วที่ใช้ในการกด รูปทรง และค่าความปลอดภัย เป็นต้น

#### 3.4.2.4 เริ่มดึงชิ้นงานจนชิ้นงานเสียรูป

#### 3.4.2.4 สังเกตและบันทึกความเสียหาย พร้อมทั้งนำผลที่ได้มาวาดกราฟ Load-Displacement curve เพื่อหาค่าพื้นที่ใต้กราฟซึ่งจะค่าพลังงานที่ใช้ในการดึง

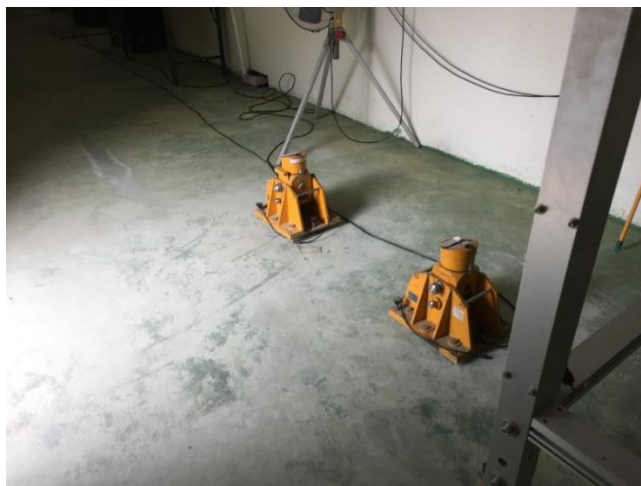
#### 3.4.2.5 ทำการทดสอบชิ้นงานจนครบตัวอย่าง

#### 3.4.2.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ



### 3.4.3 การทดสอบการดูดซับพลังงานของหัวกระสุนปืน

3.4.3.1 ติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบตามมาตรฐาน NIJ โดยให้เครื่องวัดความเร็วกระสุนปืนด้านหน้าโดยมีระยะห่างจากปากกระบอกปืน 3 m โดยประมาณซึ่งอยู่ห่างจากชิ้นงาน 15 m ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 การติดตั้งเครื่องวัดชิ้นงานด้านหน้า

3.4.3.2 ติดตั้งแท่นวางชิ้นงานพร้อมทั้งยึดชิ้นงานให้แน่น ดังรูป 3.29



รูปที่ 3.29 ติดตั้งชิ้นงานที่แท่นทดสอบตามมาตรฐาน

3.4.3.3 ติดตั้งเครื่องวัดความเร็วกระสุนด้านหลัง (ถ้ามี) ชิ้นงาน ให้ห่างจากชิ้นงานเป็นระยะ 15 cm

3.4.3.4 ยิงกระสุนปืน M16 ทดสอบโดยไม่มีชิ้นงาน 1 นัด เพื่อทดสอบเครื่องวัดความเร็วกระสุน

3.4.3.5 ติดตั้งชิ้นงานที่ตำแหน่งจริงและยิงกระสุนจริง

- 3.4.3.6 หลังจากยิงนัดแรกให้ตรวจสอบความเสียหาย และบันทึกความเสียหายและบันทึกค่าความเร็ว ก่อนที่จะทำการยิงนัดต่อไป
- 3.4.3.7 ทำการยิงทดสอบจนครบชิ้นงานทดสอบ
- 3.4.3.8 บันทึกผลและวิเคราะห์ผลการทดสอบ



## บทที่ 4

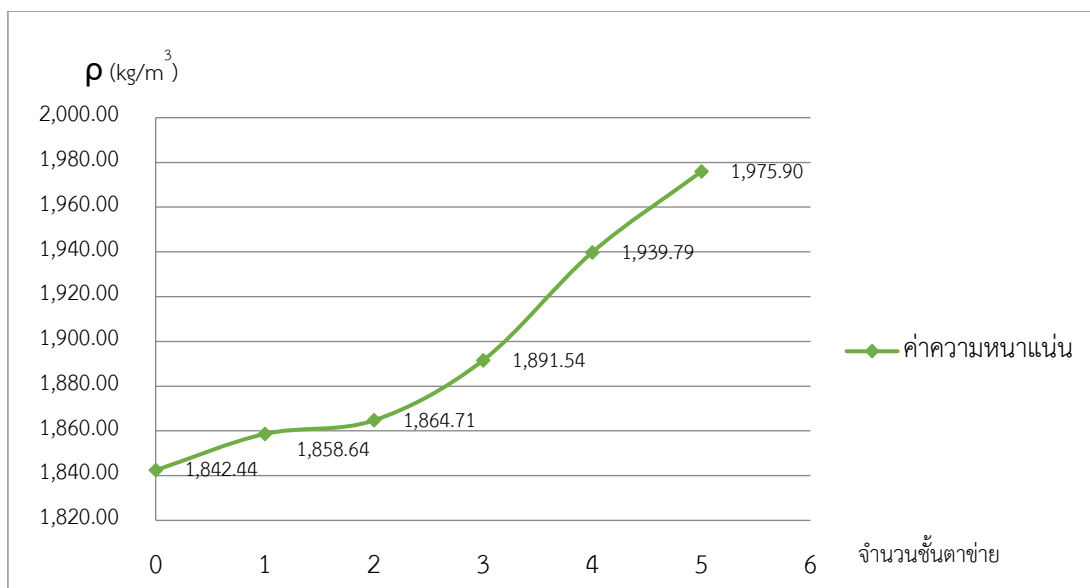
### ผลการวิจัย

#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน

นำชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากการอัดขึ้นรูปมาหาค่าเฉลี่ย ปริมาตร โดยในแต่ละชิ้นงานจะวัดค่าสามครั้งแล้วนำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย โดยค่าเฉลี่ยของชิ้นงานแสดงดังตารางที่ 4.1 สำหรับชิ้นงาน  $30.5 \times 30.5$  cm โดยมีความหนาชิ้นงานเท่ากับ 12 mm การเพิ่มเส้นลวดตาข่ายเหล็กจะส่งผลโดยตรงกับค่าความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุผสม ซึ่งค่าความหนาแน่นสำหรับชิ้นงานที่เสริมด้วยเส้นใยตาข่ายเหล็กจะอยู่ที่  $1,975.9 \text{ Kg/m}^3$  โดยคิดเป็นอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น 6.7% เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมลวดตาข่ายเหล็ก ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานวัสดุผสมจากยางพาราขนาด  $30.5 \times 30.5$  cm ที่ขนาดความหนา 12 mm (ค่าเฉลี่ย)

จำนวน ชั้น	จำนวน ชั้นลวด	น้ำหนักลวดตา	น้ำหนักชิ้นงาน	ปริมาตร ชิ้นงานรวม	ความหนาแน่น $\rho$
		ข่ายเฉลี่ย	รวมเฉลี่ย		
		(g)	(kg)	( $\text{m}^3$ )	( $\text{kg/m}^3$ )
1	0	-	1.989	0.001080	1,842.4
2	1	1.00	2.007	0.001080	1,858.6
3	2	1.67	2.014	0.001080	1,864.7
4	3	2.33	2.043	0.001080	1,891.5
5	4	3.00	2.094	0.001080	1,939.7
6	5	3.67	2.134	0.001080	1,975.9

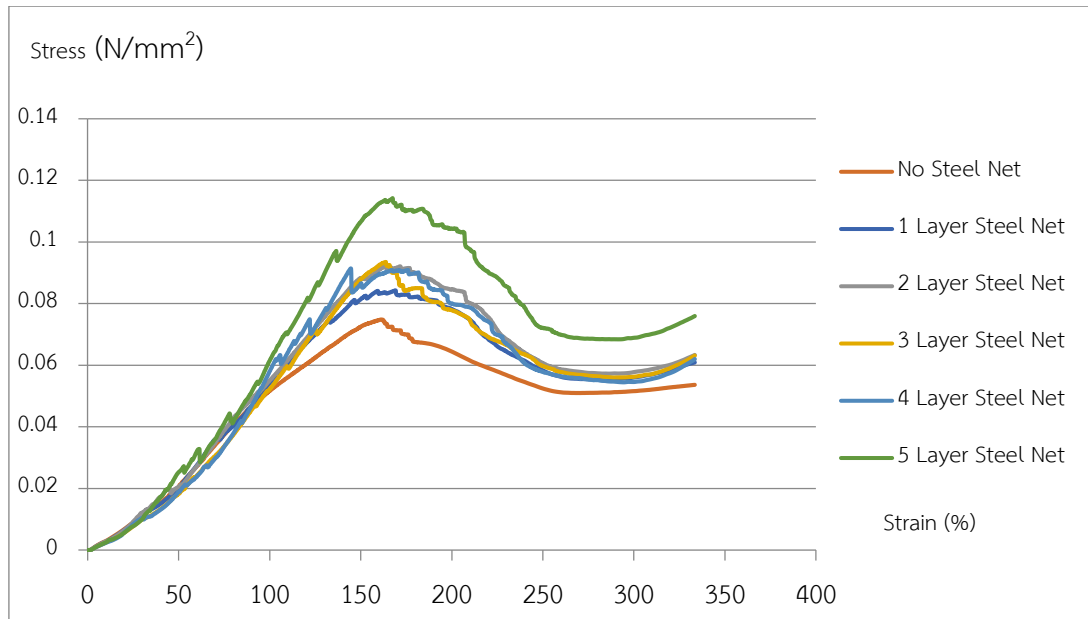


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุผสมที่ขนาดความหนา 12 mm ต่อการเพิ่มจำนวนชั้นลวดตาข่ายเหล็ก

## 4.2 ผลการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ

### 4.2.1 ผลของการเพิ่มจำนวนชั้นของลวดตาข่ายเหล็ก

จากการเพิ่มจำนวนชั้นลวดตาข่ายเหล็กที่จำนวน 5 ชั้น แล้วนำไปทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุในห้องทดลอง ซึ่งการเพิ่มจำนวนชั้นลวดสามารถทำให้วัสดุผสมมีความแข็งแรงขึ้นและสามารถรับพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุได้มากขึ้น ดังรูปที่ 4.2 โดยพลังงานของวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น มีพลังงานเท่ากับ 9.71 J ดังแสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็กเท่ากับ 6.98 J โดยคิดเป็นอัตราส่วนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 139 % โดยสามารถรับแรงกระทำได้สูงสุดเท่ากับ 410 J และมีค่า Maximum Stress เท่ากับ 0.16 N/mm<sup>2</sup> เมื่อหัวเข็มเจาะทะลุชิ้นงานจะสังเกตได้จากกราฟซึ่งเป็นจุดที่ค่าความเค้นคงที่ ซึ่งจากการทดสอบนี้สามารถทำให้ทราบว่า ถ้าเสริมด้วยลวดตาข่ายจำนวน 5 ชั้น จะช่วยในการดูดซับพลังงานจากกระสุนปืนได้ โดยอัตราส่วนของเนื้อพื้นและเส้นใยคิดเป็น 2.4 mm/Layer โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ของชิ้นงานแต่ละชั้นแสดงในภาคผนวก ง.



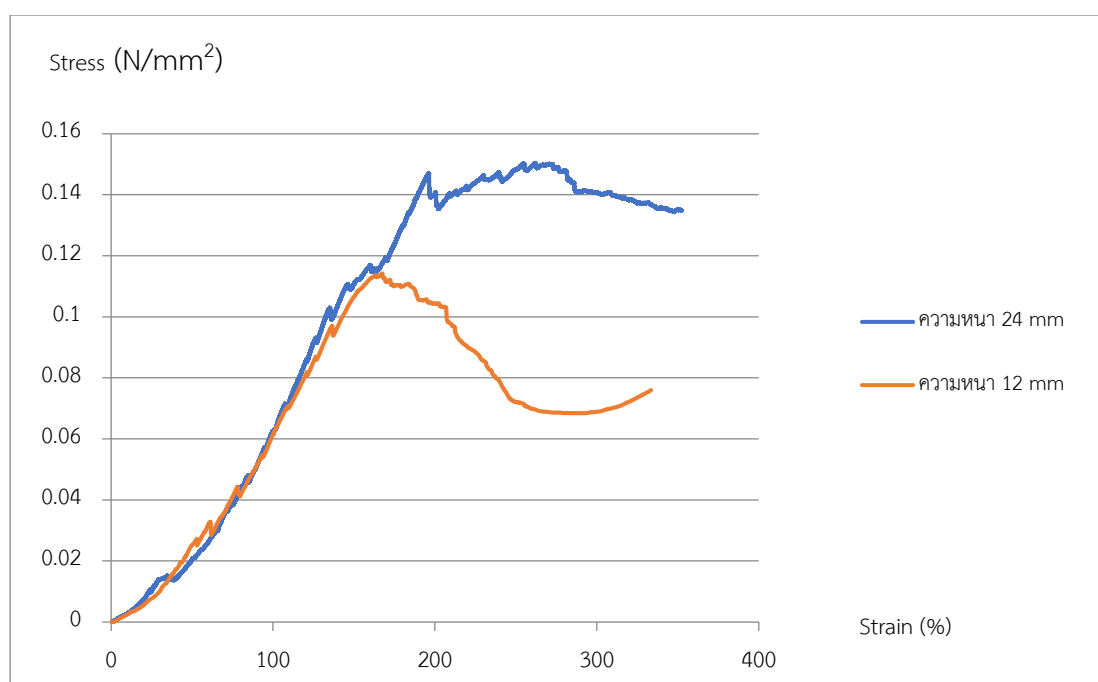
รูปที่ 4.2 กราฟความเค้น-ความเครียด แสดงการเปรียบเทียบพฤติกรรมทางกลของชิ้นงานที่เสริมลวดต่างกันสำหรับการต้านทานการเจาะทะลุ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุชิ้นงานที่ขนาดความหนา 12 mm

จำนวนชั้น	ความหนาแต่ละชั้นของยาง (cm)	จำนวนชั้นของลวด (ชั้น)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	พลังงาน (พื้นที่ใต้กราฟ) (J)	พื้นที่หัวเจาะ (m <sup>2</sup> )
1	0.7	ไม่มีลวด	1,842.44	6.98	7.66×10 <sup>-5</sup>
2	0.7	1	1,858.64	7.77	
3	0.5	2	1,864.71	8.20	
4	0.5	3	1,891.54	7.85	
5	0.4	4	1,939.79	7.97	
6	0.3	5	1,975.90	9.71	

#### 4.2.2 ผลของการเพิ่มความหนาวัสดุผสม

เมื่อเพิ่มความหนาชิ้นงาน พลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุมีค่าเพิ่มขึ้น โดยขนาดความหนา 24 mm ใช้พลังงานเท่ากับ 11.4 J เมื่อเปรียบเทียบกับความหนา 12 mm เท่ากับ 9.7 J ซึ่งจะเห็นว่าพลังงานจะไม่เพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า โดยพลังงานที่เพิ่มขึ้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 17% ต่อการเพิ่มความหนา 12 mm ดังรูปที่ 4.3



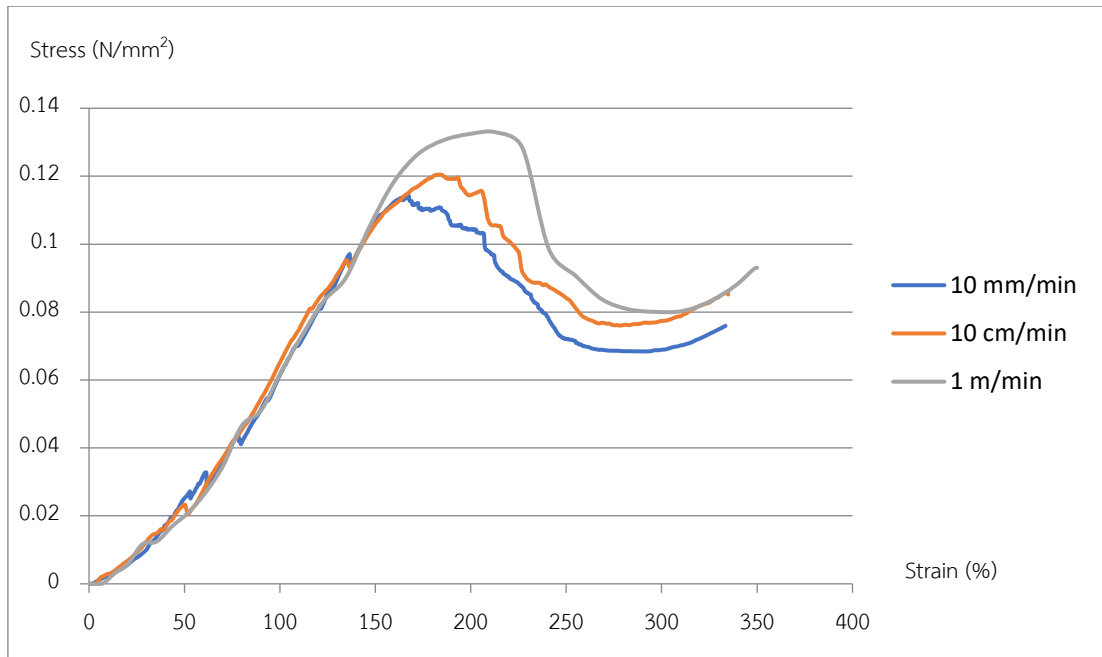
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าพลังงานเมื่อเพิ่มความหนาของชิ้นงานเป็นสองเท่า โดยเสริมด้วยเส้นใยลวด

ตาข่ายเหล็กจำนวน 5 ชั้น

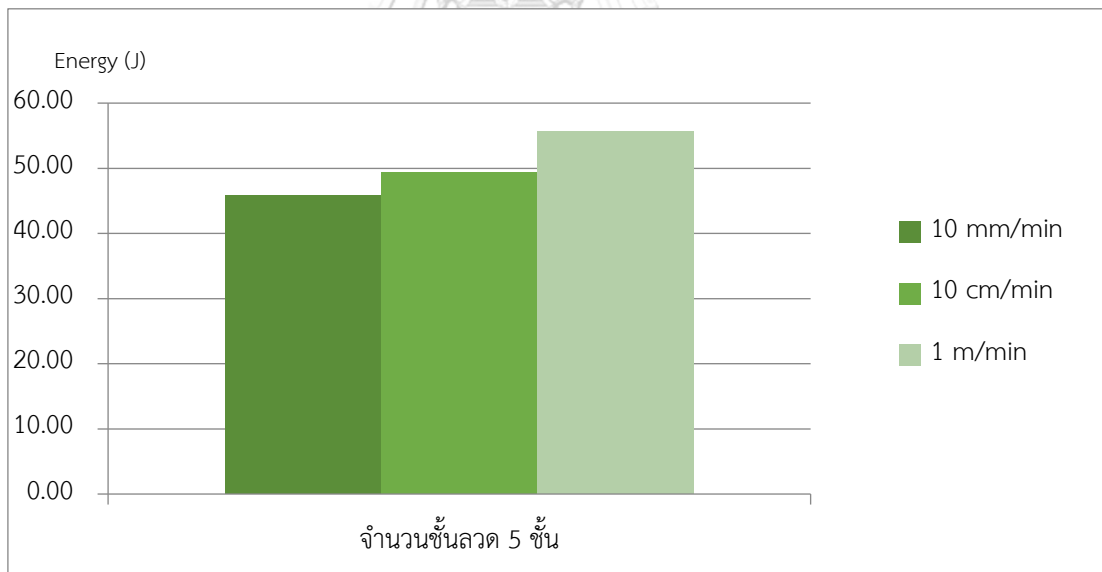
CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 4.2.3 ผลของความเร็ววัตถุกระทบ

นอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่นที่เข้ามาเกี่ยวข้องในการเจาะทะลุชิ้นงาน ซึ่งจากรูปที่ 4.4 จะพบว่าที่ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบต่างกัน ค่าพลังงานก็จะแตกต่างกัน โดยค่าพลังงานจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วที่ใช้ในการทดสอบการเจาะทะลุเพิ่มขึ้น จากการทดสอบในห้องทดสอบใช้ความเร็วที่ระดับ 10 mm/min, 10cm/m และ 1 m/min พบว่าที่ความเร็ว 1 m/min ให้ค่าพลังงานและแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุสูงสุดคือ 11.8 J และ 478 N ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งเมื่อนำค่าพลังงานไปเปรียบเทียบกับกระสุนจริง โดยค่าพลังงานที่ได้จากการยิงมีค่าเท่ากับ 2,248.0 J ดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.4 กราฟความเค้น-ความเครียด แสดงการเปรียบเทียบชิ้นงานวัสดุผสมที่เสริมลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้นที่ระดับความเร็วต่างกัน



รูปที่ 4.5 ค่าพลังงานจลน์ที่ต่างกันในแต่ละระดับความเร็วที่ใช้ทดสอบของวัสดุผสมที่เสริมลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น

ตารางที่ 4.3 แสดงความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วที่ต่างกัน

ลำดับ	จำนวน ชั้นของ ยาง	จำนวน ชั้นลวด	ความเร็วหัว เจาะ	พลังงาน (พื้นที่ได้กราฟ) (J)	ความเร็วกระสุน		พลังงาน ที่ใช้กับ วัสดุ
					ก่อน (เฉลี่ย)	หลัง (เฉลี่ย)	
1	6	5	10 mm/min	9.71	965.1	285.8	2,248.0
2			10 cm/min	10.48			
3			1 m/min	11.80			

## 4.2.4 พลังงานการแตกหัก

จากการทดสอบการเจาะทะลุโดยใช้หัวเจาะที่พัฒนาขึ้น สามารถคำนวณค่าพลังงานการแตกหักจากสมการที่ 2.11 โดยค่าพลังงานของวัสดุผสมที่เสริมด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้นเท่ากับ 126,679.34 J/m<sup>2</sup> แสดงดังตารางที่ 4.4 โดยรายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง. เมื่อทราบค่าพลังงานการแตกหัก สามารถนำไปวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจะได้สมการพอลิโนเมียลกำลังสองเท่ากับ  $Y = -2 \times 10^{-6} X + 0.0242 X + 14.759$  โดย Y คือความหนาที่ต้องการคำนวณ และ X คือค่าพลังงานจลน์ ซึ่งเมื่อแทนค่าพลังงานจลน์ลงในสมการพอลิโนเมียล จะสามารถทำนายความหนาที่สามารถหยุดกระสุนไว้ได้ แสดงดังตารางที่ 4.5 มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ  $\pm 25\%$  ซึ่งสาเหตุความคลาดเคลื่อนอาจจะมาจากการที่หัวเจาะไม่มีการเสีรูปขณะทำการเจาะ ซึ่งแตกต่างจากกระสุนจริงที่มีการเสีรูปเป็นรูปครึ่งวงกลม จึงส่งผลให้ความหนาชิ้นงานที่คำนวณจากสมการมีความคลาดเคลื่อน รายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก จ.

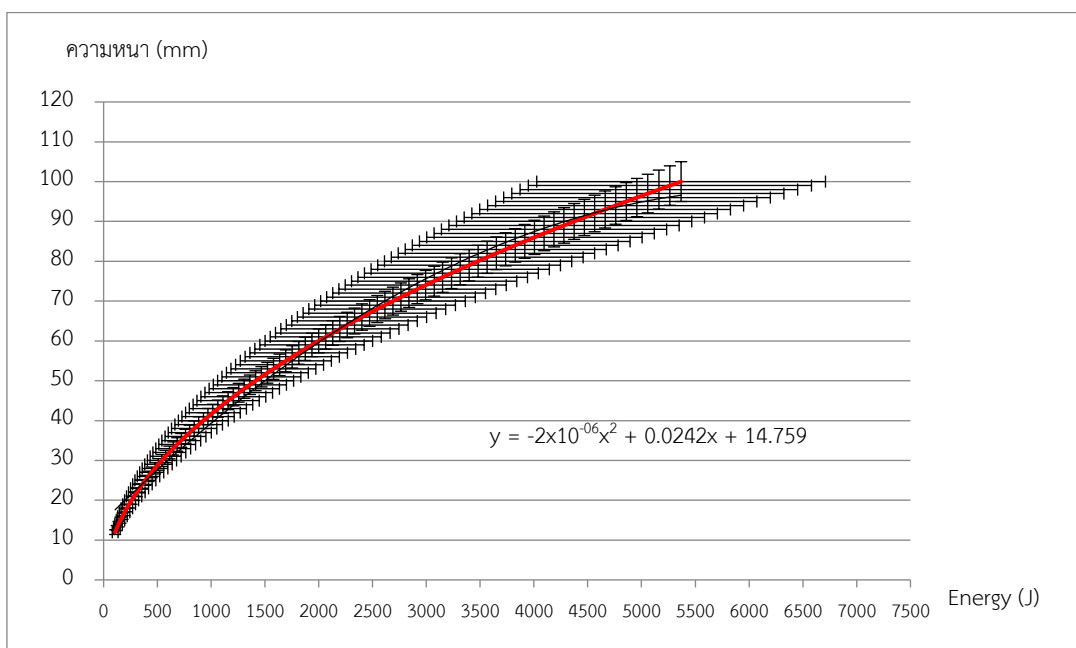
ตารางที่ 4.4 แสดงพลังงานการแตกหักจากการทดสอบเจาะทะลุชิ้นงานเสริมลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น

ความหนา ชิ้นงาน (mm)	จำนวนชั้นลวด ช่องขนาด	ค่าพลังงาน (พื้นที่ได้กราฟ) (J)	พื้นที่หัวเจาะ (m <sup>2</sup> )	ค่าพลังงานการ แตกหัก (J/m <sup>2</sup> )
12	5	9.71	$7.66 \times 10^{-5}$	126,679.34
24	5	11.4	$7.66 \times 10^{-5}$	148,825.06



ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนจากสมการที่ได้จากการทดลอง

ความหนาจากการคำนวณ (mm)	ความหนาจริง (mm)	ความคลาดเคลื่อน (%)
14.99	12	24.95
61.32	72	-14.83



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์และความหนาจากการแตกหัก โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน +25%

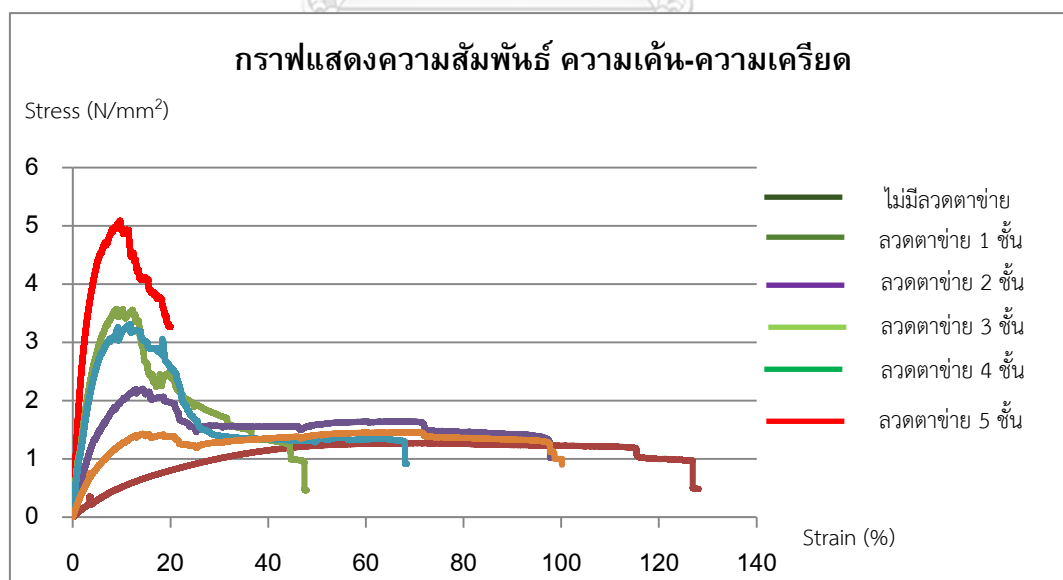
#### 4.3 ความต้านทานแรงดึง

ตัดชิ้นงานที่มีขนาดความกว้าง 15 mm ยาว 25 mm และหนา 12 mm จำนวน 6 ตัวอย่าง อย่างละ 5 ชิ้นนำไปทดสอบการดึง โดยใช้เครื่องทดสอบ UTM ในการยึดจับชิ้นงานเพื่อหาสมบัติทางกล โดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM D3039 ซึ่งการทดสอบจะเป็นการดึงจนชิ้นงานเกิดการเสียรูป โดยลักษณะชิ้นงานที่เสียหายจะเป็นการเสียหายแบบ เนื้อพื้นแยกตัวออกจากวัสดุเสริมแรง หรือ Pull-Out โดยมีเนื้อพื้นของวัสดุผสมเสียหายออกจากกัน หลังจากนั้นเส้นลวดตาข่ายเหล็กขาด ขณะที่ชิ้นงานถูกดึง เส้นลวดตาข่ายเหล็กจะหลุดออกจากเนื้อพื้น และจะสังเกตเห็นรอยวัสดุเสริมแรงเดิมที่พื้นผิวหน้าตัดของวัสดุเนื้อพื้น ซึ่งจากการดึงดังกล่าวสามารถคำนวณค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงเท่ากับ 63.13 J ที่ชิ้นงานไม่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก และ 10.91 J ที่ชิ้นงานเสริมแรงด้วยลวดตาข่าย

เหล็ก 5 ชั้น ซึ่งเป็นพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทำให้ชิ้นงานเสียหาย จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ดังรูปที่ 4.7 สามารถนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกลของชิ้นงานวัสดุผสมดังตารางที่ 4.6 โดยค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus: GPa) ของชิ้นงานวัสดุผสมเท่ากับ 0.001-0.05 GPa ซึ่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่ามอดูลัสของยัง ของยางพาราธรรมชาติที่มีค่าประมาณ 0.01-0.03 GPa [35] แสดงรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก จ.

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบความต้านทานแรงดึง

Ultimate Tensile Stress (N/m <sup>2</sup> )	Energy (J)	Yield Strength 0.2% (N/m <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Young's Modulus (GPa)
1,200,066.50	63.13	159,135	113.57	0.001
1,776,480.00	33.15	347,670	18.77	0.009
2,065,897.00	23.29	1,153,340	18.64	0.01
3,566,106.00	14.67	1,955,990	10.87	0.02
3,259,420.50	19.66	785,170	10.67	0.03
5,011,111.11	10.91	588,663	10.00	0.05

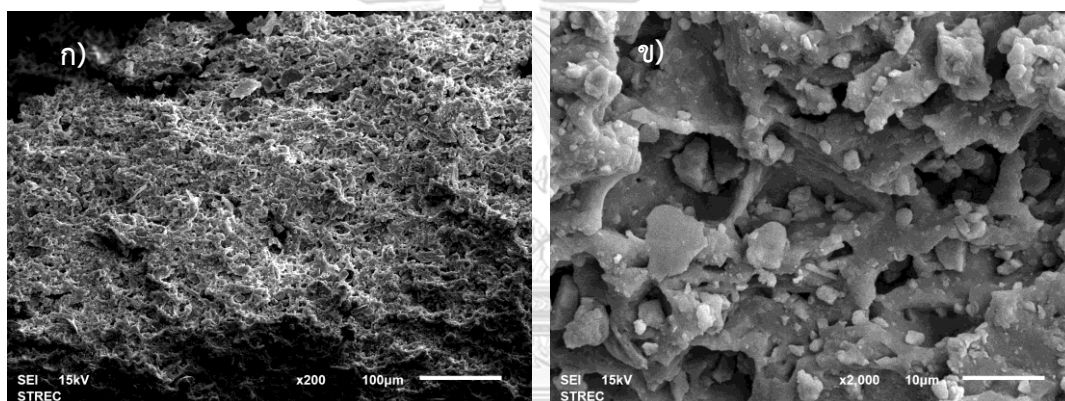


รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของการทดสอบความต้านทานแรงดึง

ตัดชิ้นงานในส่วนที่เสียหายจากการดิ่ง นำไปตรวจสอบด้วยเครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) ด้วยกำลังขยาย 200 เท่า และกำลังขยาย 2,000 เท่า เพื่อตรวจสอบลักษณะความเสียหายของหน้าตัดชิ้นงานจากการดิ่งและรอยต่อระหว่างเส้นใยเสริมและเนื้อพื้น

#### 4.3.1 ชิ้นงานไม่เสริมลวดตาข่ายเหล็ก

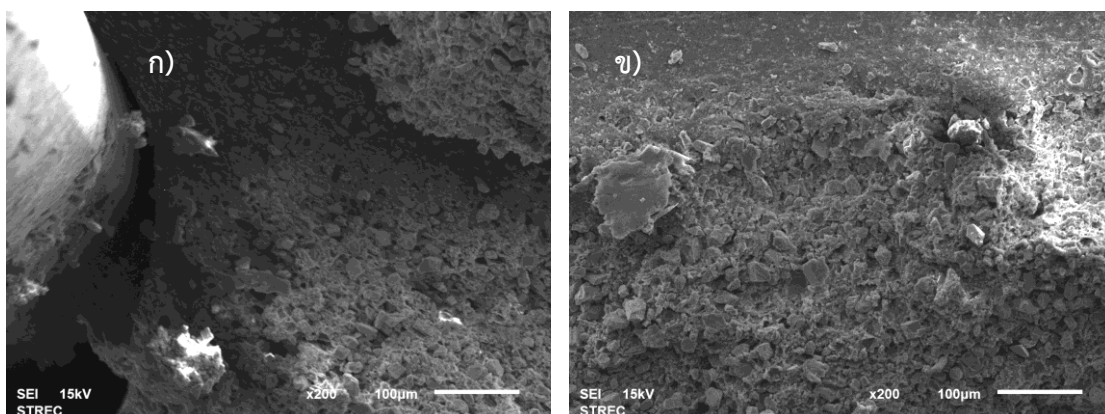
เมื่อนำชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมลวดตาข่ายเหล็กไปตรวจด้วยกล้องที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่าบริเวณรอยฉีกขาดที่เกิดจากการดิ่งจะมีลักษณะความเสียหายแบบเส้นใยไม่เรียบ และมีสีที่เจือจางกว่าบริเวณที่ไม่ได้รับความเสียหายแสดงดังรูปที่ 4.8 ก) เมื่อเพิ่มกำลังขยายในบริเวณที่ใกล้เคียงกันเป็น 2,000 เท่า จะเห็นลักษณะพื้นผิวเป็นร่องขรุขระ และมีเศษของชิ้นงานแตกขาดออกจากกันติดอยู่ตามซอกของร่องผิว โดยเม็ดผงมีขนาดเล็กกว่า  $10\ \mu\text{m}$  ดังรูปที่ 4.8 ข)



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก ก) กำลังขยาย 200 เท่า  
ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า

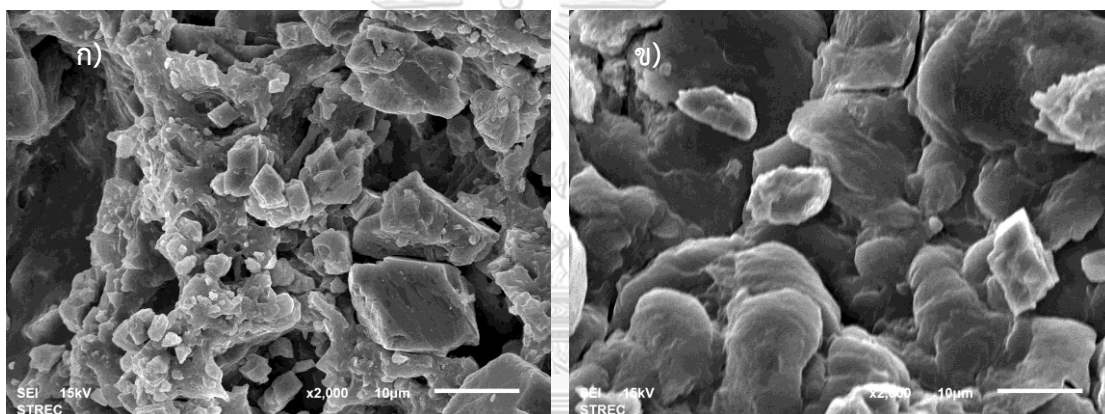
#### 4.3.2 ชิ้นงานเสริมลวดตาข่ายเหล็ก 1 ชั้น

เมื่อนำชิ้นงานที่เสริมด้วยลวดตาข่ายเหล็กหนึ่งชั้น ที่เสียหายจากการดิ่งไปตรวจด้วยกล้องบริเวณพื้นผิวที่เกิดการเสียหาย ในบริเวณรอยต่อระหว่าง ลวดตาข่ายเหล็กและเนื้อพื้นดังรูปที่ 4.9 ก) และ ข). พบว่าเนื้อพื้นบริเวณรอบลวดตาข่ายมีการเสียหายโดยเกิดเป็นรอยแยกรอบๆผิวของลวดตาข่ายเหล็กและเนื้อพื้นชิ้นงานมีลักษณะหยาบไม่เรียบคล้ายคลึงกับชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมด้วยลวดตาข่ายเหล็ก เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 2,000 เท่า จะพบเศษขนาดเล็กอยู่ในซอกของพื้นผิวดังรูปที่ 4.10 ก) และ ข)



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 1 ชั้น กำลังขยาย 200 เท่า

ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป



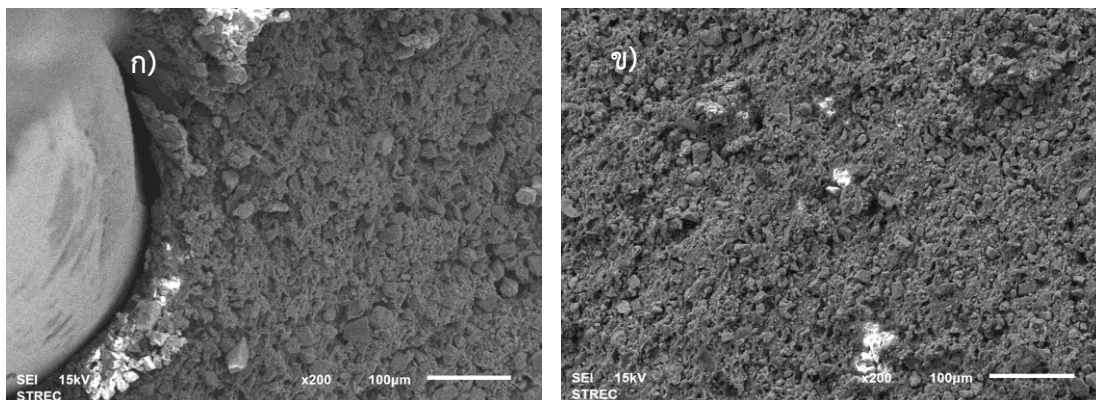
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 1 ชั้น กำลังขยาย 2,000 เท่า

ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป

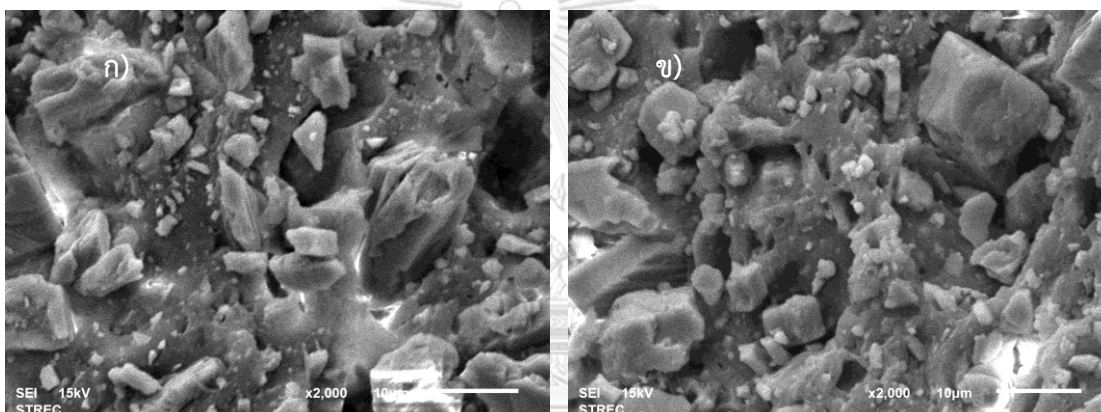
CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 4.3.3 ชิ้นงานเสริมลวดตาข่ายเหล็ก 2 ชั้น

เมื่อนำชิ้นงานที่เสริมด้วยลวดตาข่ายเหล็กสองชั้น ที่เสียหายจากการดึงไปตรวจด้วยกล้องบริเวณพื้นผิวที่เกิดการเสียหาย โดยเฉาะรอยต่อระหว่าง ลวดตาข่ายเหล็กและเนื้อพื้นดังรูปที่ 4.11 ก) และ ข) ซึ่งเป็นบริเวณรอยต่อของสองวัสดุและบริเวณทั่วไป พบว่าเมื่อเพิ่มชั้นลวดตาข่ายเหล็ก ลักษณะความเสียหายของชิ้นงานยังมีลักษณะความเสียหายเช่นเดียวกันกับชิ้นงานที่เสริมด้วยลวดตาข่ายเหล็ก ซึ่งมีลักษณะผิวหยาบไม่เรียบ และรอยต่อระหว่างวัสดุทั้งสองแยกตัวกันออกอย่างชัดเจน



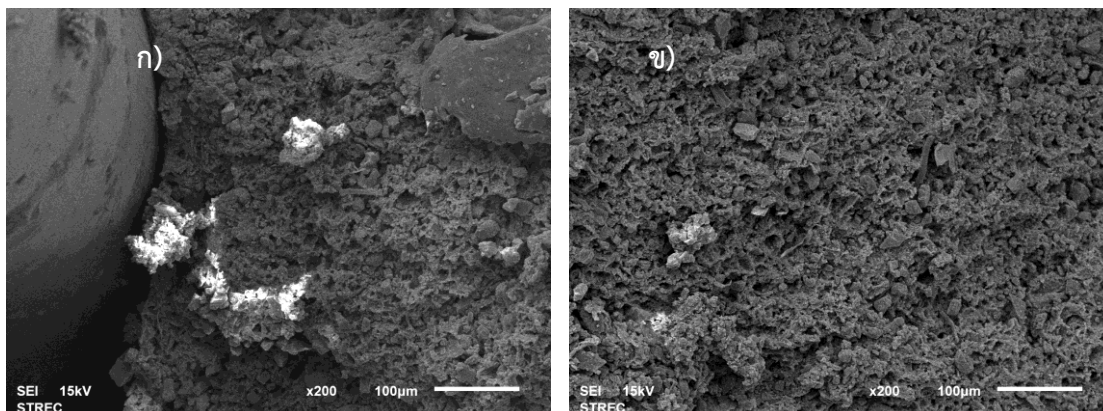
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 2 ชั้น กำลังขยาย 200 เท่า  
ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป



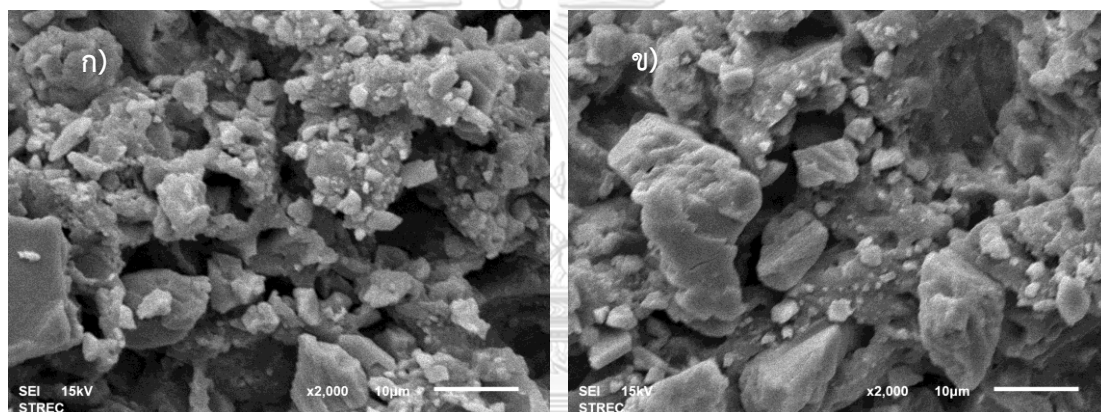
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 2 ชั้น กำลังขยาย 2,000 เท่า  
ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป

#### 4.3.4 ชิ้นงานเสริมลวดตาข่ายเหล็ก 3 ชั้น

เมื่อนำชิ้นงานที่เสริมด้วยลวดตาข่ายเหล็กสามชั้น ที่เสียหายจากการดึงไปตรวจด้วยกล้องบริเวณพื้นผิวที่เกิดการเสียหาย โดยเจาะรอยต่อระหว่าง ลวดตาข่ายเหล็กและเนื้อพื้นดังรูปที่ 4.13 ก) และ ข) ซึ่งเป็นบริเวณรอยต่อของสองวัสดุและบริเวณทั่วไป พบว่าลักษณะความเสียหายคล้ายกับชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็ก และ ชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็กหนึ่งและสองชั้น ที่กำลังขยาย 200 เท่าและ 2,000 เท่า



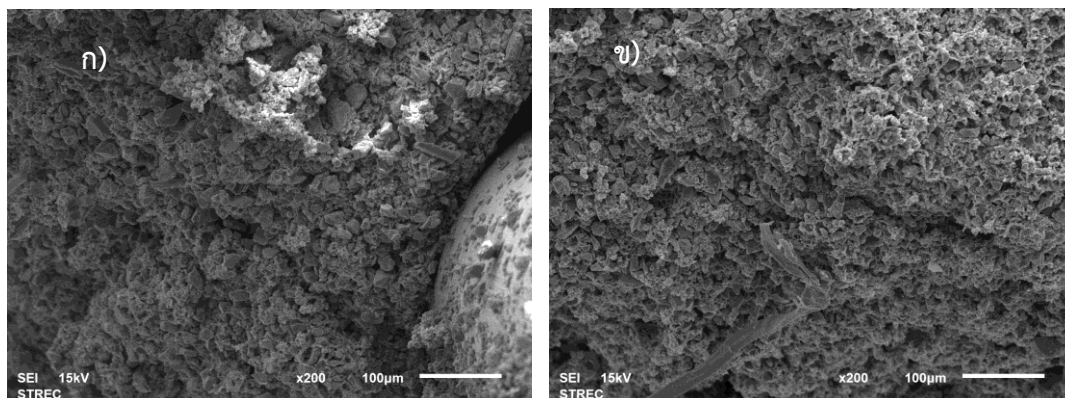
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 3 ชั้น กำลังขยาย 200 เท่า  
ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป



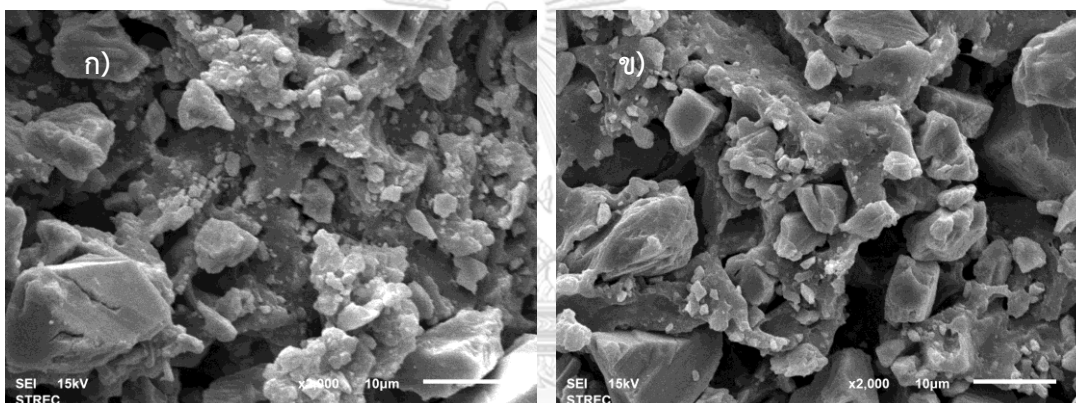
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 3 ชั้น กำลังขยาย 2,000 เท่า  
ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป

#### 4.3.5 ชิ้นงานเสริมลวดตาข่ายเหล็ก 4 ชั้น

เมื่อนำชิ้นงานที่เสริมด้วยลวดตาข่ายเหล็กสี่ชั้น ที่เสียหายจากการดึงไปตรวจด้วยกล้องบริเวณพื้นผิวที่เกิดการเสียหาย โดยเฉพาะรอยต่อระหว่าง ลวดตาข่ายเหล็กและเนื้อพื้นดังรูปที่ 4.15 ก) และ ข) ซึ่งเป็นบริเวณรอยต่อของสองวัสดุและบริเวณทั่วไป พบว่าไม่มีลักษณะความเสียหายอื่นที่ปรากฏอย่างชัดเจนจากการเพิ่มจำนวนชั้นลวดตาข่ายเหล็ก



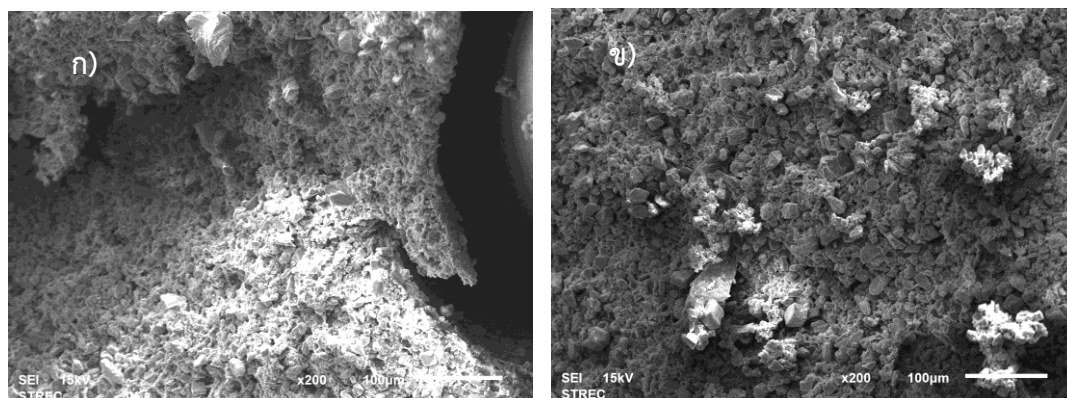
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 4 ชั้น กำลังขยาย 200 เท่า  
ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป



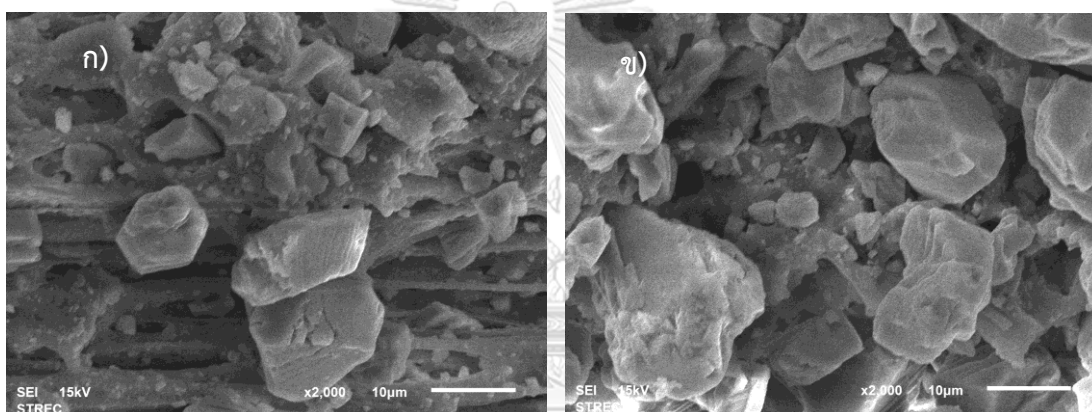
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 4 ชั้น กำลังขยาย 2,000 เท่า  
ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป

#### 4.3.5 ชิ้นงานเสริมลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น

เมื่อนำชิ้นงานที่เสริมด้วยลวดตาข่ายเหล็กห้าชั้น ที่เสียหายจากการดึงไปตรวจด้วยกล้องบริเวณพื้นผิวที่เกิดการเสียหาย โดยเจาะรอยต่อระหว่าง ลวดตาข่ายเหล็กและเนื้อพื้นดังรูปที่ 4.17 ก) และ ข) ซึ่งเป็นบริเวณรอยต่อของสองวัสดุและบริเวณทั่วไป พบว่าการเพิ่มจำนวนลวดตาข่ายห้าชั้น ไม่มีผลต่อความเสียหายของชิ้นงาน ซึ่งลักษณะความเสียหายของชิ้นงานมีลักษณะคล้ายกับชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็ก และชิ้นงานที่เสริมด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็กที่จำนวนชั้นน้อยกว่า



รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น กำลังขยาย 200 เท่า  
ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป



รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น กำลังขยาย 200 เท่า  
ก). บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพื้น ข). บริเวณความเสียหายทั่วไป

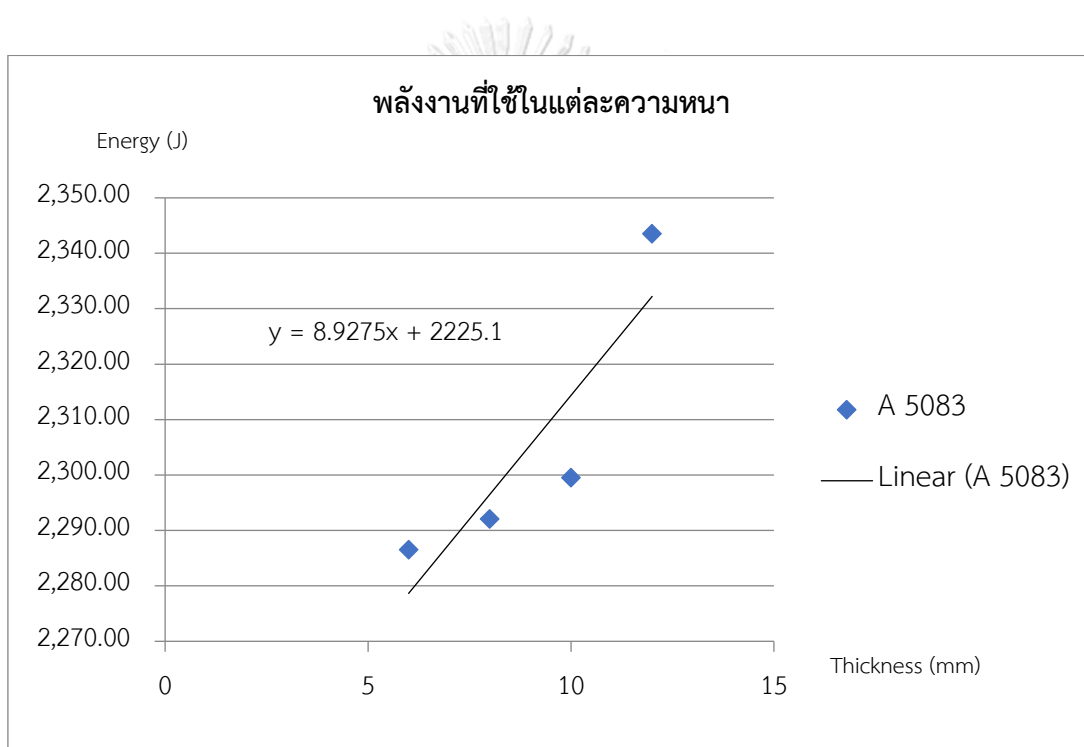
#### 4.4 ผลการทดสอบการดูดซับพลังงานของวัสดุจากการยิงกระสุนปืน

##### 4.4.1 การดูดซับพลังงานจลน์ของแผ่นโลหะ

แผ่นโลหะที่เลือกนำมาใช้โดยคำนึงถึงน้ำหนักเป็นหลัก ซึ่งจากการเปรียบเทียบลักษณะแผ่นอะลูมิเนียม A5083 นั้นมีน้ำหนักที่ค่อนข้างเบา โดยมีความหนาแน่นเท่ากับ  $2,654.39 \text{ kg/m}^3$  และเป็นอะลูมิเนียมเกรดที่มีราคาถูกรวมถึงสามารถหาได้ง่ายในท้องตลาด จึงได้นำมาทดสอบการป้องกันกระสุนในแต่ละความหนา โดยจะนำความหนาที่น้อยที่สุดไปรวมใช้งานกับวัสดุผสม ซึ่งจากการทดสอบแผ่นอะลูมิเนียม ที่ความหนา 6 mm, 8 mm, 10 mm และ 12 mm ในการยิงทดสอบพบว่าทุกขนาดความหนา ไม่สามารถป้องกันกระสุนได้ ซึ่งพลังงานที่ดูดซับไว้ได้จะขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นอะลูมิเนียม ยิ่งความหนามากโอกาสที่กระสุนจะไม่ทะลุนั้นมีมากขึ้น แต่ก็ต้องคำนึงถึงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน แสดงในตารางที่ 4.7 และ 4.8 จากข้อมูลในตารางสามารถนำมาวิเคราะห์โมเดลของ



แผ่นอะลูมิเนียมระหว่างความหนาและพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากกระสุน ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลแบบสมการเส้นตรงต่อพลังงานจลน์ มีค่าเท่ากับ  $Y = 8.622x + 226.3$  โดยที่ Y เป็นพลังงานจลน์และ X เป็นความหนาของแผ่นอะลูมิเนียม แสดงดังรูปที่ 4.19 สามารถทำนายความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมได้ เมื่อทราบพลังงานที่เกิดขึ้นของกระสุนแต่ละชนิด จากการทดสอบนี้พลังงานของกระสุนปืน M16 มีค่าประมาณ 2,400-2,450 J โดยจากตารางที่ 4.19 พบว่าค่าพลังงานของขนาดความหนา 8 และ 10 mm มีค่าการดูดซับพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย หรือใกล้เคียงกัน แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง เห็นได้ชัดเจนจากความหนา 6 mm และ 12 mm ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้นต่อความหนาแผ่นอะลูมิเนียม A 5083

ตารางที่ 4.7 ความหนาแน่นของแผ่นอะลูมิเนียม

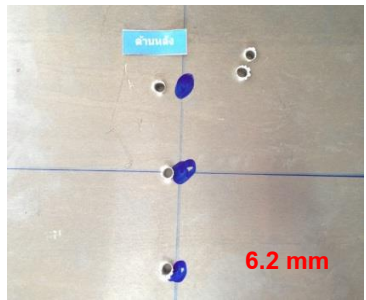

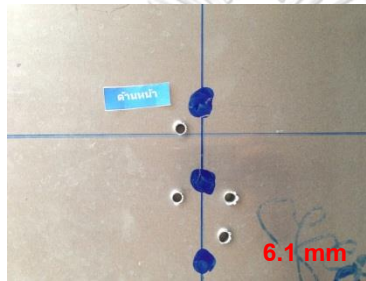

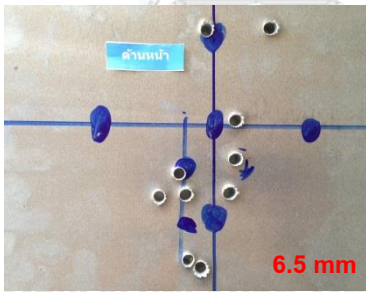


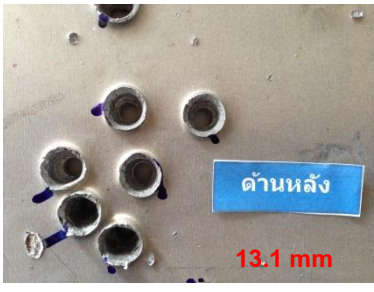
วัสดุ	ขนาด	น้ำหนัก	กว้าง	ยาว	หนา	ความหนาแน่น
		(kg)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/m <sup>3</sup> )
A 5083	6 mm	1.625	307	307	6.4	2,694.00
	8 mm	2.108			8.4	2,662.65
	10 mm	2.504			10.1	2,630.49
	12 mm	3.105			12.1	2,630.44
						<b>2,654.39<sup>11</sup></b>

ตารางที่ 4.8 พลังงานจลน์จากการทดสอบการยิงกระสุนจริงสำหรับแผ่นอะลูมิเนียม A 5083

วัสดุ	ขนาด	ความเร็วเริ่มต้น V <sub>o</sub>				ความเร็วปลาย V <sub>f</sub>				พลังงาน ΔE	ความ เสียหาย
		m/s		เฉลี่ย		m/s		เฉลี่ย		(J)	
A 5083	6 mm	971.4	968.3	979.0	972.9	246.5	287.6	221.1	252.4	2,286.53	ทะลุ
	8 mm	961.8	960.8	965.9	962.8	230.0	180.3	205.0	205.1	2,292.10	ทะลุ
	10 mm	950.1	969.4	954.8	958.1	226.0	124.6	169.9	180.2	2,299.54	ทะลุ
	12 mm	969.3	961.8	968.3	966.5	154.5	176.4	181.8	170.9	2,343.56	ทะลุ

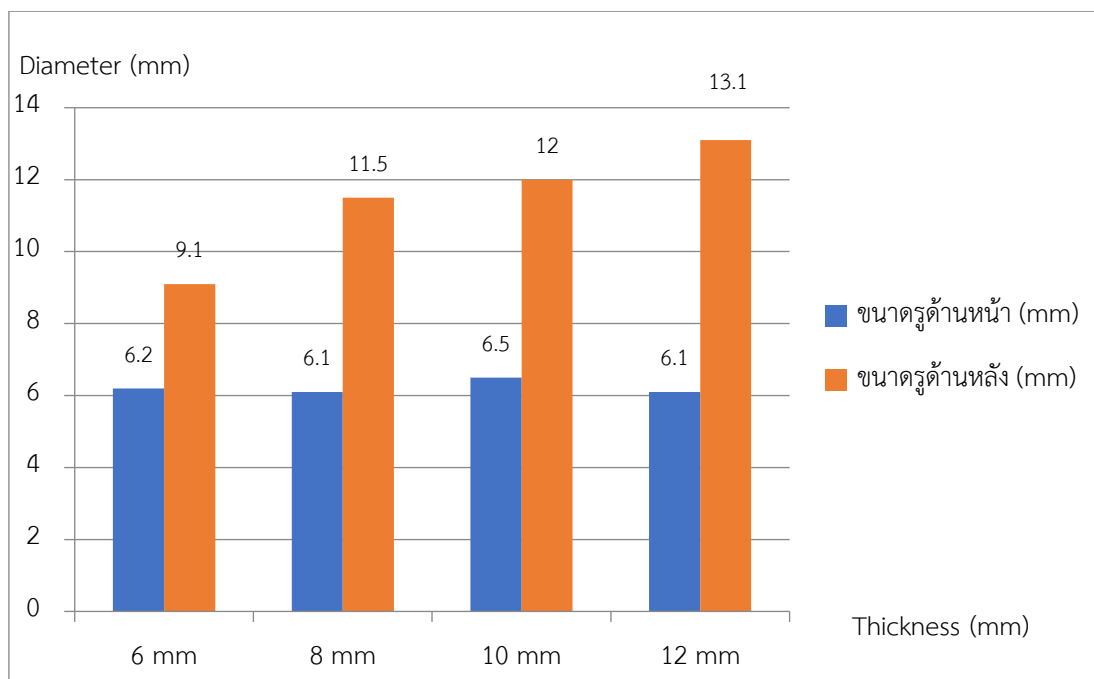
<sup>11</sup> ค่าความหนาแน่นของอะลูมิเนียม A5083 เท่ากับ 2,650 kg/m<sup>3</sup> [36]

ตารางที่ 4.9 ลักษณะความเสียหายแผ่นอะลูมิเนียม

ความหนาแผ่น อะลูมิเนียม	ด้านหน้า	ด้านหลัง
6 mm		
8 mm		
10 mm		
12 mm		

จากตารางที่ 4.9 แสดงความเสียหายที่เกิดจากการยิงกระสุนปืน ซึ่งรอยกระสุนปืนด้านหน้าจะมีขนาดเล็กกว่ารอยกระสุนปืนด้านหลังที่ทะลุออก และขนาดของรอยกระสุนปืนที่ทะลุออกจะมี

ขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อแผ่นอลูมิเนียมมีความหนามากขึ้น จากการทดสอบพบว่า ขนาดของรอยกระสุน ด้านหน้ามีขนาดที่ใกล้เคียงกันคือเท่ากับ 6.2 mm. และขนาดของรอยด้านหลังที่ขนาดความหนา 6 mm เท่ากับ 9.1 mm และ 13.1 mm สำหรับขนาดแผ่นอลูมิเนียม 12 mm ตามลำดับ โดยขนาดความเสียหายแสดงดังรูปที่ 4.20

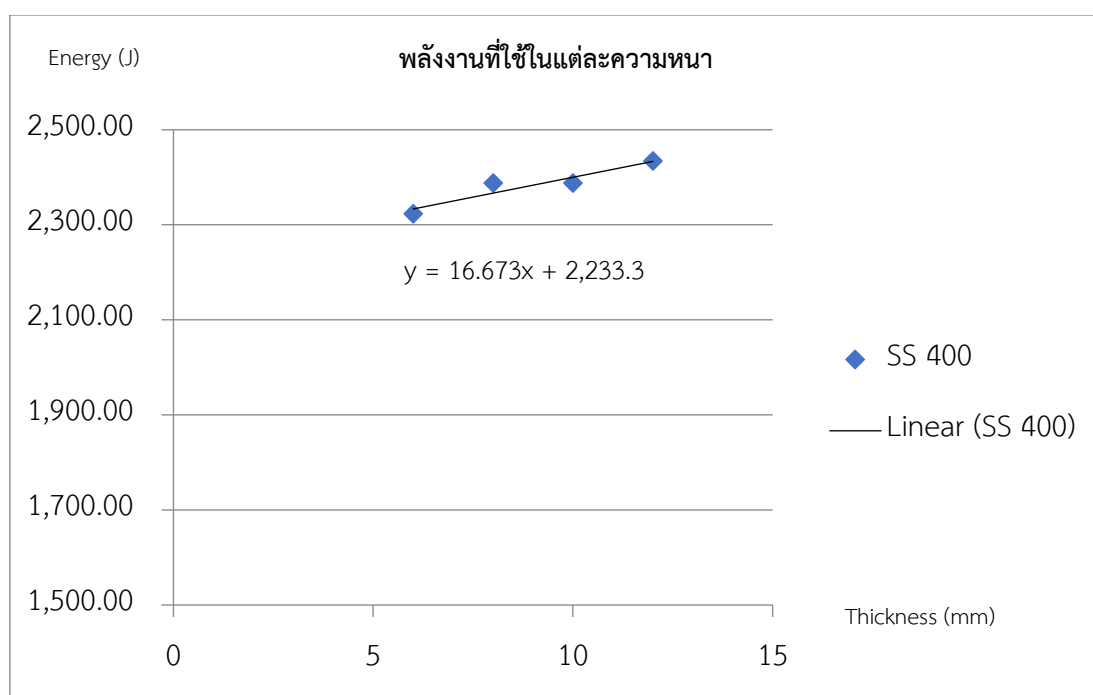


รูปที่ 4.20 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูความเสียหายด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นอลูมิเนียมที่ขนาดความหนา 6, 8, 10 และ 12 mm

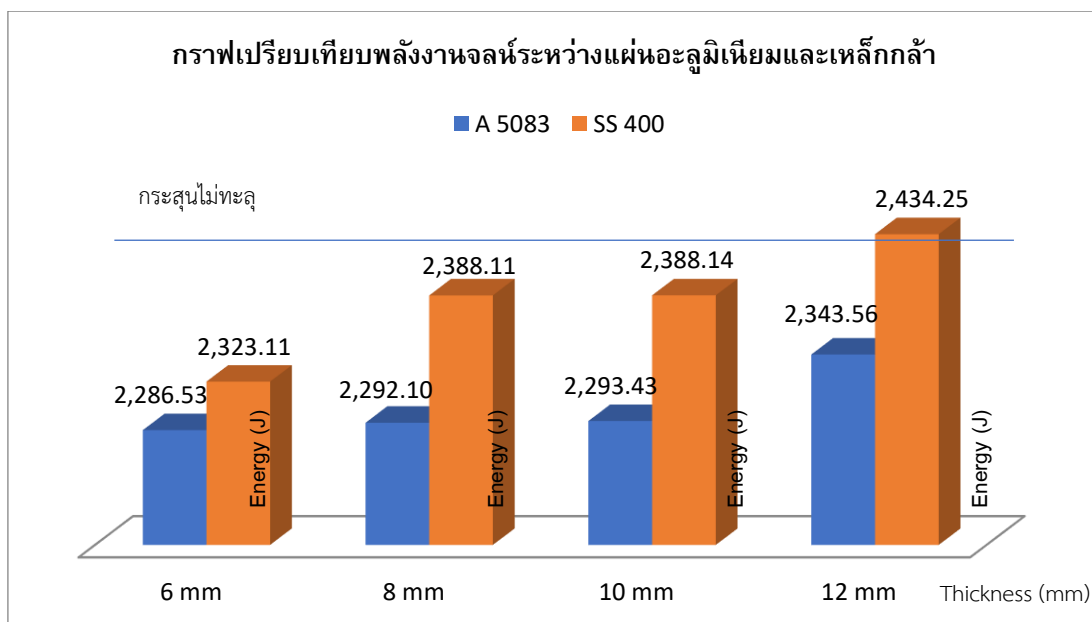
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นอกจากแผ่นอะลูมิเนียมที่นำมาทดสอบแล้ว ยังทำการทดสอบแผ่นเหล็กกล้า เกรด SS400 ซึ่งเป็นแผ่นเหล็กกล้าที่จะนำมาใช้ในการทำแผ่นประกบ โดยแผ่นเหล็กกล้ามีน้ำหนักมากกว่าแผ่นอลูมิเนียมมาก แต่สามารถดูดซับพลังงานจากกระสุนปืนได้มากกว่าแผ่นอะลูมิเนียม แสดงลักษณะความเสียหายดังตารางที่ 4.10 โดยความหนาแน่นของเหล็กกล้าเท่ากับ  $7,817.84 \text{ kg/m}^3$  จากการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.11 แผ่นเหล็กกล้าขนาดความหนา 6 mm, 8 mm, 10 mm และ 12 mm ซึ่งแผ่นเหล็กกล้าขนาด 12 mm สามารถกันกระสุนไม่ให้ทะลุได้ และขนาดความหนา 6 mm, 8 mm และ 10 mm สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 2,323.11 J, 2,388.11 และ 2,388.14 J แสดงดังตารางที่ 4.12 ซึ่งในระดับความหนาเดียวกันกับแผ่นอะลูมิเนียม สามารถดูดซับพลังงานจากกระสุนได้มากกว่าแสดงการเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.22 ซึ่งความสัมพันธ์ ระหว่าง ความหนาและพลังงานดังรูปที่ 4.21 ลักษณะความหนาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลแบบสมการเส้นตรงต่อพลังงานจลน์เหมือนกับแผ่นอะลูมิเนียม มีค่าเท่ากับ  $Y = 16.67X + 2,233.3$  โดยที่ Y เป็นพลังงานจลน์และ X เป็นความหนา

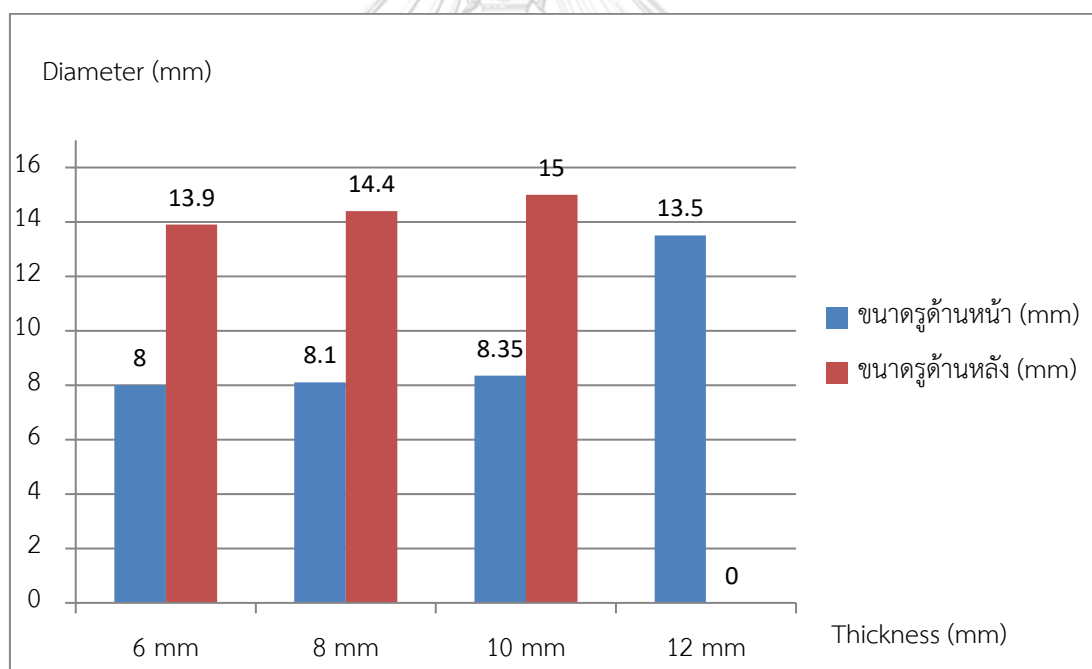
ของแผ่น ขนาดรูความเสียหายด้านหน้าและด้านหลังจะแตกต่างจากแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งรูขนาดความเสียหายด้านหน้าจะมีขนาดประมาณ 8.2 mm ในกรณีที่กระสุนทะลุ และมีขนาดความเสียหายด้านหลัง สำหรับความหนา 6,8 mm เท่ากับ 13.9, 14.4 mm และ 15 mm สำหรับความหนา 10 mm แสดงดังตารางที่ 4.10 ซึ่งขนาดรูความเสียหายจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของแผ่นทดสอบเช่นกัน ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบในการดูดซับพลังงานของวัสดุประเภทเหล็กกล้า โดย ที่ความหนา 12 mm สามารถกันกระสุนได้โดยกระสุนไม่ทะลุ



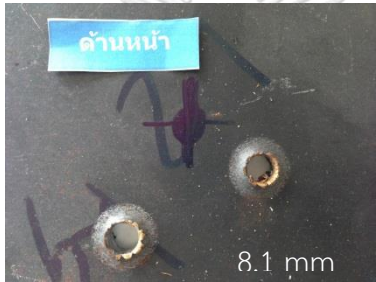







รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบพลังงานจลน์ในแต่ละความหนาระหว่างแผ่นอะลูมิเนียมและเหล็กกล้า



รูปที่ 4.23 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูความเสียหายด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นเหล็กกล้าที่ขนาดความหนา 6, 8, 10 และ 12 mm

ตารางที่ 4.10 ลักษณะความเสียหายของแผ่นเหล็กกล้า

ความหนาแผ่นเหล็กกล้า	ด้านหน้า	ด้านหลัง
6 mm		
8 mm		
10 mm		
12 mm		

ตารางที่ 4.11 ความหนาแน่นของแผ่นเหล็กกล้า ขนาด 30.5 x 30.5 cm

วัสดุ	ขนาด	น้ำหนัก	กว้าง	ยาว	หนา	ความหนาแน่น
		(kg)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/m <sup>3</sup> )
SS 400	6 mm	4.253	305	305	5.8	7,882.57
	8 mm	6.544			9.0	7,816.29
	10 mm	7.139			9.8	7,830.90
	12 mm	8.93			12.4	7,741.59
						<b>7,817.84<sup>12</sup></b>

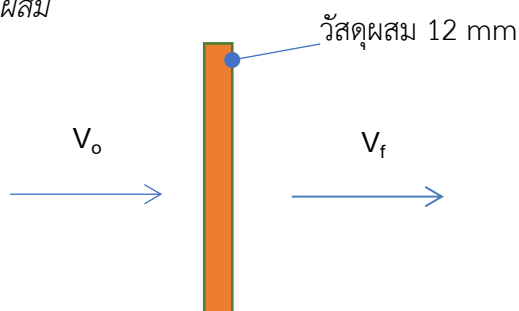
ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบการยิงกระสุนจริงสำหรับแผ่นเหล็กกล้า

วัสดุ	ขนาด	ความเร็วเริ่มต้น $V_0$			ความเร็วปลาย $V_f$				พลังงาน $\Delta E$	ความเสียหาย	
		m/s			เฉลี่ย				(J)		
SS 400	6 mm	954.8	943.5	966.1	954.8	136.2	122.3	105.1	121.2	2,323.1	ทะลุ
	8 mm	966.8	965.8	970.9	967.8	123.7	112.9	126.5	121.0	2,388.1	ทะลุ
	10 mm	957.1	976.4	961.8	965.1	98.8	94.1	97.3	96	2,388.14	ทะลุ
	12 mm	972.3	964.8	971.3	969.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2,434.25	ไม่ทะลุ

<sup>12</sup> ความหนาแน่นของเหล็กกล้าเท่ากับ 7,860 kg/m<sup>3</sup> [36]



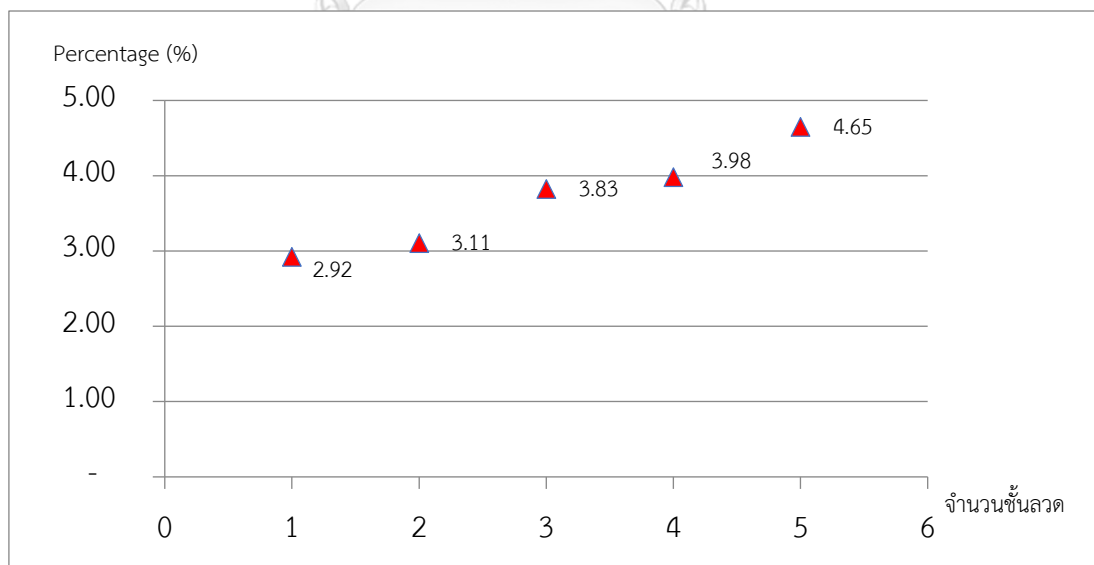
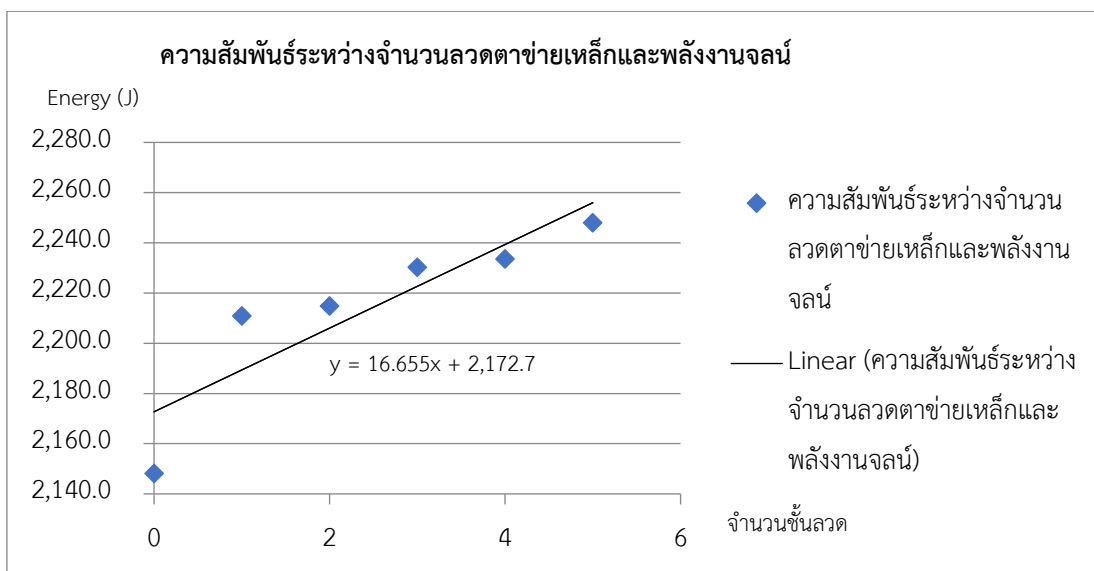
4.4.2 การดูดซับพลังงานจลน์จากการเพิ่มจำนวนชั้นลวดตาข่ายเหล็กกล้า  
ตารางที่ 4.13 กลุ่มที่ 1 วัสดุผสม



จำนวน ชั้น ลวด	ความเร็วเริ่มต้น $V_o$				ความเร็วปลาย $V_f$				พลังงาน $\Delta E$ (J)	ความ เสียหาย
	m/s		เฉลี่ย		m/s		เฉลี่ย			
0	988.3	977.3	949.7	955.1	289.7	281.3	292.3	287.8	2,148.2	ทะลุ
1	981.2	922.0	994.1	965.8	272.3	276.5	294.7	281.2	2,211.0	ทะลุ
2	977.4	947.3	968.7	964.5	280.1	270.0	271.6	273.9	2,214.9	ทะลุ
3	975.3	960.8	963.0	966.4	254.0	287.4	267.6	269.7	2,230.4	ทะลุ
4	959.8	961.5	965.9	962.4	246.7	267.0	244.0	252.6	2,233.7	ทะลุ
5	975.6	953.7	961.3	963.5	276.5	271.3	189.7	245.8	2,248.0	ทะลุ

นำชิ้นงานวัสดุผสมที่ขึ้นรูปจากการอัดมาทำการทดสอบการยิง โดยชิ้นงานวัสดุผสมแต่ละแผ่นจะมีความหนาเท่ากันทุกแผ่นคือขนาด 12 mm และเสริมด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็กตั้งแต่ 1-5 ชั้น โดยผลการทดสอบพบว่า การเสริมเส้นลวดตาข่ายเหล็ก สามารถช่วยเพิ่มการดูดซับพลังงานจลน์ของชิ้นงานได้ ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถป้องกันการทะลุของกระสุน ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการเจาะทะลุในห้องทดสอบ โดยค่าพลังงานจลน์สำหรับชิ้นงานวัสดุผสมเสริมด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น (จำนวนชั้นสูงสุดที่สามารถเพิ่มได้) เท่ากับ 2,248.0 J ซึ่งมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมลวดตาข่ายเหล็ก แสดงค่าพลังงานในแต่ละชิ้นงานทดสอบดังตารางที่ 4.13 ซึ่งเป็นการทดสอบการยิงชิ้นงานโดย




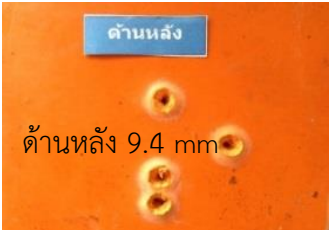

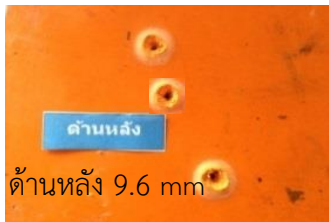
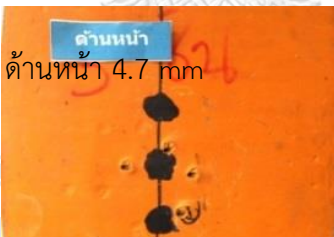




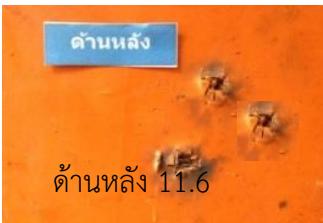
ไม่มีแผ่นโลหะใดๆ ประกอบ ความสัมพันธ์ของการเพิ่มขึ้นของชั้นลวดจะส่งผลในรูปแบบสมการเส้นตรงต่อพลังงานจลน์ แสดงดังรูปที่ 4.24 ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $Y = 16.655X + 2,172.7$  โดยที่  $Y$  คือ ค่าพลังงานจลน์ และ  $X$  คือจำนวนชั้นของลวดตาข่ายเหล็ก คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นลวดตาข่ายเหล็กจำนวน 5 ชั้น เท่ากับ 4.65 % เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เสริมลวดตาข่ายเหล็ก ดังรูปที่ 4.25



เนื่องจากเนื้อพื้นของชิ้นงานวัสดุผสมส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยโลหะ ทำให้ลักษณะและขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้นด้านหน้าและด้านหลังแตกต่างจากการทดสอบยิงแผ่นโลหะ โดยขนาดรูความเสียหายด้านหน้าจะเล็กกว่าขนาดรูความเสียหายด้านหลัง ซึ่งลักษณะความเสียหายด้านหลังจะแตกต่างกันออกไปตามความหนาและตามจำนวนชั้นของลวดตาข่ายเหล็กที่เสริมแรง พบว่า การเพิ่มเส้นลวดตาข่ายเหล็กที่จำนวน 5 ชั้น เมื่อกระสุนปืนกระทบจะทำให้เส้นลวดตาข่ายเหล็กภายในเสียหาย หรือขาดโผล่ออกมาด้านนอกเนื้อพื้นด้วย ซึ่งขนาดรูความเสียหายด้านหน้าจะอยู่ประมาณ 3-4 mm และขนาดรูความเสียหายต่างๆแสดงดังตารางที่ 4.14

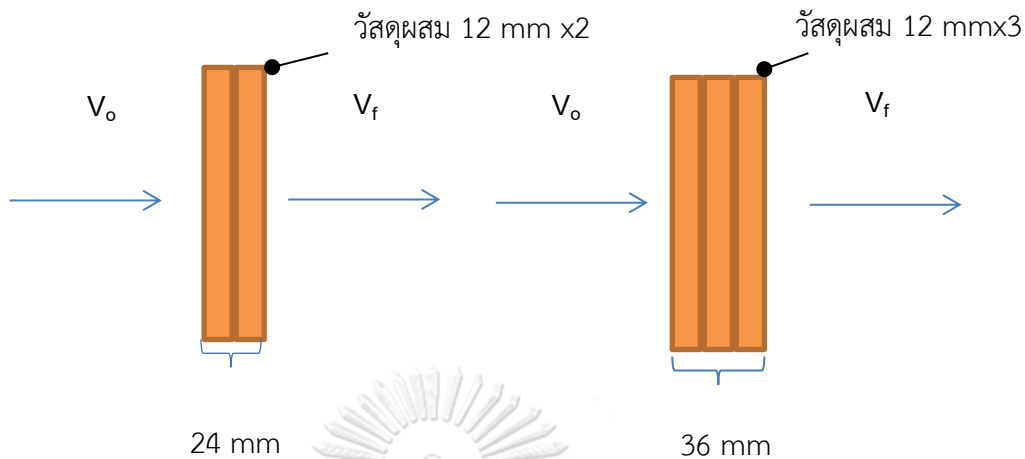


ตารางที่ 4.14 ลักษณะความเสียหายของวัสดุผสมที่ขนาดความหนา 12 mm

จำนวนชั้นลวด	ด้านหน้า	ด้านหลัง
ไม่มีลวด	 <p>ด้านหน้า ด้านหน้า 2.8 mm</p>	 <p>ด้านหลัง ด้านหลัง 8.9 mm</p>
1 ชั้น	 <p>ด้านหน้า ด้านหน้า 3.15</p>	 <p>ด้านหลัง ด้านหลัง 9.4 mm</p>
2 ชั้น	 <p>ด้านหน้า ด้านหน้า 4.7 mm</p>	 <p>ด้านหลัง ด้านหลัง 9.6 mm</p>
3 ชั้น	 <p>ด้านหน้า ด้านหน้า 4.7 mm</p>	 <p>ด้านหลัง ด้านหลัง 11.1</p>
4 ชั้น	 <p>ด้านหน้า ด้านหน้า 4.4</p>	 <p>ด้านหลัง ด้านหลัง 10.9</p>
5 ชั้น	 <p>ด้านหน้า ด้านหน้า 3.6 mm</p>	 <p>ด้านหลัง ด้านหลัง 11.6</p>

#### 4.4.3 การดูดซับพลังงานจลน์จากการเพิ่มความหนาของวัสดุผสม

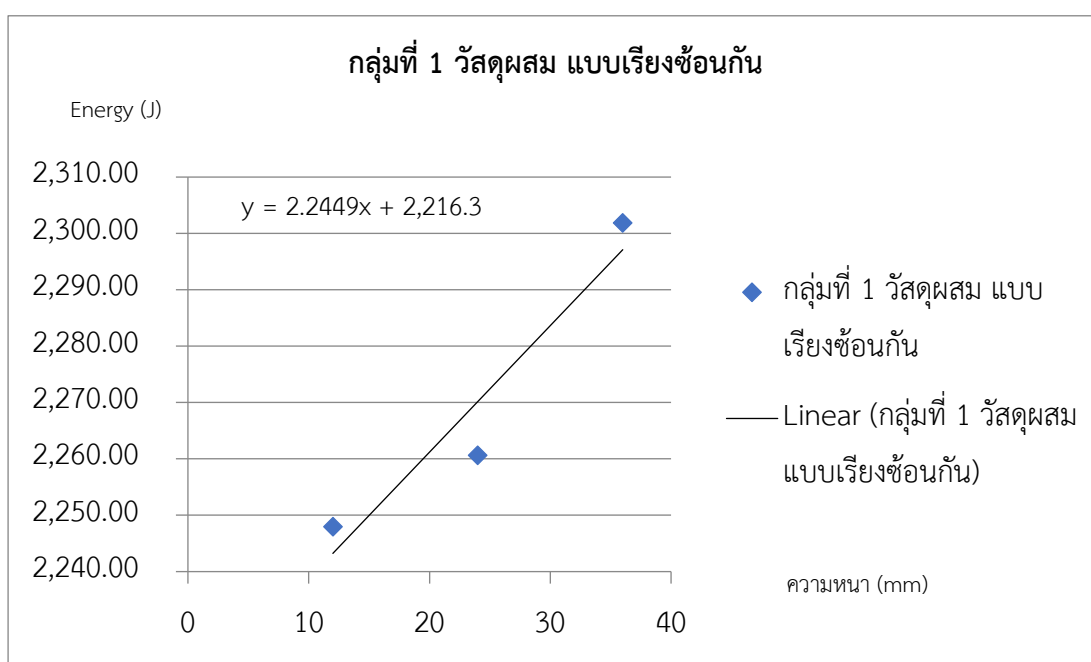
ตารางที่ 4.15 กลุ่มที่ 1 วัสดุผสม แบบเรียงซ้อนกันโดยเสริมลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น



ลักษณะ การเรียง ตัวของ ชิ้นงาน	ความเร็วเริ่มต้น $V_o$				ความเร็วปลาย $V_f$				พลังงาน $\Delta E$	ความ เสียหาย
	m/s		เฉลี่ย		m/s		เฉลี่ย		(J)	
(R/S/S/S/S/R) x 2	928.3	973.3	957.7	956.4	209.4	207.6	197.3	204.8	2,260.6	ทะลุ
(R/S/S/S/S/R) x 3	947.2	978.0	960.1	961.8	195.6	188.3	187.2	190.4	2,301.9	ทะลุ

นำชิ้นงานวัสดุผสมมาเรียงซ้อนกันเพื่อเพิ่มความหนา โดยแต่ละแผ่นมีความหนาเท่ากับ 12 mm และแต่ละแผ่นเสริมด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็กจำนวน 5 ชั้น เนื่องจากการเสริมลวดจำนวน 5 ชั้นสามารถดูดซับพลังงานได้ดีที่สุด จากนั้นนำไปทดสอบการยิง ซึ่งแต่ละชั้นจะยึดติดกันด้วยการยึดเหนี่ยวแบบพันธะทางกล (Mechanical bond) โดยใช้สกรูเกลียวตลอดยึดด้วยหัวน็อตหกเหลี่ยมทั้ง

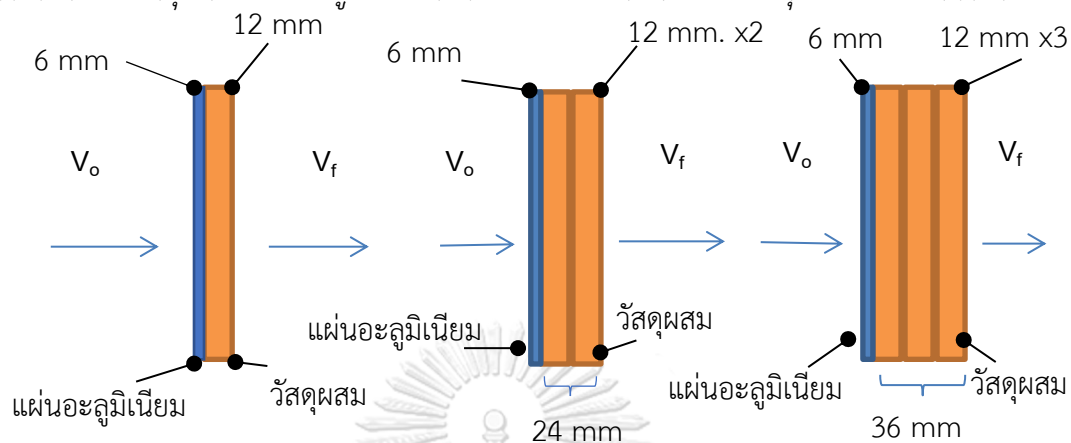
สองด้าน โดยประกบทุกแผ่นเข้าหากันตามความหนาที่ทำการทดสอบเท่ากับ 24 mm (2 แผ่น) และ 36 mm (3 แผ่น) จากการทดสอบชิ้นงานไม่สามารถป้องกันการทะลุของกระสุนได้ โดยค่าพลังงานจากการดูดซับจะเพิ่มขึ้นในแบบสมการเส้นตรง ต่อความหนา แสดงดังตารางที่ 4.15 ถ้าจะใช้เพียงวัสดุผสมเพียงอย่างเดียวจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนความหนาตามสมการ  $Y = 2.245X + 2,216.3$  โดย Y คือพลังงานจลน์และ X คือความหนารวมของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.26 ลักษณะความเสียหายคือชิ้นงานด้านหลังจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และจะเห็นเส้นลวดตาข่ายเหล็กโผล่ออกจากเนื้อพื้นของวัสดุผสม



#### 4.4.4 การดูดซับพลังงานจลน์จากการเลือกใช้แผ่นโลหะประกบ

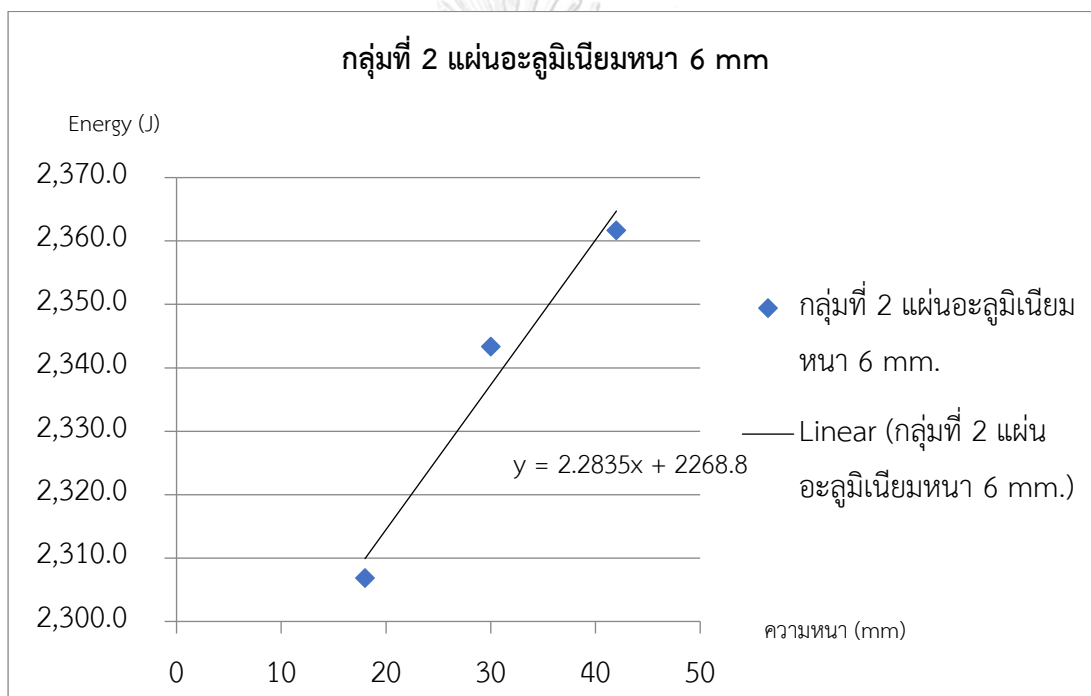
##### 4.4.4.1 แผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้า

ตารางที่ 4.16 กลุ่มที่ 2 แผ่นอะลูมิเนียมหนา 6 mm ประกอบด้วยแผ่นวัสดุผสมเสริมลวดตาข่าย 5 ชั้น



ลักษณะการเรียงตัวของชิ้นงาน	ความเร็วเริ่มต้น $V_o$				ความเร็วปลาย $V_f$				พลังงาน $\Delta E$ (J)	ความเสียหาย
	m/s		เฉลี่ย		m/s		เฉลี่ย			
A(R/S/S/S/S/R)	948.4	957.3	954.5	953.4	154.2	117.9	133.4	135.2	2,306.9	ทะลุ
A(R/S/S/S/S/R) x2	945.1	964.1	959.7	956.3	94.9	107.8	93.3	98.7	2,343.4	ทะลุ
A(R/S/S/S/S/R) x3	988.0	922.0	966.3	958.8	85.4	77.3	95.1	85.9	2,361.7	ทะลุ

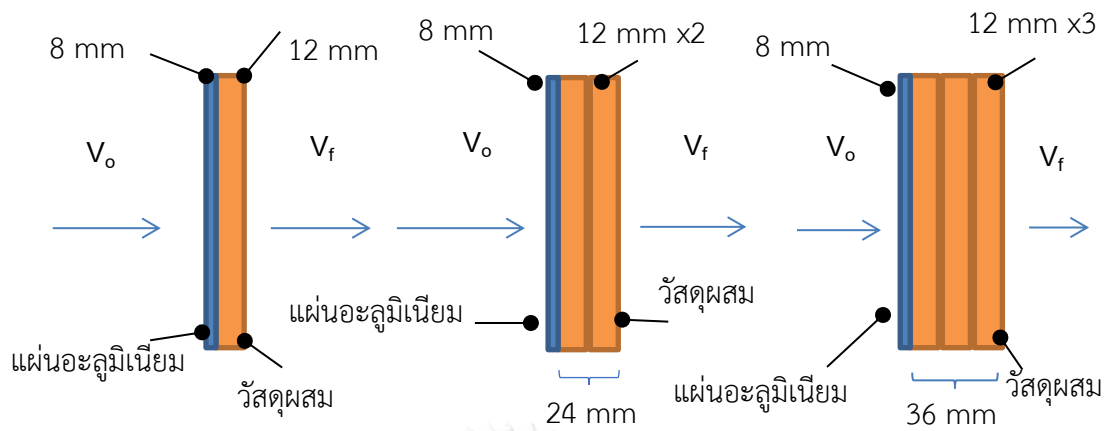
จากการนำแผ่นวัสดุผสมมาเรียงซ้อนกันเพื่อเพิ่มความหนาเพียงอย่างเดียว จะทำให้ความหนารวมที่ต้องการนั้นมากและส่งผลต่อน้ำหนักชิ้นงานรวมด้วย แผ่นอะลูมิเนียมจึงถูกนำมาช่วยในการลดความหนารวมของชิ้นงาน โดยแผ่นอะลูมิเนียมขนาดความหนา 6 mm, 8 mm, 10 mm, และ 12 mm ทำให้ความหนารวมของชิ้นงานนั้นลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบแบบไม่มีแผ่นอะลูมิเนียมประกบ จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.16 เมื่อนำแผ่นวัสดุผสมจำนวน 3 ชั้นมาประกบหน้าด้วยแผ่นอะลูมิเนียมความหนา 6 mm พบว่า ไม่สามารถกันกระสุนได้ ซึ่งความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างพลังงานจลน์และความหนารวมของชิ้นงานเท่ากับ  $Y=2.2835X + 2,268.8$  โดย Y คือพลังงานจลน์และ X คือความหนารวมของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแผ่นอะลูมิเนียม 6 mm กับแผ่นวัสดุผสม

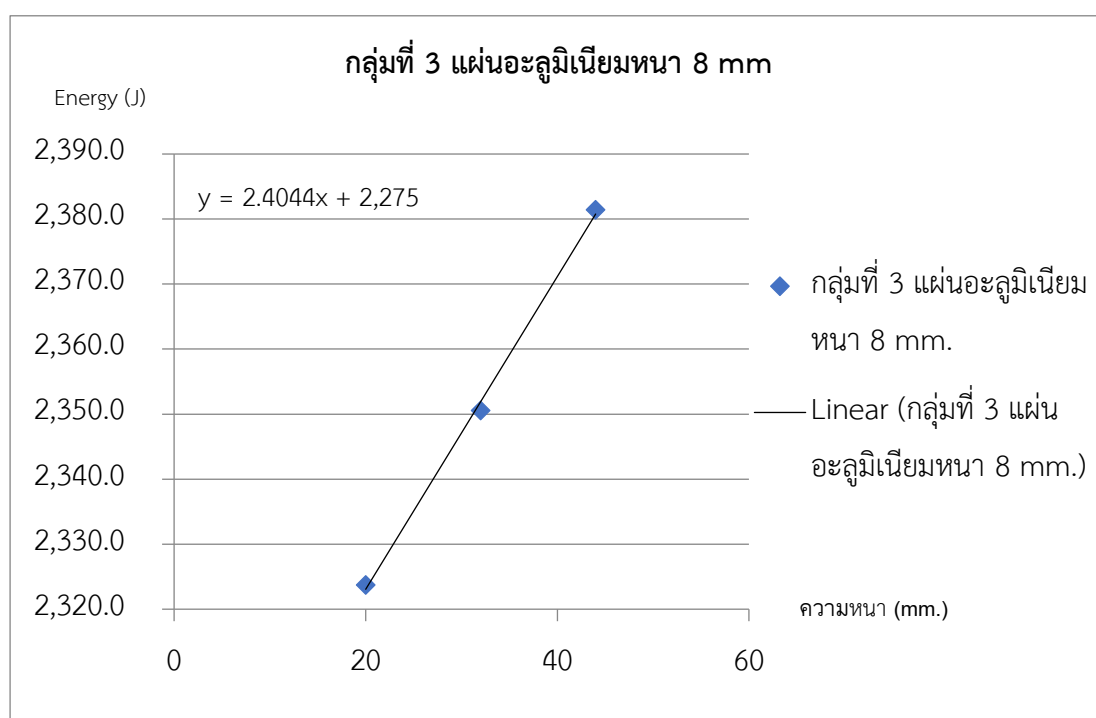


ตารางที่ 4.17 กลุ่มที่ 3 แผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 mm ประกอบด้วยแผ่นวัสดุผสมเสริมลวดตาข่าย 5 ชั้น



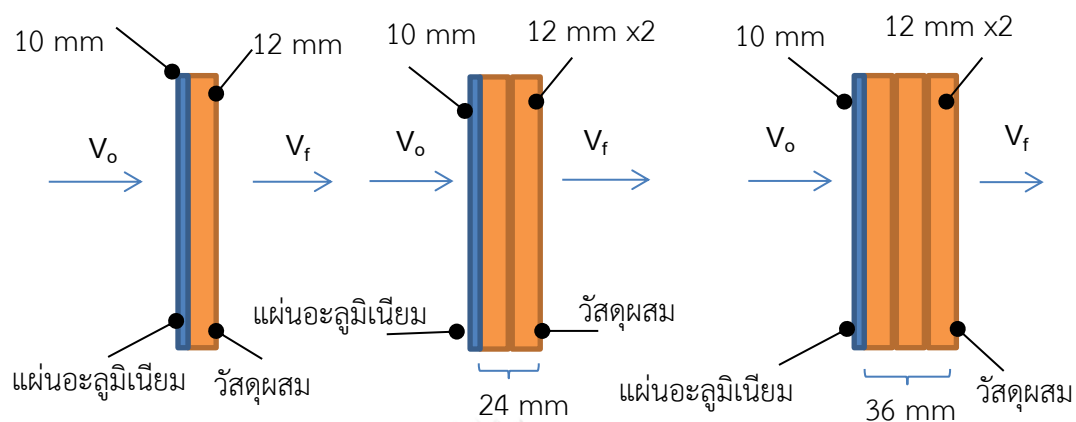
ลักษณะการเรียงตัวของชิ้นงาน	ความเร็วเริ่มต้น $V_o$				ความเร็วปลาย $V_f$				พลังงาน $\Delta E$ (J)	ความเสียหาย
	m/s		เฉลี่ย		m/s		เฉลี่ย			
A(R/S/S/S/S/R)	979.3	959.3	964.0	967.5	206.1	196	189.8	197.3	2,323.7	ทะลุ
A(R/S/S/S/S/R) x2	969.3	965.4	955.7	963.5	147.5	139.5	144.7	143.9	2,350.6	ทะลุ
A(R/S/S/S/S/R) x3	995.5	959.0	939.1	964.5	115.7	97.6	99.2	104.2	2,381.4	ทะลุ

การทดสอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้าขนาดความหนา 6 mm ไม่สามารถกันกระสุนได้ที่ความหนารวม 42 mm จึงทำการทดสอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมขนาดความหนา 8 mm พบว่า ค่าพลังงานจลน์ไม่แตกต่างกันมากเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นประกบหน้าอะลูมิเนียม 6 mm ซึ่งเมื่อเปลี่ยนแผ่นประกบหน้าขนาดความหนา 8 mm ก็ยังไม่สามารถป้องกันการทะลุของกระสุนได้ แสดงในตารางที่ 4.17 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างพลังงานจลน์และความหนารวมของชิ้นงานเท่ากับ  $Y = 2.4044X + 2,275$  โดย Y คือพลังงานจลน์และ X คือความหนารวมของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.28



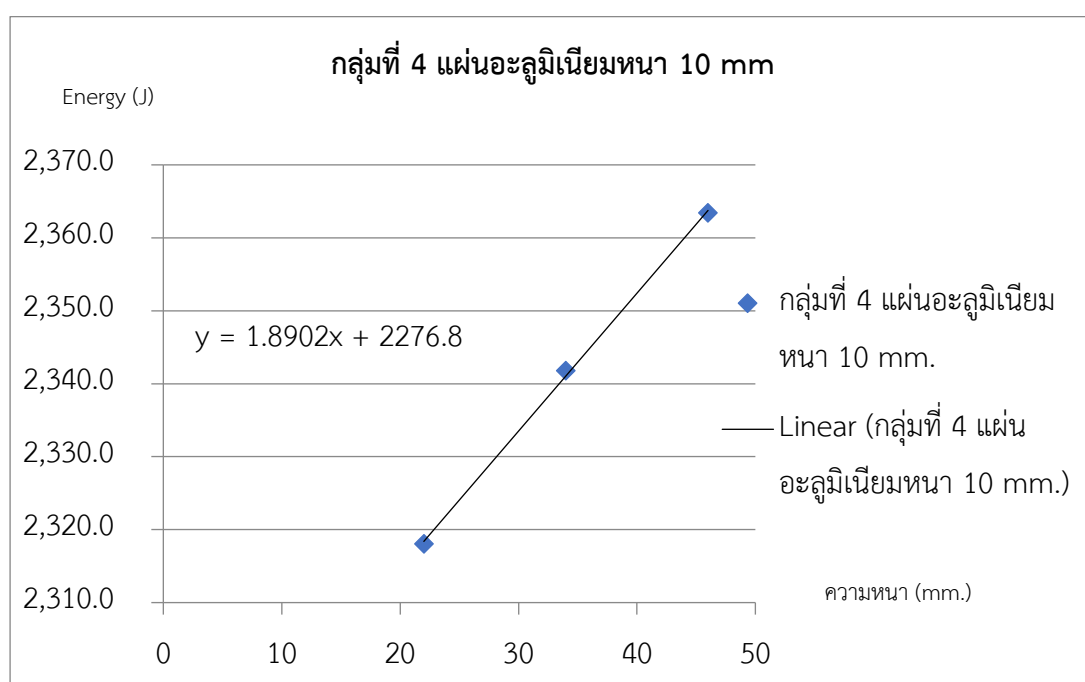
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแผ่นอะลูมิเนียม 8 mm กับแผ่นวัสดุผสม

ตารางที่ 4.18 กลุ่มที่ 4 แผ่นอะลูมิเนียมหนา 10 มม ประกอบแผ่นวัสดุผสมเสริมลวดตาข่าย 5 ชั้น

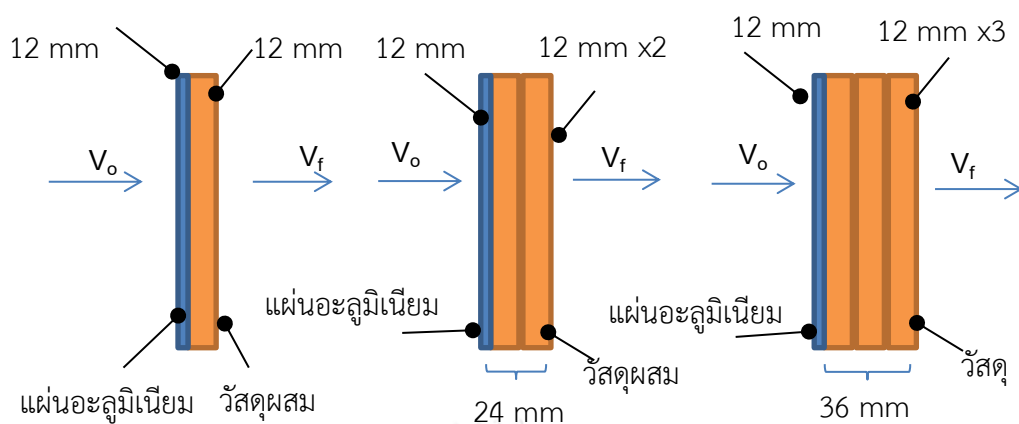


ลักษณะการเรียงตัวของชิ้นงาน	ความเร็วเริ่มต้น $V_o$			ความเร็วปลาย $V_f$				พลังงาน $\Delta E$	ความเสียหาย	
	m/s			เฉลี่ย	m/s			เฉลี่ย		(J)
A(R/S/S/S/S/R)	952.7	961.7	984.1	966.2	188.5	225	178.0	196.2	2,318.0	ทะลุ
A(R/S/S/S/S/R) x2	964.9	963.8	959.7	962.8	154.9	146.5	151.9	151.1	2,341.8	ทะลุ
A(R/S/S/S/S/R) x3	951.2	972.0	974.1	965.8	132.0	137.8	156.5	142.1	2,363.9	ทะลุ

การทดสอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้าขนาดความหนา 8 mm ไม่สามารถกันกระสุนได้ที่ความหนารวม 44 mm จึงทำการทดสอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมขนาดความหนา 10 mm พบว่า ค่าพลังงานจลน์ไม่แตกต่างกันมากเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นประกบหน้าอะลูมิเนียม 6 mm และ 8 mm ซึ่งเมื่อเปลี่ยนแผ่นประกบหน้าขนาดความหนา 10 mm ก็ยังไม่สามารถป้องกันการทะลุของกระสุนได้ แสดงในตารางที่ 4.18 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างพลังงานจลน์และความหนารวมของชิ้นงานเท่ากับ  $Y = 1.8902X + 2,276.8$  โดย Y คือพลังงานจลน์และ X คือความหนารวมของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.29

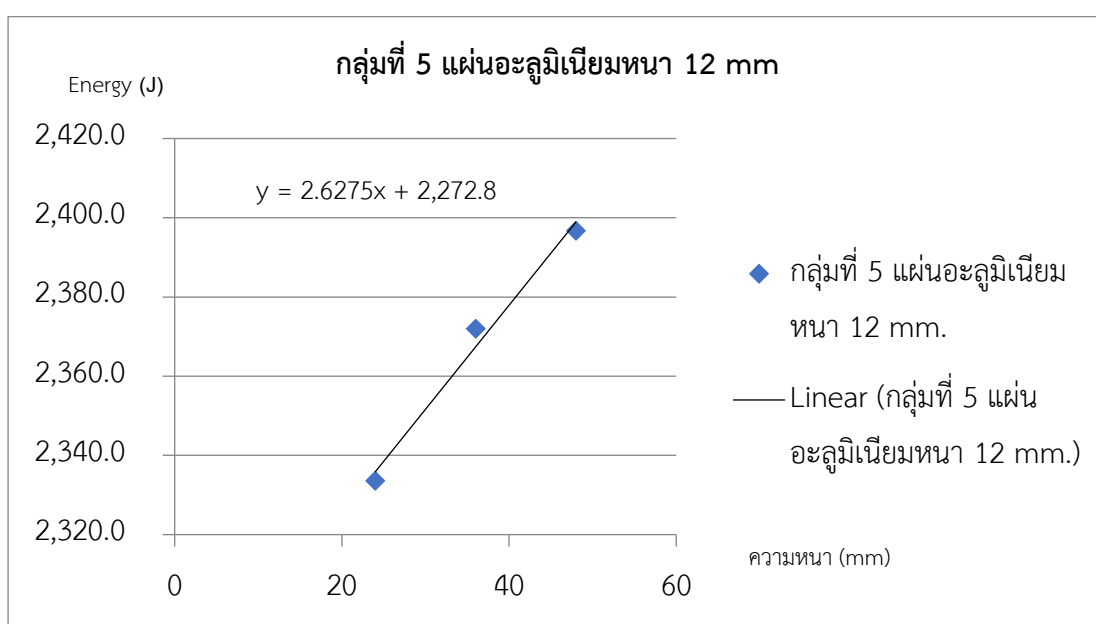


ตารางที่ 4.19 กลุ่มที่ 5 แผ่นอะลูมิเนียมหนา 12 mm ประกอบแผ่นวัสดุผสมเสริมลวดตาข่าย 5 ชั้น



ลักษณะการเรียงตัวของชิ้นงาน	ความเร็วเริ่มต้น $V_o$				ความเร็วปลาย $V_f$				พลังงาน $\Delta E$ (J)	ความเสียหาย
	m/s		เฉลี่ย		m/s		เฉลี่ย			
A(R/S/S/S/S/R)	948.3	967.3	968.7	961.4	134.7	167.2	156.6	152.8	2,333.6	ทะลุ
A(R/S/S/S/S/R) x2	969.3	959.3	959.7	962.8	92.9	115.3	108.0	105.4	2,372.6	ทะลุ
A(R/S/S/S/S/R) x3	978.2	972.0	944.1	964.8	77.4	78.3	65.3	73.7	2,396.7	ทะลุ

การทดสอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้าขนาดความหนา 10 mm ไม่สามารถกันกระสุนได้ที่ความหนา รวม 46 mm จึงทำการทดสอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมขนาดความหนา 12 mm พบว่าค่าพลังงานจลน์ไม่แตกต่างกันมากเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นประกบหน้าอะลูมิเนียม 6 mm, 8 mm และ 10 mm ซึ่งเมื่อเปลี่ยนแผ่นประกบหน้าขนาดความหนา 12 mm. ก็ยังไม่สามารถป้องกันการทะลุของกระสุนได้ แสดงในตารางที่ 4.19 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างพลังงานจลน์และความหนา รวมของชิ้นงานเท่ากับ  $Y = 2.6275X + 2,272.8$  โดย Y คือพลังงานจลน์และ X คือความหนา รวมของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแผ่นอะลูมิเนียม 12 mm กับแผ่นวัสดุผสม

























## CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากการทดสอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้าที่มีขนาดความหนา 6 mm, 8 mm, 10 mm และ 12 mm มีลักษณะความเสียหายที่เหมือนกันคือ ขนาดรูความเสียหายของแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้าจะมีขนาดใกล้เคียงกัน และขนาดรูความเสียหายจะใหญ่ขึ้นในด้านหลัง และรูความเสียหายระหว่างชั้นที่อยู่ด้านในจะมีขนาดเล็ก ตามลำดับความหนา แสดงดังตารางที่ 4.20 ในความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้าขนาดความหนา 6 mm พบว่า ด้านหน้าจะมีลักษณะยุบตัวลงไป และพองออกในทิศทางที่กระสุนวิ่งผ่าน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความหนา 6 mm มีความแข็งแรงไม่เพียงพอที่จะนำมาใช้ในการประกบหน้าเพราะอาจจะทำให้เนื้อวัสดุผสมในลำดับถัดไปเกิดความเสียหายมากยิ่งขึ้นหรือเกิดการแยกตัวกันระหว่างพื้นผิวได้ง่าย

จากการทดสอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้าในแต่ละความหนา สามารถนำมาแสดงในกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งจะสามารถทำนายความหนาที่ใช้การหยุดกระสุนได้ แสดงดังตารางที่ 4.21 โดยความหนาที่ระบุในช่องสี่เหลี่ยมคือความหนาที่ได้จากการทำนายของกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นในแต่ละความหนา เมื่อเปรียบเทียบกับช่องสี่แดง ซึ่งเป็นความหนาที่น้อยที่สุดที่สามารถกันกระสุนได้จริง จะพบว่าความหนาที่สามารถป้องกันกระสุนได้จริงมีความหนาที่ใกล้เคียงกันจากการคำนวณ พลังงานจลน์ที่ดูดซับไว้จากการเพิ่มความหนาจะนำมาพิจารณาร่วมกับน้ำหนักและความหนาของการประกบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมแสดงดังรูปที่ 4.31



ตารางที่ 4.20 ลักษณะความเสียหายของชิ้นงานแบบแผ่นอลูมิเนียมประกบหน้า

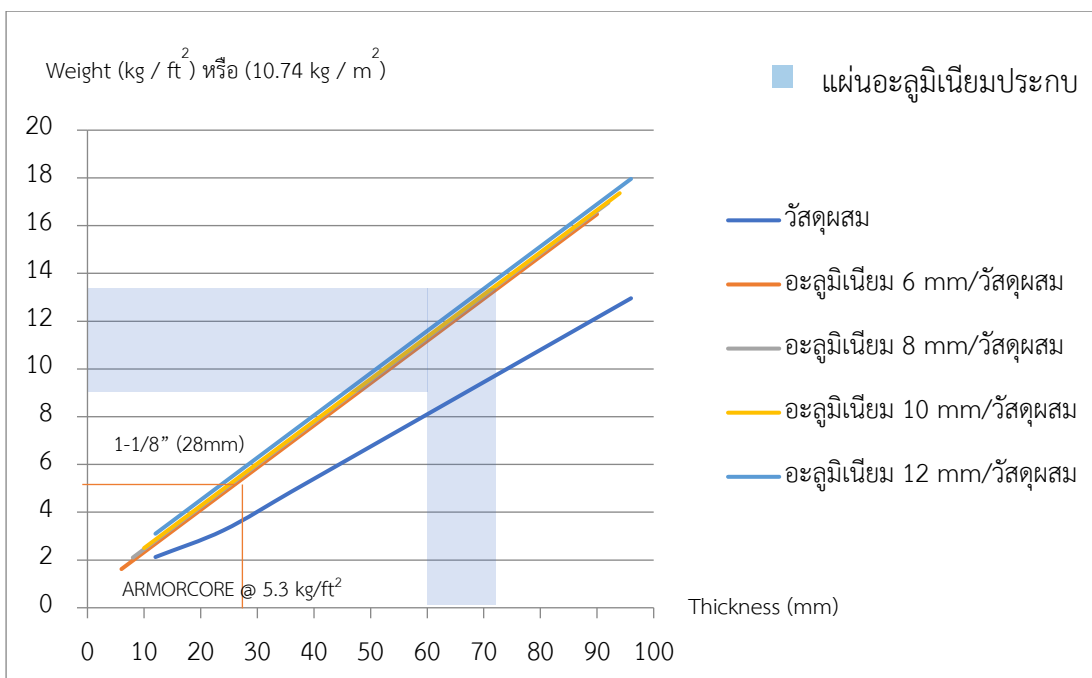
ความหนา อะลูมิเนียม	แผ่นที่ 1		แผ่นที่ 2		แผ่นที่ 3	
	ด้านหน้า	ด้านหลัง	ด้านหน้า	ด้านหลัง	ด้านหน้า	ด้านหลัง
6 มม	 ด้านหน้า	 ด้านหลัง	 ด้านหน้า	 ด้านหลัง	 ด้านหน้า	 ด้านหลัง
ขนาดรู	10.93	12.47	3.2	10.43	13.63	30.33
8 มม	 ด้านหน้า	 ด้านหลัง	 ด้านหน้า	 ด้านหลัง	 ด้านหน้า	 ด้านหลัง
ขนาดรู	6.85	11.13	11.27	21.57	22.23	27.17
10 มม	 ด้านหน้า	 ด้านหลัง	 ด้านหน้า	 ด้านหลัง	 ด้านหน้า	 ด้านหลัง
ขนาดรู	6.17	11.93	9.03	12.83	17.47	19.47
12 มม	 ด้านหน้า	 ด้านหลัง	 ด้านหน้า	 ด้านหลัง	 ด้านหน้า	 ด้านหลัง
ขนาดรู	6	13.63	8.27	12.83	16.6	15.9



ตารางที่ 4.21 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อการเพิ่มความหนาของการเรียงตัวแบบแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้าวัสดุผสม

จำนวนแผ่น	วัสดุผสม		อะลูมิเนียม 6 mm/วัสดุผสม		อะลูมิเนียม 8 mm/วัสดุผสม		อะลูมิเนียม 10 mm/วัสดุผสม		อะลูมิเนียม 12 mm/วัสดุผสม	
	ความหนา	น้ำหนัก	ความหนา	น้ำหนัก	ความหนา	น้ำหนัก	ความหนา	น้ำหนัก	ความหนา	น้ำหนัก
	(mm)	(kg)	(mm)	(kg)	(mm)	(kg)	(mm)	(kg)	(mm)	(kg)
1	12	2.12	6	1.62	8	2.10	10	2.50	12	3.10
2	24	3.05	18	3.74	20	4.22	22	4.62	24	5.22
3	36	4.57	30	5.56	32	6.34	34	6.74	36	7.34
4	48	6.1	42	7.98	44	8.46	46	8.86	48	9.46
5	60	7.62	54	10.10	56	10.58	58	10.99	60	11.59
6	72	9.15	66	12.22	68	12.7	70	13.11	72	13.71
7	84	10.67	78	14.34	80	14.82	82	15.23	84	15.83
8	96	12.2	90	16.46	92	16.94	94	17.36	96	17.96

ความหนาและน้ำหนักสามารถหยุดกระสุนได้จริง จำนวนชั้นที่ได้จากการคำนวณ

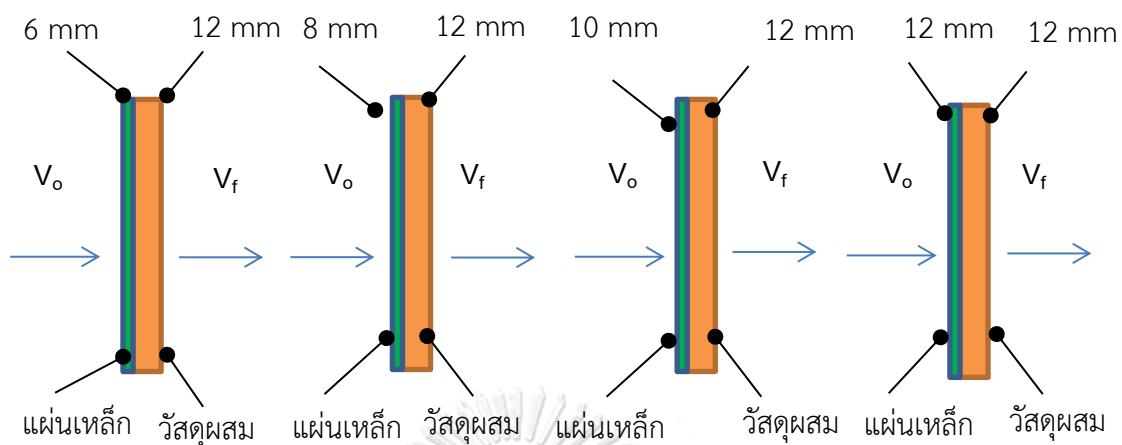


รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและน้ำหนักของแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้า

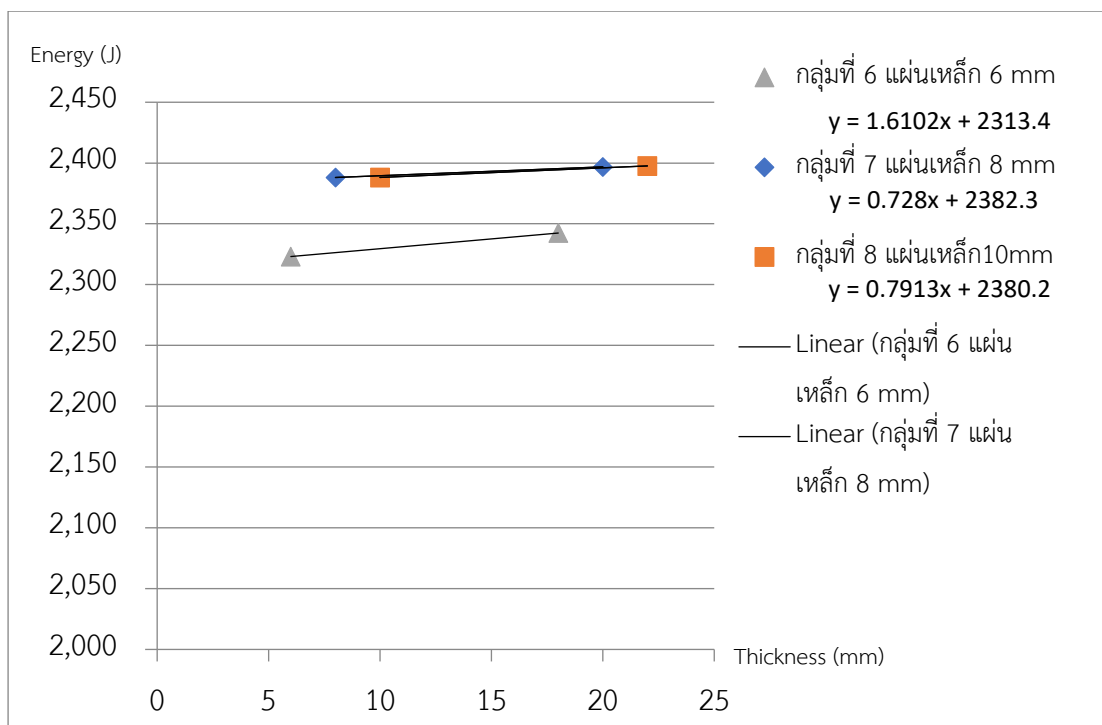
#### 4.4.4.2 แผ่นเหล็กกล้าประกบหน้า

เมื่อเปลี่ยนแผ่นโลหะประกบหน้าเป็นแผ่นเหล็กกล้า เกรด SS400 ที่ความหนาขนาด 6mm, 8mm, 10 mm, และ 12 mm แสดงค่าการทดสอบดังตารางที่ 4.22 ซึ่งพลังงานจลน์จะมีค่ามากกว่าแผ่นประกบอะลูมิเนียม โดยที่แผ่นประกบขนาด 12 mm จะสามารถกันการทะลุของกระสุนได้ และไม่สร้างความเสียหายแก่เนื้อพื้นของวัสดุผสม โดยที่ขนาดความหนา 6 mm, 8 mm และ 10 mm กระสุนสามารถทะลุออกไปได้ มีสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความหนาและค่าพลังงานจลน์ของแผ่นประกบหน้าเหล็กที่ขนาดความหนา 6 mm, 8 mm และ 10 mm เท่ากับ  $Y = 1.6102X + 2,313.4$ ,  $Y = 0.728X + 2,382.3$  และ  $Y = 0.7913X + 2,380.2$  ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.32 โดย Y คือค่าพลังงานจลน์ และ X คือค่าความหนา จากการทดสอบยิงกระสุนปืนจริง มาเปรียบเทียบพบว่า ขนาดความหนาที่น้อยที่สุดสำหรับการป้องกันการเจาะทะลุน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทำนายโดยค่าความหนารวมของแผ่นประกบหน้าเหล็กจะน้อยกว่าแผ่นประกบหน้าอะลูมิเนียมอยู่มาก แสดงค่าความหนารวมดังตารางที่ 4.23 และแผ่นประกบหน้าเหล็กยังมีน้ำหนักมากกว่าแผ่นอะลูมิเนียมอยู่ด้วย แสดงช่วงการใช้งานและการเปรียบเทียบการใช้งานโดยพิจารณาความหนาและน้ำหนักระหว่างแผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นเหล็กกล้าประกบหน้า ดังรูปที่ 4.33

ตารางที่ 4.22 กลุ่มที่ 6,7,8,9 แผ่นเหล็กหนา 6, 8, 10, 12 mm ตามลำดับ



ลักษณะการเรียงตัวของชิ้นงาน	ความเร็วเริ่มต้น $V_o$				ความเร็วปลาย $V_f$				พลังงาน $\Delta E$ (J)	ความเสียหาย
	m/s		เฉลี่ย		m/s		เฉลี่ย			
(6)M(R/S/S/S/S/R)	942.0	954.4	966.8	954.4	71.0	71.3	98.80	80.4	2,342.4	ทะลุ
(8)M(R/S/S/S/S/R)	988.3	976.3	931.7	965.4	80.3	88.7	75.5	81.5	2,396.8	ทะลุ
(10)M(R/S/S/S/S/R)	960.3	967.3	967.7	965.1	75.9	88.1	62.3	75.43	2,397.6	ทะลุ
(12)M(R/S/S/S/S/R)	985.3	975.8	955.8	972.3	-	-	-	-	2,448.5	ไม่ทะลุ

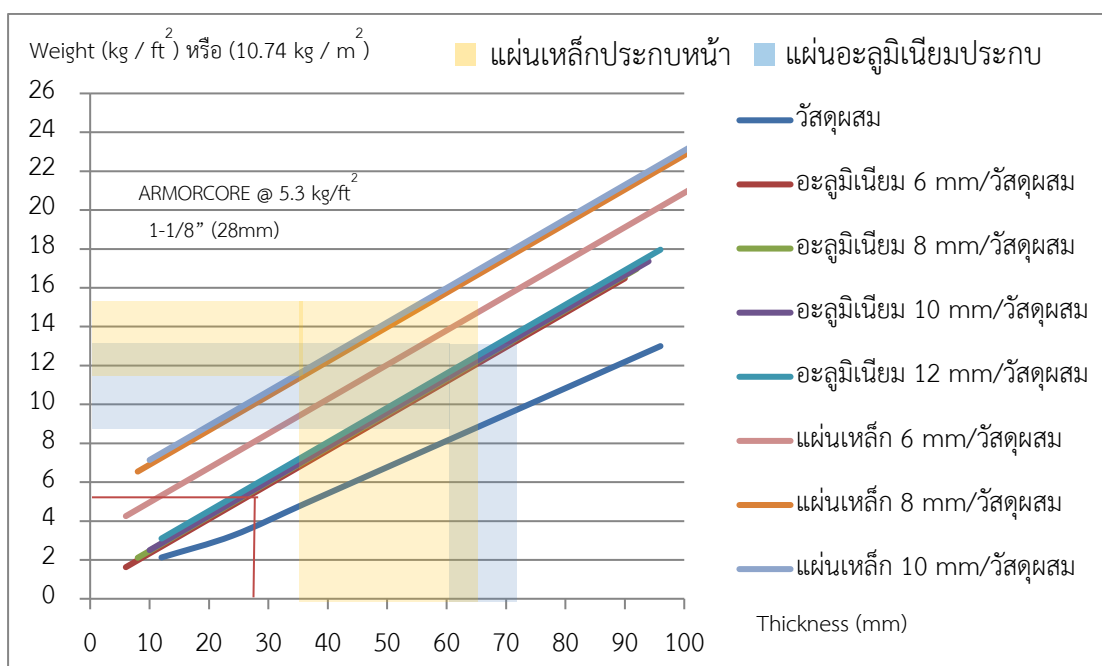


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์และความหนาของวัสดุผสมประกอบด้วยแผ่นเหล็กกล้า

ตารางที่ 4.23 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานตามความหนาของวัสดุเหล็กกล้าและวัสดุผสม

จำนวนแผ่น	แผ่นเหล็กหนา 6 mm /วัสดุผสม		แผ่นเหล็กหนา 8 mm /วัสดุผสม		แผ่นเหล็กหนา 10 mm /วัสดุผสม	
	ความหนา (mm)	น้ำหนัก (kg)	ความหนา (mm)	น้ำหนัก (kg)	ความหนา (mm)	น้ำหนัก (kg)
	1	6	2.12	8	7.14	10
2	18	4.24	20	9.26	22	9.51
3	30	6.36	32	11.3	34	11.63
4	42	8.49	44	13.51	46	13.75
5	54	10.61	56	15.63	58	15.88
6	66	12.73	68	17.75	70	18.00
7	78	14.86	80	19.88	82	20.12

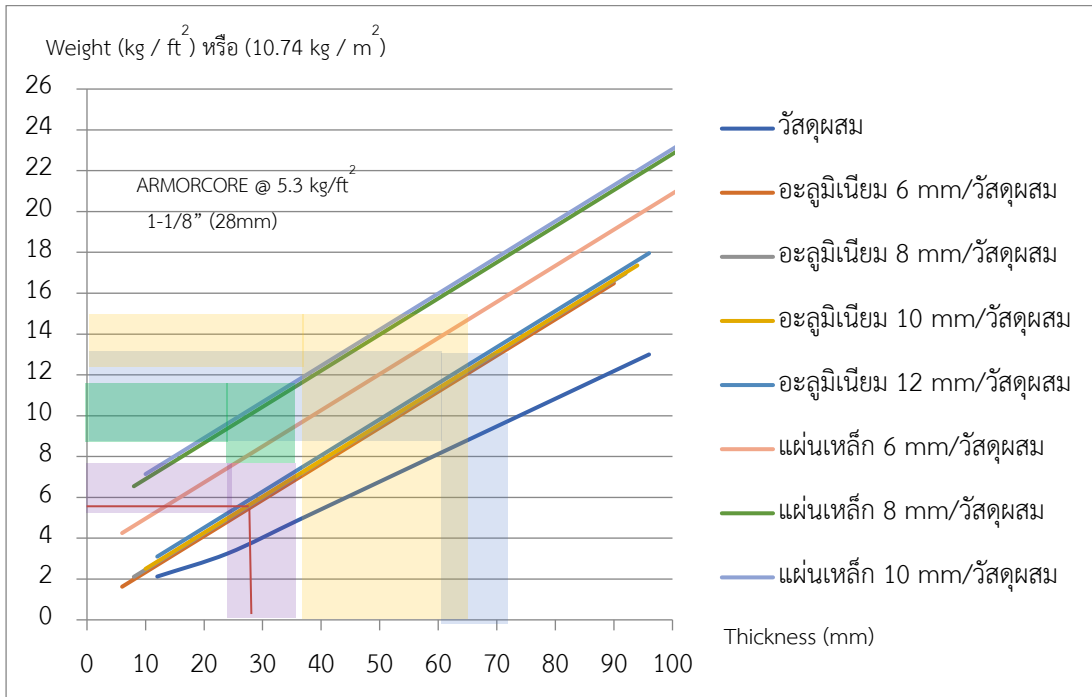
□ ความหนาและน้ำหนักสามารถหยุดกระสุนได้จริง      ■ ความหนาที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและน้ำหนัก

เมื่อนำแผ่นเหล็กกล้าและแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้ามาทดสอบร่วมกับชิ้นงานวัสดุผสม ภายใต้สมมติฐานว่า แผ่นโลหะจะทำหน้าที่ในการลดความเร็วกระสุน และแผ่นวัสดุผสมจะทำหน้าที่ในการหยุดกระสุน พบว่าค่าความหนาที่ได้และน้ำหนักรวมของชิ้นงาน ยังไม่เทียบเท่า ARMORCORE [37] ในทุกกรณี และ เมื่อนำชิ้นงานที่เป็นวัสดุผสมไปไว้ด้านหลังจากการทดสอบพบว่า จะช่วยในการลดความเร็วกระสุนเท่านั้นถ้าจะให้สามารถหยุดกระสุนได้ จำเป็นต้องใช้ความหนามากกว่า 72 mm ซึ่งจะทำให้มีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น โดยถ้านำแผ่นวัสดุผสมมาไว้ด้านหน้าและแผ่นอะลูมิเนียมไว้ด้านหลังโดยมี สมมติฐานว่า แผ่นวัสดุผสมจะทำหน้าที่ในการลดความเร็วและลดความต้านทานการเจาะทะลุ และแผ่นโลหะจะทำหน้าที่ในการหยุดกระสุน แสดงค่าการทดสอบดังตารางที่ 4.28 สำหรับแผ่นอะลูมิเนียมประกบหลัง โดยแสดงลักษณะความเสียดังตารางที่ 4.29 และตารางที่ 4.31 สำหรับแผ่นเหล็กกล้าประกบหลัง จากผลการทดสอบแผ่นอะลูมิเนียมประกบหลังพบว่า กระสุนสามารถหยุดได้ภายใต้ความหนารวมระหว่าง 24-34 mm และมีน้ำหนักกระสุนระหว่าง 5.24 – 6.75 kg มีความหนาและน้ำหนักใกล้เคียงกันกับ ARMORCORE และน้ำหนักรวมน้อยกว่าแผ่นเหล็กกล้า นอกจากนี้ค่าพลังงานที่ได้จากการนำแผ่นอะลูมิเนียมขนาดความหนา 6 mm, 8 mm, 10 mm, และ 12 mm ไปประกบด้านหลัง มีค่าพลังงานจลน์สูงกว่าการนำแผ่นไปประกบด้านหน้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แผ่นวัสดุผสมที่ทำมาจากพอลิเมอร์เหมาะที่จะนำมาใช้ในการลดแรงปะทะมากกว่าที่จะนำมาใช้เพื่อการหยุดกระสุน โดยรูปที่ 4.35 แสดงการเปรียบเทียบความหนารวมและน้ำหนักของชิ้นงานรวมในทุกกรณี โดย

แสดงผลการทดสอบแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้าดังตารางที่ 4.24 - 4.27 และแสดงตารางการทดสอบแผ่นเหล็กประกบหลังดังตารางที่ 4.29-4.31



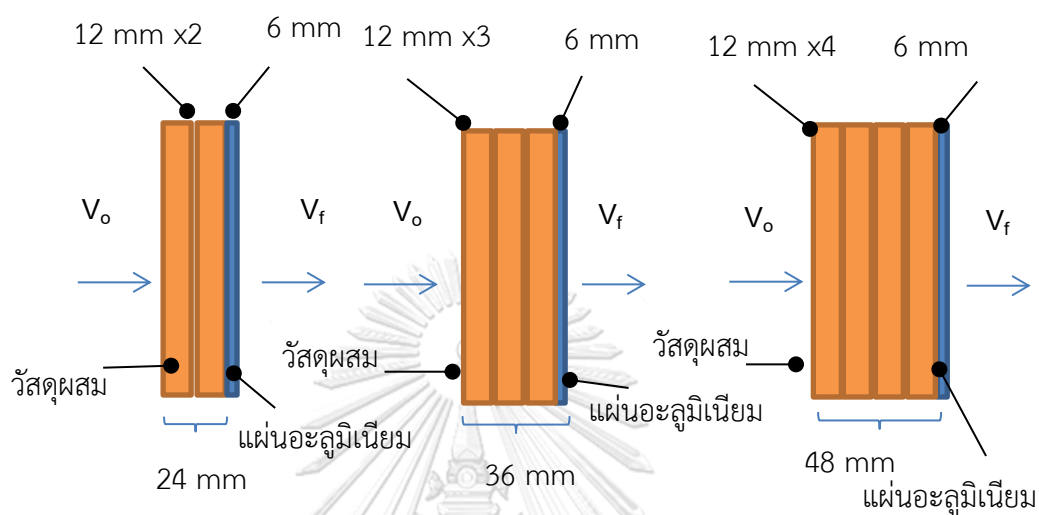
รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและน้ำหนัก

- แผ่นเหล็กประกบหลัง      ■ แผ่นอะลูมิเนียมประกบ
- แผ่นเหล็กประกบหน้า      ■ แผ่นอะลูมิเนียมประกบ

#### 4.4.5 การดูดซับพลังงานจลน์จากการเลือกใช้แผ่นโลหะประกบหลัง

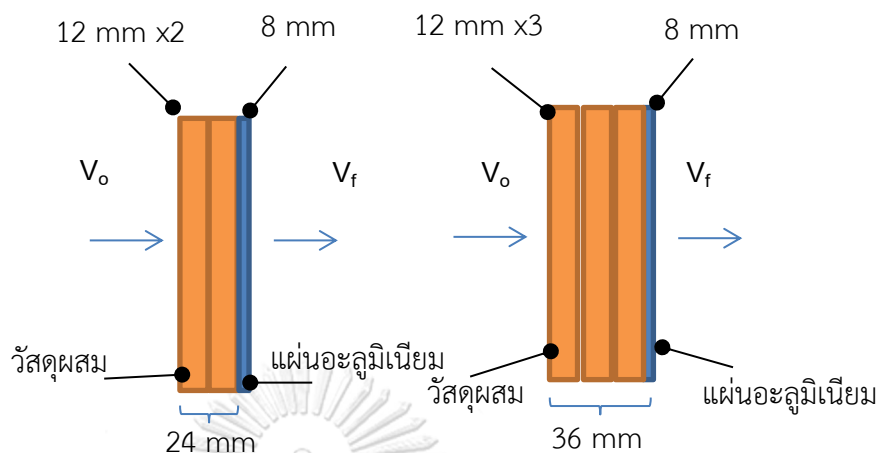
##### 4.4.5.1 แผ่นอะลูมิเนียมประกบหลัง

ตารางที่ 4.24 กลุ่มที่ 10 แผ่นอะลูมิเนียม 6 mm ประกบหน้าด้วยวัสดุผสม



ลักษณะการ เรียงตัวของ ชิ้นงาน	ความเร็วเริ่มต้น $V_o$				ความเร็วปลาย $V_f$				พลังงาน $\Delta E$ (J)	ความ เสียหาย
	m/s		เฉลี่ย		m/s		เฉลี่ย			
(R/S/S/S/S/ S/R) x2/A	985.1	927.3	958.5	957.0	78.6	75.9	87.7	80.7	2,355.0	ทะลุ
(R/S/S/S/S/ S/R) x3/A	993.1	982.1	964.5	979.9	-	-	-	-	2,486.9	ไม่ทะลุ
(R/S/S/S/S/ S/R) x4/A	975.1	964.1	966.5	968.6	-	-	-	-	2,429.7	ไม่ทะลุ

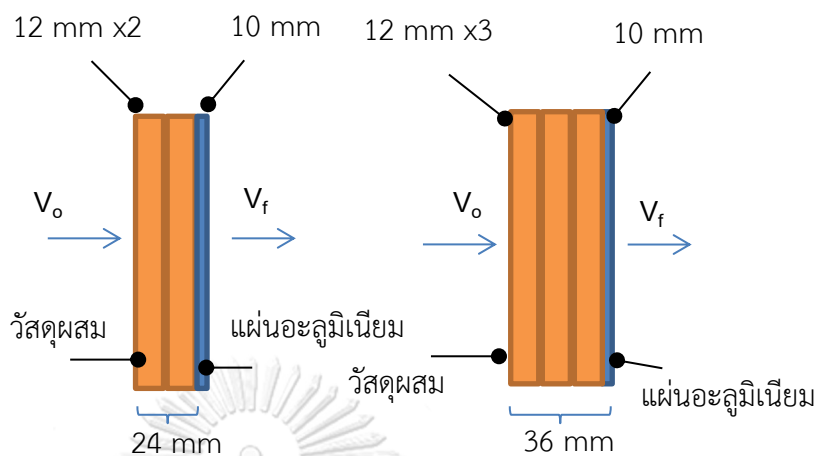
ตารางที่ 4.25 กลุ่มที่ 11 แผ่นอะลูมิเนียม 8 mm ประกอบหน้าด้วยวัสดุผสม



ลักษณะ การเรียง ตัวของ ชิ้นงาน	ความเร็วเริ่มต้น $V_o$				ความเร็วปลาย $V_f$				พลังงาน $\Delta E$ (J)	ความ เสียหาย
	m/s		เฉลี่ย		m/s		เฉลี่ย			
(R/S/S/S/S/R) x2/A	975.5	965.4	946.0	962.3	128.7	97.5	85.8	104.0	2,370.4	ทะลุ
(R/S/S/S/S/R) x3/A	995.5	925.3	995.4	972.1	-	-	-	-	2,447.3	ไม่ทะลุ

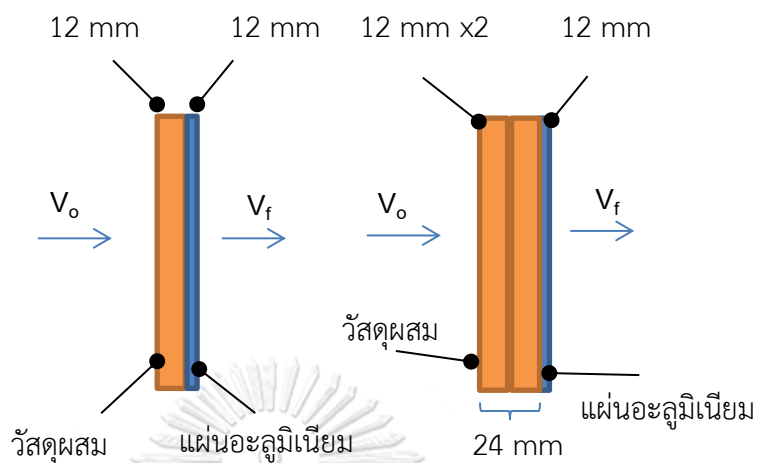


ตารางที่ 4.26 กลุ่มที่ 12 แผ่นอะลูมิเนียม 10 mm ประกอบหน้าด้วยวัสดุผสม



ลักษณะการ เรียงตัวของ ชิ้นงาน	ความเร็วเริ่มต้น $V_o$			ความเร็วปลาย $V_f$				พลังงาน $\Delta E$	ความ เสียหาย	
	m/s			เฉลี่ย				(J)		
(R/S/S/S/S/R) x2/A	964.9	963.8	966.1	964.9	95.4	77.7	88.6	87.2	2,391.8	ทะลุ
(R/S/S/S/S/R) x3/A	977.3	968.1	980.2	975.2	-	-	-	-	2,463.1	ไม่ทะลุ

ตารางที่ 4.27 กลุ่มที่ 13 แผ่นอะลูมิเนียม 12 mm ประกอบหน้าด้วยวัสดุผสม



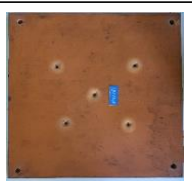
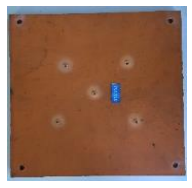






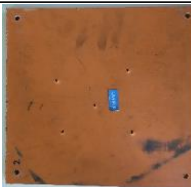



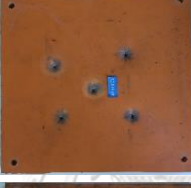



















ลักษณะ การเรียง ตัวของ ชิ้นงาน	ความเร็วเริ่มต้น $V_o$				ความเร็วปลาย $V_f$				พลังงาน $\Delta E$	ความ เสียหาย
	m/s		เฉลี่ย		m/s		เฉลี่ย		(J)	
(R/S/S/S/S/R/A)	985.3	961.8	968.7	971.9	159.7	148.7	155.8	154.7	2,384.6	ทะลุ
(R/S/S/S/S/R) x2/A	969.3	959.3	970.7	966.4	-	-	-	-	2,419.0	ไม่ทะลุ

ตารางที่ 4.28 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานตามความหนาของวัสดุผสมและแผ่นอะลูมิเนียม

จำนวนแผ่น	วัสดุผสม		วัสดุผสม/ อะลูมิเนียม 6 mm		วัสดุผสม/ อะลูมิเนียม 8 mm		วัสดุผสม/ อะลูมิเนียม 10 mm		วัสดุผสม/ อะลูมิเนียม 12 mm	
	ความ หนา	น้ำหนัก	ความ หนา	น้ำหนัก	ความ หนา	น้ำหนัก	ความ หนา	น้ำหนัก	ความ หนา	น้ำหนัก
	(mm)	(kg)	(mm)	(kg)	(mm)	(kg)	(mm)	(kg)	(mm)	(kg)
1	12	2.12	12	2.12	12	2.12	12	2.12	12	2.12
2	24	4.25	18	3.65	20	4.12	22	4.62	24	5.23
3	36	6.37	30	5.77	32	6.25	34	6.75	36	7.35
4	48	8.49	42	7.89	44	8.37	46	8.87	48	9.47
5	60	10.62	54	10.02	56	10.49	58	10.99	60	11.60
6	72	12.74	66	12.14	68	12.62	70	13.12	72	13.72
7	84	14.86	78	14.26	80	14.74	82	15.24	84	15.84
8	96	16.98	90	16.39	92	16.86	94	17.36	96	17.97

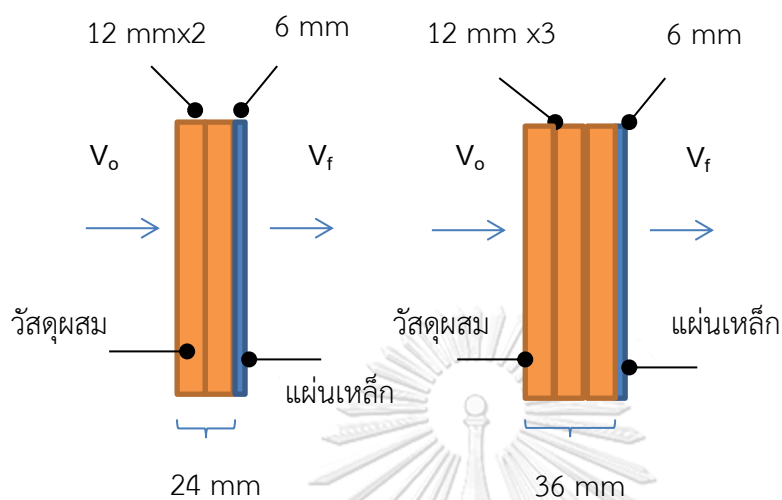
  ความหนาและน้ำหนักที่สามารถหยุดกระสุนได้จริง

ตารางที่ 4.29 ลักษณะความเสียหายของชิ้นงานแบบแผ่นอลูมิเนียมประกบหลัง

ความหนา แผ่น	แผ่นที่ 1		แผ่นที่ 2		แผ่นที่ 3		แผ่นที่ 4	
	ด้านหน้า	ด้านหลัง	ด้านหน้า	ด้านหลัง	ด้านหน้า	ด้านหลัง	ด้านหน้า	ด้านหลัง
6 mm								
ขนาดรู (mm)	4.00	5.00	8	16.00	20.00	31.00	50.00	56.00
8 mm								
ขนาดรู (mm)	4.00	5.00	7.00	14.00	16.00	33.00	20.00	35.00
10 mm								
ขนาดรู (mm)	4.00	4.00	6.00	10.00	14.00	31.00	18.00	25.00
12 mm								
ขนาดรู (mm)	3.00	5.00	4.00	26.00	6.50	20.00		

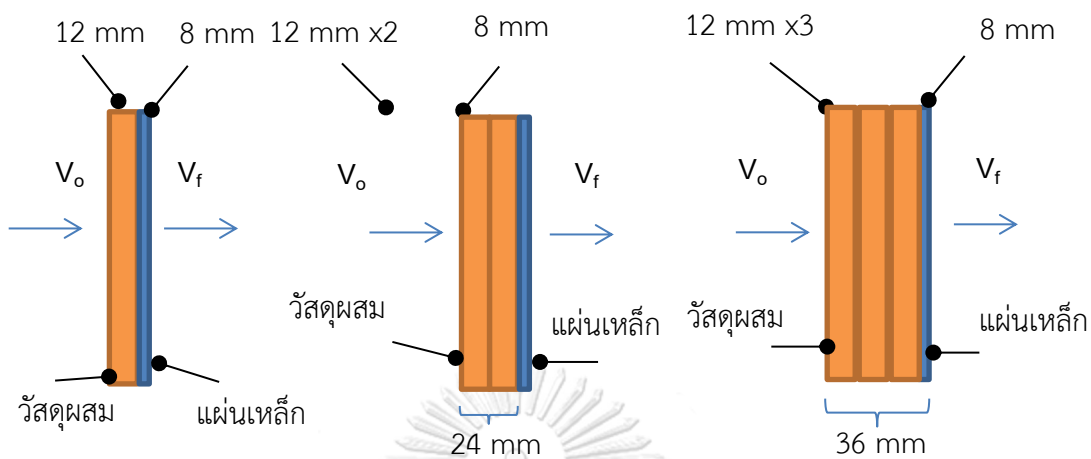
## 4.4.5.2 แผ่นเหล็กกล้าประกบหลัง

ตารางที่ 4.30 กลุ่มที่ 14 แผ่นเหล็กกล้า 6 mm ประกบหน้าด้วยวัสดุผสม



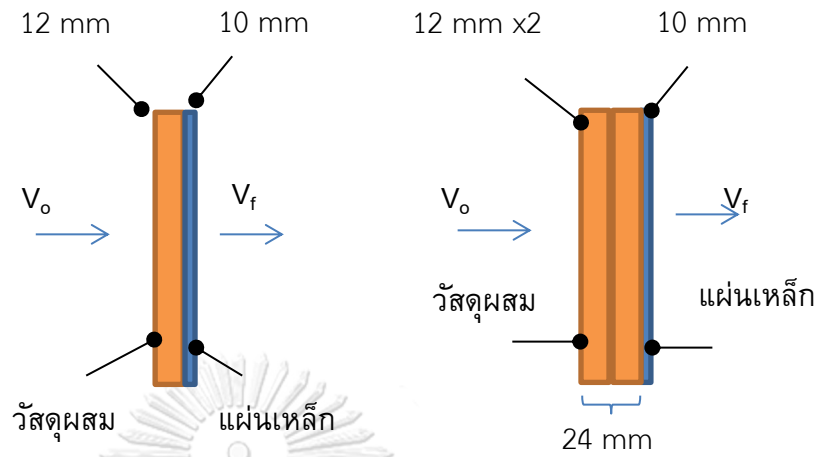
ลักษณะ การเรียง ตัวของ ชิ้นงาน	ความเร็วเริ่มต้น $V_0$				ความเร็วปลาย $V_f$				พลังงาน $\Delta E$	ความ เสียหาย
	m/s		เฉลี่ย		m/s		เฉลี่ย		(J)	
(R/S/S/S/S/R) x2 / (6)M	945.3	987.3	938.6	957.1	75.6	66.9	81.7	74.7	2,358	ทะลุ
(R/S/S/S/S/R) x3 / (6)M	943.1	982.1	974.1	966.4	-	-	-	-	2,419	ไม่ทะลุ

ตารางที่ 4.31 กลุ่มที่ 15 แผ่นเหล็กกล้า 8 mm ประกบหน้าด้วยวัสดุผสม



ลักษณะ การเรียงตัว ของชิ้นงาน	ความเร็วเริ่มต้น $V_o$				ความเร็วปลาย $V_f$				พลังงาน $\Delta E$	ความ เสียหาย
	m/s		เฉลี่ย		m/s		เฉลี่ย		(J)	
(R/S/S/S/S/R) / (8)M	966.1	953.6	943.2	954.3	77.8	65.1	71.2	71.4	2,345.5	ทะลุ
(R/S/S/S/S/R)x2 / (8)M	965.4	965.4	955.1	962.3	-	-	-	-	2,398.4	ไม่ทะลุ
(R/S/S/S/S/R) x3 / (8)M	985.5	935.8	984.4	961.8	-	-	-	-	2,396.3	ไม่ทะลุ

ตารางที่ 4.32 กลุ่มที่ 16 แผ่นเหล็กกล้า 10 mm ประกอบหน้าด้วยวัสดุผสม



ลักษณะ การเรียง ตัวของ ชิ้นงาน	ความเร็วเริ่มต้น $V_o$				ความเร็วปลาย $V_f$				พลังงาน $\Delta E$	ความ เสียหาย
	m/s		เฉลี่ย		m/s		เฉลี่ย		(J)	
(R/S/S/S/S/R) x2/A	944.8	953.8	996.1	964.9	-	-	-	-	2,411.3	ไม่ทะลุ
(R/S/S/S/S/R) x3/A	947.3	962.1	979.2	962.9	-	-	-	-	2,401.2	ไม่ทะลุ

ตารางที่ 4.33 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานตามความหนาของวัสดุผสมและแผ่นเหล็กกล้า

จำนวนแผ่น	วัสดุผสม		วัสดุผสม/เหล็ก 6 mm		วัสดุผสม/เหล็ก 8 mm		วัสดุผสม/เหล็ก 10 mm		วัสดุผสม/เหล็ก 12 mm	
	ความหนา	น้ำหนัก	ความหนา	น้ำหนัก	ความหนา	น้ำหนัก	ความหนา	น้ำหนัก	ความหนา	น้ำหนัก
	(mm)	(kg)	(mm)	(kg)	(mm)	(kg)	(mm)	(kg)	(mm)	(kg)
1	12	2.12	12	2.12	12	2.12	12	2.12	12	2.12
2	24	4.25	18	6.37	20	8.66	22	9.26	24	11.05
3	36	6.37	30	8.50	32	10.79	34	11.38	36	13.17
4	48	8.49	42	10.62	44	12.91	46	13.50	48	15.29
5	60	10.62	54	12.74	56	15.03	58	15.62	60	17.41
6	72	12.74	66	14.87	68	17.16	70	17.74	72	19.53
7	84	14.86	78	16.99	80	19.28	82	19.86	84	21.65
8	96	16.98	90	19.11	92	21.4	94	21.98	96	23.77

ความหนาและน้ำหนักที่สามารถหยุดกระสุนได้จริง



## บทที่ 5

### วิจารณ์ผลการวิจัย

#### 5.1 ผลของการใช้วัสดุผสมที่มีจำนวนชั้นลวดตาข่ายเหล็กต่างกันต่อการป้องกันกระสุน

การนำยางพารามาใช้เป็นเนื้อพื้นเสริมแรงด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็ก ชั้นรูปที่ขึ้นขนาดความหนา ชั้นงานรวมที่ 12 mm โดยเสริมแรงด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็กที่จำนวนชั้นต่างกันสูงสุดเท่ากับห้าชั้น ซึ่งแต่ละชั้นจะทำมุมที่  $0^\circ$  ซึ่งจากตารางที่ 3.3 พบว่า เมื่อกำหนดความหนาชั้นงานรวมสำหรับชั้นรูปให้คงที่ที่ 12 mm สามารถใส่ลวดตาข่ายเหล็กเพื่อเสริมแรงได้ทั้งหมด 5 ชั้น ซึ่งเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นมากกว่า 5 ชั้น จะทำให้ชั้นงานเสียรูปและมีเส้นลวดตาข่ายเหล็กที่ใช้เสริมแรงบางส่วนโผล่ออกมาจากชั้นงานที่นำไปขึ้นรูป จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของเส้นลวดตาข่ายเหล็กจะส่งผลโดยตรงต่อความหนาแน่นของวัสดุผสม โดยชั้นงานที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้นมีความหนาแน่นเท่ากับ  $1,975.9 \text{ kg/m}^3$  หรือคิดเป็นอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 6.7% เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นงานที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็ก จากการเสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นกับวัสดุอื่น ๆ ที่นิยมนำมาใช้ในการป้องกันกระสุน เช่น เคพลาที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ  $1,450 \text{ kg/m}^3$  [38] พบว่าวัสดุผสมจะมีความหนาแน่นมากกว่าเคพลา เท่ากับ 36% และเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแก้วที่มีความหนาแน่นเท่ากับ  $2,540 \text{ kg/m}^3$  [39] พบว่าวัสดุผสมมีความหนาแน่นน้อยกว่าเท่ากับ 22% และเมื่อนำมาทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุโดยใช้เข็มเจาะที่พัฒนาขึ้น โดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM F1342 เพื่อนำมาออกแบบความหนาของวัสดุที่สามารถป้องกันกระสุนได้ โดยค่าพลังงานการแตกหักของวัสดุผสมมีค่าเท่ากับ  $126.68 \text{ kJ/m}^2$  เมื่อนำไปคำนวณความหนารวมที่ใช้ในการป้องกันกระสุน จะได้ความหนาที่ออกแบบเท่ากับ 61 mm ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาที่ใช้ทดสอบการยิงกระสุนจริงเท่ากับ 72 mm ซึ่งความหนาที่ออกแบบจะน้อยกว่าความหนาที่กันกระสุนได้ โดยคิดเป็นความคลาดเคลื่อนเท่ากับ  $\pm 25\%$  เนื่องจากความเร็วเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพลังงานจลน์และการเสียรูปของชั้นงาน ซึ่งความเร็วที่ใช้ในการทดสอบมีความแตกต่างกันมาก ทำให้ผลลัพธ์ในการคำนวณมีการคลาดเคลื่อนมาก โดยจากการทดสอบพบว่าความเร็วที่เพิ่มขึ้นทำให้วัสดุผสมสามารถดูดซับพลังงานได้มากขึ้น เนื่องจากพลังงานจลน์ขึ้นอยู่กับความเร็ว โดยอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถดูดซับพลังงานได้เพียง 3.83%, 4.13% และ 4.65% เมื่อเทียบกับกระสุนจริง โดยใช้ความเร็วในการทดสอบเท่ากับ 10 mm/m, 10 cm/m, และ 1m/min ตามลำดับ ซึ่งจากการเพิ่มความเร็วของหัวทดสอบทำให้ต้องใช้พลังงานจลน์ในการเจาะทะลุเพิ่มขึ้น

จากการทดสอบที่ใช้อุปกรณ์ทดสอบที่พัฒนาขึ้นพบว่า การเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้นเส้นลวดตาข่ายเหล็กสามารถช่วยดูดซับพลังงานได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มเส้นลวดตาข่ายเหล็กจำนวน 5 ชั้น สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 9.71 J ซึ่งเมื่อเทียบกับการไม่ได้เสริมด้วยเส้นลวดโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 28.1% และเมื่อนำชิ้นงานวัสดุผสมเสริมด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้นจำนวนสองชั้นมาซ้อนทับกัน โดยคิดความหนาเป็นสองเท่า หรือ 24 mm พบว่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความหนาเท่ากับ 17% จากการเสริมแรงด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็กจำนวน 5 ชั้น ซึ่งเป็นจำนวนชั้นลวดตาข่ายที่มากที่สุดของวัสดุผสมที่ความหนาครั้งที่ 12 mm เนื่องจากเป็นขนาดความหนาสูงสุดของแม่พิมพ์ โดยคิดเป็นอัตราส่วนเท่ากับ 2.4 mm/Layer เมื่อนำชิ้นงานวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น นำไปทดสอบความต้านทานการดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039 พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) เท่ากับ  $5.01 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> และ ค่าความแข็งแรงจุดคราก (Yield Strength 2%) เท่ากับ  $0.58$  N/mm<sup>2</sup> หรือ  $5.80 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup> และมีความอดุลัสของยัง เท่ากับ 0.05 GPa ซึ่งการเพิ่มลวดตาข่ายเหล็กทำให้ชิ้นงานมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้นแต่จะมีความเครียดลดลง เพราะว่าวัสดุเสริมแรงมีความแข็งแรงมากกว่าเนื้อพื้นที่เป็นยาง สามารถรับแรงดึงได้มากกว่ายาง ทำให้ชิ้นงานวัสดุผสมแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น และในการทดสอบความต้านทานแรงดึงพบว่าชิ้นงานที่เสริมด้วยลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น มีค่ามอดุลัสของยังสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็กและยางธรรมชาติทั่วไปที่มีค่าเท่ากับ 0.01-0.03 GPa [35] แสดงดังตารางที่ 4.6 สรุปคือการใส่ลวดตาข่ายเหล็กสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันกระสุนได้ ซึ่งการใส่ลวดตาข่ายเหล็กจะเปลี่ยนโครงสร้างของชิ้นงานดั้งเดิมคือ ถ้าไม่ใส่ลวดตาข่ายเหล็กชิ้นงานจะมีความเหนียวมาก ความแข็งแรงต่ำ แต่เมื่อใส่เส้นลวดตาข่ายเหล็กทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถทรงตัวหรือขึ้นรูปโครงสร้างที่จะป้องกันได้ง่าย ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานนั้นๆ

จากตารางที่ 4.2 และ 4.13 เป็นผลการทดสอบในห้องทดลองและการยิงกระสุนปืนจริง พบว่าการเพิ่มขึ้นของเส้นลวดตาข่ายเหล็กมีส่วนช่วยในการดูดซับพลังงานของกระสุนปืนได้เท่ากับ 8.08% เพราะการเสริมแรงด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็ก ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานวัสดุเพิ่มขึ้น จึงส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในการทำให้ชิ้นงานเสียหายจากการเจาะทะลุและการดึงเพิ่มมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมแรง แสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.7 เมื่อนำชิ้นงานที่ฉีกขาดจากการทดสอบความต้านทานแรงดึงไปตรวจสอบด้วยกล้อง SEM โดยนำชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมลวดตาข่ายเหล็ก และชิ้นงานที่เสริมด้วยลวดตาข่ายเหล็กตั้งแต่ 1-5 ชั้น ไปทดสอบพบว่าลักษณะความเสียหายของพื้นที่หน้าตัดของเนื้อพื้นวัสดุผสมที่ฉีกขาดจะมีลักษณะเหนียวและมีลักษณะผิวขรุขระไม่เรียบ และจะมีสีอ่อนกว่าสีดั้งเดิม ซึ่งเป็นผลจากการรับแรงที่มากกว่าความเค้นจุดครากของวัสดุทำให้วัสดุเสียรูปและไม่สามารถกลับคืนสภาพเดิมได้ เมื่อตรวจสอบบริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อพื้นวัสดุกับวัสดุเสริมแรงพบว่าเนื้อพื้นมีการ

แยกตัวออกจากวัสดุเสริมแรง หรือมีขนาดช่องว่างใหญ่ขึ้น โดยทุกชิ้นงานทดสอบ พบว่ามีลักษณะความเสียหายที่คล้ายคลึงกัน ตามที่ได้กล่าวไปข้างต้น เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานมีลักษณะคล้ายกันทุกชิ้น เช่น มีขนาดตามแบบแม่พิมพ์ ไม่มีรอยแตกร้าว พื้นผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีฟองอากาศภายในชิ้นงาน และสามารถควบคุมอัตราส่วนผสมให้คงที่ได้เท่ากันตลอดชิ้นงาน จึงทำให้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีคุณสมบัติคงที่และคล้ายกันทุกชิ้นงาน

## 5.2 ผลของการใช้โลหะและวัสดุผสมต่อการป้องกันกระสุน

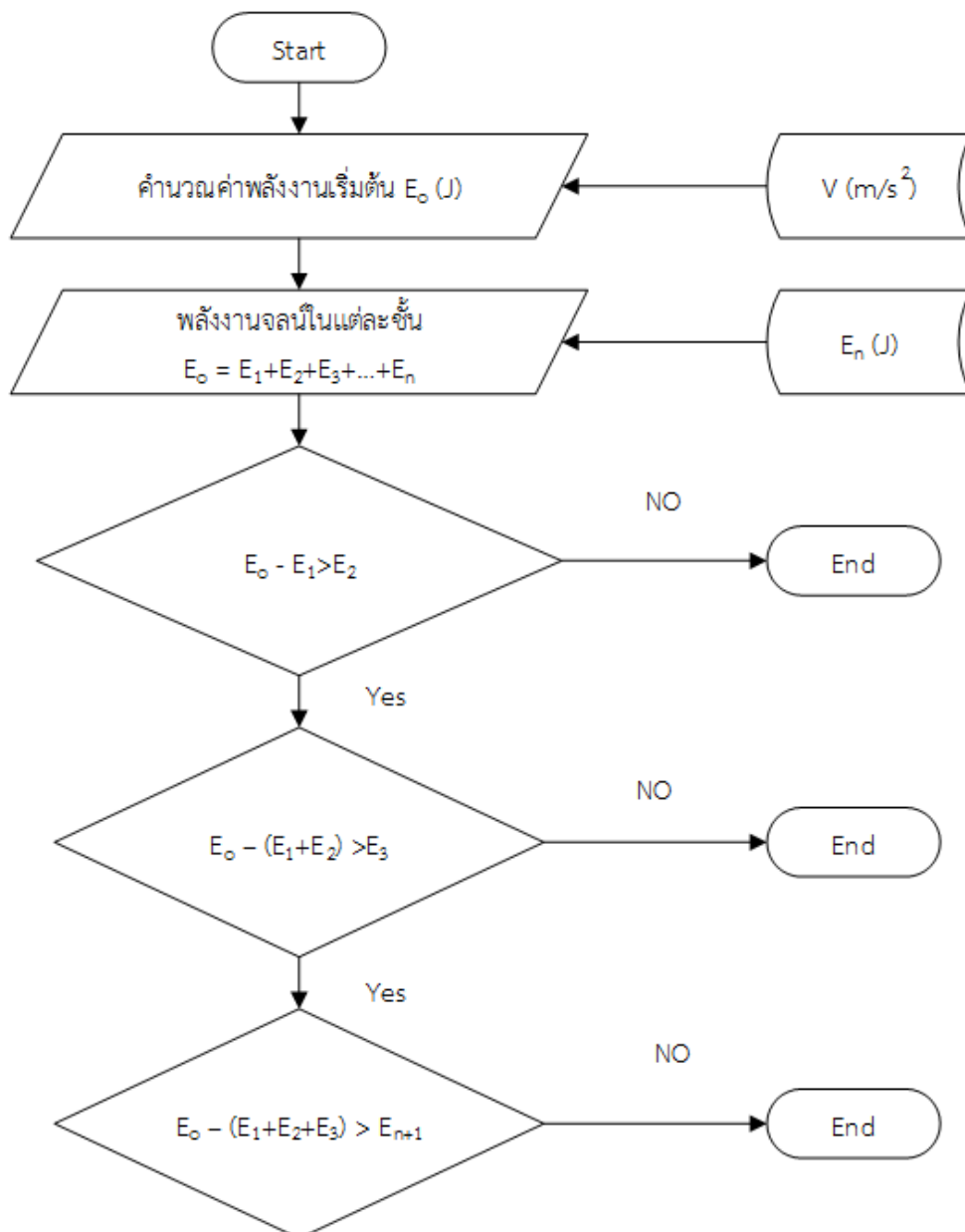
จากการทดสอบโดยใช้วัสดุผสมอย่างเดียว ในการดูดซับพลังงานจลน์จากการเสริมแรงด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็ก จะต้องทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานในการที่จะป้องกันกระสุนเพิ่มมากขึ้น โดยความหนาขนาด 12 mm ยังไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้ป้องกันกระสุนได้ ซึ่งจากตารางที่ 4.21 พบว่าความหนาแน่นที่สามารถหยุดกระสุนปืนเอ็ม 16 ได้คือความหนา 72 mm มีน้ำหนักต่อพื้นที่เท่ากับ  $12.73 \text{ kg/ft}^2$  หรือ  $136.72 \text{ kg/m}^2$  ซึ่งมีน้ำหนักต่อพื้นที่มาก จึงต้องนำมาใช้งานร่วมกับวัสดุอื่นโดยการประกบกับแผ่นโลหะ ซึ่งจากการทดสอบของ M.R. Abdullah และ Cantwell [29] ได้ใช้แผ่นอะลูมิเนียมมาช่วยในการป้องกันกระสุน โดยใช้งานร่วมกับเส้นใยแก้วผสมอีพ็อกซีที่เป็นวัสดุผสมสามารถเพิ่มความต้านทานการเจาะทะลุได้ ดังนั้นแผ่นโลหะที่เลือกใช้ในงานทดสอบจะเป็นแผ่นอะลูมิเนียม เกรด A5083 และแผ่นเหล็กกล้า เกรด SS400 จากการทดสอบแผ่นโลหะดังรูปที่ 4.22 พบว่าแผ่นเหล็กจะดูดซับพลังงานได้ดีกว่าแผ่นอะลูมิเนียมแต่จะมีน้ำหนักมากกว่า จากการใช้โลหะเพื่อช่วยในการดูดซับพลังงาน พบว่าแผ่นอะลูมิเนียมต้องใช้ความหนาในการป้องกันกระสุนมากกว่าแผ่นเหล็กกล้าแต่จะมีน้ำหนักเบากว่าดังรูปที่ 4.33

จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุโดยอ้างอิงจากวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM F134 [19] จากสมการที่ 2.11 ของ M.R. Abdullah และ Cantwell [29] พบว่าเมื่อนำแผ่นวัสดุผสมที่ความหนาเท่ากันมาซ้อนทับกัน พลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุจะเพิ่มขึ้นเพียง 17% ดังรูปที่ 4.3 และส่งผลให้ค่าพลังงานการแตกหักเพิ่มขึ้นเช่นกัน เพราะชิ้นงานไม่ได้เป็นชิ้นเดียวกัน จากการทดสอบยิงกระสุนปืนจริงพบว่าพลังงานที่ได้จากการเพิ่มความหนาไม่ได้เพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากกระสุนปืนจะถูกทำลายให้มีขนาดเล็กลงเมื่อปะทะกับเกราะกันกระสุนและเจาะทะลุแผ่นโลหะชั้นแรกทำให้ความเร็วและขนาดกระสุนลดลง พบได้เช่นเดียวกับการทดสอบของ M.Grujicic และ B.Pandurangan [40] เป็นการทดสอบแบบจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเมื่อกระสุนปะทะกับแผ่นทดสอบ จะเกิดความเค้นสูงและเกิดคลื่นกระแทก (Shockwave) ตลอดความหนาของชิ้นงานทดสอบ และจะกระจายตัวออกไปยังด้านข้างในทิศทางเดียวกันกับแรงปะทะ

ของชิ้นงานทดสอบ ตลอดความหนาของชิ้นงานภายใต้การเจาะทะลุของกระสุนจะมีการสูญเสียเนื้อวัสดุทั้งแผ่นทดสอบและกระสุนปืน ดังนั้นเมื่อกระสุนมีการเสีयरูป ทำให้เหลือพลังงานอยู่เพียงบางส่วนสำหรับใช้ในการเจาะทะลุวัสดุผสมในชั้นถัดไป ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทางแบบจำลองในการวิเคราะห์การรับแรงกระแทกสำหรับวัสดุผสม (Modeling of impact on composite structure) [41] ที่สามารถสร้างสมการการเคลื่อนที่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โมเดลแบบมวลวัตถุ-สปริงแบบมีตัวหน่วง (The equation of motion of a single-degree-of-freedom system with viscous damping) ไว้สำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานระดับดีกรีอิสระเดี่ยว (Single of degree of freedom) ซึ่งแบบจำลองการเคลื่อนที่นี้สามารถวิเคราะห์ชิ้นงานในระดับดีกรีอิสระที่มากกว่าสองดีกรีขึ้นไปและเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์แบบระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานวัสดุผสมที่มีดีกรีอิสระมากกว่า 1 สามารถนำสมการการเคลื่อนที่มาอธิบายในลำดับชั้นแต่ละชั้นได้ตามทฤษฎีการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ (Dynamics) ซึ่งในแต่ละชั้นจะมีตัวแปรไม่ทราบค่าที่ต้องอธิบายหรือนิยามให้สอดคล้องกับพฤติกรรมของแบบจำลองเช่น สปริง ตัวหน่วง เงื่อนไขที่ขอบ (Boundary condition) และเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) เป็นต้น ซึ่งทฤษฎีหลักในการวิเคราะห์ จะใช้หลักการสมดุลพลังงาน (Energy-balance model) โดยการเคลื่อนที่ของกระสุนจะมีพลังงานจลน์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์จากพลังงานจลน์ที่ใช้ประทะในแต่ละหน้าตัดของชิ้นงานวัสดุจากการสมดุลพลังงาน ดังนั้นผลต่างจากรายการทดสอบที่ 4.15 เป็นผลต่างของพลังงานที่เหลืออยู่ในแต่ละความหนารวมประมาณ 12-50 J ทั้งในแบบที่ไม่มีแผ่นโลหะประกบและมีโลหะประกบ ทำให้สรุปได้ว่าพลังงานจลน์ทั้งหมดสามารถหักลบออกจากวัสดุชั้นแรกทำให้เหลือพลังงานบางส่วนเพื่อวิเคราะห์พลังงานที่ส่งผ่านในชั้นถัดไป จึงส่งผลต่อความหนาของแผ่นวัสดุที่จะใช้ในการป้องกันกระสุนหรือหยุดหัวกระสุนมีความหนาเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 5.1 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ตามแบบจำลองในการวิเคราะห์การรับแรงกระแทกสำหรับวัสดุผสม

จากการทดสอบชิ้นงานจะมีลักษณะความเสียหายของชิ้นงานเป็นไปตามสมการของ W.J. Cantwell และ J. Morton [13, 15] คือขนาดความเสียหายเท่ากับ  $2(r+t)$  โดย  $r$  คือรัศมีของวัตถุทรงกลม และ  $t$  คือความหนาของแผ่นทดสอบ ซึ่งอธิบายได้ว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูทะลุจะแปรผันตรงกับความหนาของวัสดุที่กระสุนผ่าน แสดงดังรูปที่ 4.20 และ 4.23 ดังนั้นจากการทดสอบการพัฒนาวัสดุผสมที่มียางพาราเป็นส่วนประกอบ เหมาะที่จะใช้ในการลดความเร็วกระสุนแทนที่จะใช้ในการหยุดหัวกระสุนโดยตรง เพราะจากการทดสอบที่ความหนาของวัสดุผสมที่ใช้ในการหยุดกระสุนร่วมกับแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้าที่มีความหนา 6 mm, 8 mm, 10 mm และ 12 mm เท่ากับ 66 mm, 68 mm, 70 mm, 60 mm ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาเมื่อใช้วัสดุผสมในการลดความเร็วปะทะของกระสุนที่ใช้ร่วมกับแผ่นอะลูมิเนียมประกบหลังที่มีความหนา 6 mm, 8 mm, 10 mm และ 12 mm เท่ากับ 30 mm, 32 mm, 34 mm และ 24 mm

ตามลำดับ สามารถหยุดกระสุนปืนได้ที่ความหนาน้อยกว่าโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 54-60% เนื่องจากการเรียงตำแหน่งของแผ่นโลหะ ทำให้กระสุนถูกดูดซับพลังงานในชั้นของวัสดุผสมและลดความเร็วของกระสุนลง



รูปที่ 5.1 แผนภาพการวิเคราะห์พลังงานในแต่ละชั้น

### 5.3 ผลของการใช้แผ่นโลหะประเภทที่ต่างกันที่มีผลต่อความหนาในการป้องกันกระสุน

การทดสอบโดยการนำแผ่นโลหะมาประกบหน้าทั้งสองแบบคือ แผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นเหล็กกล้า นอกจากผลการทดสอบจากการใช้วัสดุที่แตกต่างกัน แล้วยังมีผลจากการเรียงลำดับชั้นของ

วัสดุทั้งสามชนิดด้วยที่ต้องพิจารณา โดยจัดเรียงในตำแหน่งที่ต่างกัน โดยการวางด้านหน้าและด้านหลัง การวางตำแหน่งแผ่นโลหะไว้ด้านหน้าและด้านหลังจะทำให้ความหนาแน่นที่ใช้ในการป้องกันกระสุนต่างกัน ซึ่งจากการทดสอบของ Sudhir Sastry Y.B [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเรียงลำดับชั้นของวัสดุคือ Kevlar/Epoxy, E-Glass/Epoxy จากการเรียงองศาของเส้นใยและตำแหน่งการจัดวางก่อนหลัง ซึ่งพบว่าวัสดุต่างชนิดกัน ถึงจะมีการจัดเรียงลำดับชั้นและการจัดวางองศาของเส้นใยแบบเดียวกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการป้องกันกระสุนไม่เท่ากัน ดังนั้นตำแหน่งการจัดวางของวัสดุแต่ละชนิดจำเป็นต้องพิจารณา จึงได้ทำการทดสอบโดยจัดเรียงแผ่นโลหะด้านหน้าและด้านหลัง โดยมีเงื่อนไขเดียวกันตลอดการทดสอบดังนี้

### 5.3.1 โลหะประกบหน้า

#### 5.3.1.1 แผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้า

การใช้แผ่นอะลูมิเนียมมาประกบหน้าจะใช้การวิเคราะห์การสมดุลพลังงาน เช่นเดียวกับกรณีที่ไม่มีแผ่นโลหะประกบหน้า โดยพลังงานจลน์จะถูกหักลบออกจากแผ่นโลหะอะลูมิเนียมชั้นแรก และเหลือพลังงานเพื่อส่งผ่านมาในชั้นของวัสดุผสมในชั้นที่สองและชั้นถัดไป ซึ่งจากตารางที่ 4.16 -4.19 เป็นการเพิ่มความหนาของแผ่นอะลูมิเนียม 6 mm, 8 mm, 10 mm และ 12 mm พบว่าความหนาแน่นที่ต้องใช้ในการป้องกันกระสุนจะน้อยลงเมื่อใช้แผ่นอะลูมิเนียมหนาขึ้น เพราะว่าการเพิ่มความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมในชั้นแรกสามารถเพิ่มการดูดซับพลังงานจลน์ได้ เมื่อหักลบพลังงานจลน์ในชั้นแรกออกจะเหลือพลังงาน 20-50 J ส่งผ่านในชั้นถัดไป เช่นเดียวกับในกรณีที่ไม่มีแผ่นโลหะ ซึ่งเป็นพลังงานที่ต้องใช้ในการเจาะทะลุวัสดุผสม แต่การวิเคราะห์พลังงานในชั้นที่สองเป็นต้นไป นั้นไม่สามารถวิเคราะห์ได้อย่างละเอียดและมีความซับซ้อนมาก เนื่องจากกระสุนมีการเสียรูปและถูกทำลายในชั้นแรก จึงส่งผลให้กระสุนมีขนาดที่เล็กลงได้ จึงใช้ทฤษฎีพลังงานจลน์เพื่อวิเคราะห์ในแต่ละชั้นโดยมวลกระสุนเป็นค่าคงที่ ดังนั้นจากตารางการทดสอบที่ 4.21 พบว่าเมื่อนำแผ่นอะลูมิเนียมขนาด 12 mm มาประกบหน้าวัสดุผสม ต้องใช้ความหนาแน่นเท่ากับ 60 mm จึงจะสามารถป้องกันการเจาะทะลุของกระสุนปืนได้ ซึ่งเป็นความหนาแน่นที่น้อยที่สุดและน้ำหนักน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับความหนาอื่นๆ โดยมีน้ำหนักรวมต่อพื้นที่รวมเท่ากับ  $11.59 \text{ kg/ft}^2$  หรือ  $124.47 \text{ kg/m}^2$

#### 5.3.1.2 แผ่นเหล็กกล้าประกบหน้า

การใช้แผ่นเหล็กกล้ามาประกบหน้าจะใช้การวิเคราะห์การสมดุลพลังงาน เช่นเดียวกับกรณีที่ไม่มีแผ่นโลหะประกบหน้าและแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้า แต่พลังงานจลน์ที่แผ่นเหล็กกล้าสามารถดูดซับไว้ได้ในชั้นแรกจะมากกว่าแผ่นอะลูมิเนียม จากตารางที่ 4.22 ผลต่างของพลังงานที่ใช้ในการส่งผ่านไปยังชั้นวัสดุถัดไปเท่ากับ 8-20J ซึ่งเหลือพลังงานน้อยกว่าแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้า จึงส่งผล

ให้การใช้แผ่นเหล็กกล้าสามารถลดความหนารวมได้มากกว่าแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้าโดยมีค่าลดลงเท่ากับ 55% แต่น้ำหนักรวมที่ได้ก็จะมากขึ้นกว่าการใช้แผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้าเท่ากับ 109% ดังนั้นจากตารางการทดสอบที่ 4.23 พบว่าเมื่อนำแผ่นเหล็กกล้าขนาด 10 mm มาประกบหน้าวัสดุผสม ต้องใช้ความหนารวมเท่ากับ 34 mm จึงจะสามารถป้องกันการเจาะทะลุของกระสุนปืนได้ ซึ่งเป็นความหนารวมที่น้อยที่สุดและดีที่สุดเมื่อเทียบกับความหนาอื่นๆ โดยมีน้ำหนักรวมต่อพื้นที่เท่ากับ  $11.63 \text{ kg/ft}^2$  หรือ  $124.90 \text{ kg/m}^2$  ซึ่งการใช้แผ่นเหล็กกล้าประกบหน้ายังมีน้ำหนักและความหนาไม่เหมาะสมต่อการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับ ARMORCOR [37] ที่มีความหนาเท่ากับ 28 mm และมีน้ำหนักต่อพื้นที่  $5.3 \text{ kg/ft}^2$  หรือ  $56.92 \text{ kg/m}^2$

### 5.3.2 โลหะประกบหลัง

#### 5.3.2.1 แผ่นอะลูมิเนียมประกบหลัง

การใช้แผ่นอะลูมิเนียมประกบหลังจะใช้การวิเคราะห์การสมดุลพลังงาน เช่นเดียวกับกับแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้า โดยกระสุนปืนจะเจาะทะลุผ่านวัสดุผสมก่อนในชั้นแรกและจะเหลือพลังงานส่งผ่านไปยังชั้นที่สองเป็นต้นไป จากตารางที่ 4.24-4.27 ผลต่างของพลังงานที่ใช้ส่งผ่านตั้งแต่ชั้นที่สองเหลือเท่ากับ 95-124J ซึ่งจะเห็นว่าผลต่างจะเหลือมากกว่าแผ่นโลหะประกบหน้าเพราะว่าแผ่นวัสดุผสมมีความแข็งแรงน้อยกว่าแผ่นโลหะจึงทำให้ลดพลังงานจลน์ในชั้นแรกได้ไม่ดีเท่ากับแผ่นโลหะประกบหน้า เมื่อนำแผ่นอะลูมิเนียมมาประกบหลังพบว่ากระสุนสามารถหยุดได้ด้วยแผ่นอะลูมิเนียมเพราะว่าผลจากตารางการทดสอบที่ 4.8 ที่ความหนาแผ่นอะลูมิเนียม 6 mm, 8 mm, 10 mm และ 12 mm สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 2,286.53 - 2,343.50 J ดังนั้นพลังงานที่เหลือใช้สำหรับการเจาะทะลุและส่งผ่านมาจากชั้นแรกจึงไม่เพียงพอต่อการเจาะทะลุแผ่นอะลูมิเนียมประกบหลังได้ จึงทำให้สามารถป้องกันกระสุนได้โดยมีความหนารวมน้อยกว่าแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้าและน้ำหนักรวมน้อยกว่าแผ่นอะลูมิเนียมประกบหน้า แสดงดังรูปที่ 4.34 น้ำหนักรวมและความหนานั้นสามารถทำได้ใกล้เคียงกับแผ่น ARMORCOR จากตารางการทดสอบที่ 4.28 พบว่าเมื่อนำแผ่นอะลูมิเนียมขนาดความหนา 12 mm มาประกบหลังวัสดุผสม ต้องใช้ความหนารวมเท่ากับ 24 mm ก็เพียงพอต่อการป้องกันการเจาะทะลุของกระสุนปืนได้ ซึ่งเป็นความหนารวมที่น้อยที่สุดและน้ำหนักดีที่สุดเมื่อเทียบกับความหนาอื่นๆ โดยมีน้ำหนักรวมเท่ากับ  $5.23 \text{ kg/ft}^2$  หรือ  $56.17 \text{ kg/m}^2$

#### 5.3.2.2 แผ่นเหล็กกล้าประกบหลัง

การใช้แผ่นเหล็กกล้าประกบหลังจะใช้การวิเคราะห์การสมดุลพลังงาน เช่นเดียวกับกับแผ่นเหล็กกล้าประกบหน้า ซึ่งจากผลการทดสอบดังรูปที่ 4.34 พบว่าการใช้แผ่นเหล็กกล้าประกบหลังสามารถป้องกันกระสุนได้ที่ความหนารวมใกล้เคียงกับการใช้แผ่นอะลูมิเนียมประกบหลังมีความหนา

รวมตั้งแต่ 22-34 mm แต่น้ำหนักของแผ่นเหล็กกล้าที่นำมาประกบหลังมีน้ำหนักมากจะทำให้ น้ำหนักรวมมากกว่าแผ่นอะลูมิเนียมและ แผ่น ARMORCOR จึงไม่เหมาะสมแก่การใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นอะลูมิเนียมและ แผ่น ARMORCOR จากตารางการทดสอบที่ 4.29-4.31 ผลต่างของพลังงานที่เหลื่อใช้สำหรับการเจาะทะลุและส่งผ่านมายังชั้นที่ 2 เป็นต้นไปจะน้อยกว่า 95 J เพราะแผ่นเหล็กกล้าประกบหลังจะดูดซับพลังงานได้ดีกว่าแผ่นอะลูมิเนียมจึงทำให้พลังงานที่เหลือน้อยกว่าแผ่นอะลูมิเนียม ซึ่งพลังงานที่เหลื่ออยู่ไม่เพียงพอที่จะเจาะทะลุแผ่นเหล็กกล้าได้ จึงทำให้การประกบหลังด้วยแผ่นเหล็กกล้าสามารถป้องกันการเจาะทะลุได้ ดังนั้นจากตารางการทดสอบที่ 4.33 พบว่าเมื่อนำแผ่นเหล็กกล้าขนาดความหนา 10 mm มาประกบหลังวัสดุผสม ต้องใช้ความหนารวมเท่ากับ 22 mm จึงจะสามารถป้องกันการเจาะทะลุของกระสุนปืนได้ ซึ่งเป็นความหนารวมที่น้อยที่สุดและ น้ำหนักดีที่สุดเมื่อเทียบกับความหนาอื่นๆ โดยมีน้ำหนักรวมต่อพื้นที่เท่ากับ  $9.26 \text{ kg/ft}^2$  หรือ  $99.45 \text{ kg/m}^2$  ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นอะลูมิเนียมประกบหลังพบว่า ความหนารวมของแผ่นเหล็กกล้าประกบหลังมีความหนารวมน้อยกว่าแต่น้ำหนักรวมมากกว่า ซึ่งยังไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน





## บทที่ 6

### บทสรุป

#### 6.1 บทสรุปงานวิจัย

- การเพิ่มเส้นลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้นจะทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุผสมเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $1,975.9 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมด้วยลวดตาข่ายเหล็กคิดเป็นอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 6.7%
- การเสริมแรงด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็กจะทำให้ชิ้นงานวัสดุผสมมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นและต้องใช้พลังงานในการเจาะทะลุเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมด้วยลวดตาข่ายเหล็ก โดยคิดเป็นอัตราส่วนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 139% และสามารถรับแรงกระทำได้สูงสุดที่ 410 N จากการทดสอบในห้องทดลอง
- พลังงานจลน์ที่ดูดซับจากแผ่นวัสดุผสมจากการซ้อนทับกันหรือเพิ่มจำนวนชั้นของวัสดุ จะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 17%
- ความเร็วของวัตถุตกกระทบมีผลต่อการดูดซับพลังงานจลน์ ซึ่งความเร็วที่สูงขึ้น จะทำให้วัสดุผสมดูดซับพลังงานได้มากกว่าความเร็วต่ำ
- ชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น จะมีความเค้นสูงกว่าชิ้นงานที่มีจำนวนชั้นของวัสดุเสริมแรงน้อยกว่าหรือไม่ได้เสริมแรง แต่จะมีความยืดหดตัวต่ำกว่า โดยวัสดุเสริมด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น ชิ้นงานจะขาดออกจากกันทันทีเมื่อเส้นลวดขาด แต่ชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมแรงจะยืดตัวได้มากกว่าก่อนชิ้นงานจะขาดออกจากกัน และความยืดหดตัวจะลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของเส้นลวดตาข่ายเหล็กมากขึ้น
- จากการทดสอบการยิงกระสุนปืนจริงของแผ่นโลหะทั้งสองชนิดคือ แผ่นอะลูมิเนียมเกรด 5083 และ แผ่นเหล็กกล้า เกรด SS400 ที่ความหนาเท่ากันพบว่าแผ่นเหล็กจะดูดซับพลังงานได้ดีกว่าแผ่นอะลูมิเนียม แต่แผ่นเหล็กกล้าจะมีน้ำหนักมากกว่าแผ่นอะลูมิเนียม

- เมื่อนำแผ่นโลหะทั้งสองชนิดไปทดสอบร่วมกับแผ่นวัสดุผสมพบว่าแผ่นอะลูมิเนียมจะให้น้ำหนักรวมของชิ้นงานน้อยกว่าแผ่นเหล็ก ในกรณีทดสอบตามเงื่อนไขแผ่นอะลูมิเนียมประกบด้านหลัง จะทำให้มีน้ำหนักต่อพื้นที่ต่ำสุดคือ 5.23 kg/ft<sup>2</sup> หรือ 56.17 kg/m<sup>2</sup> โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมความหนา 12 mm และ แผ่นวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นลวดตาข่ายเหล็ก 5 ชั้น รวมความหนา 24 mm ที่สามารถป้องกันกระสุนได้ ทำให้มีน้ำหนักต่อพื้นที่น้อยกว่าและความหนารวมน้อยกว่าแผ่นวัสดุผสมที่มีจำหน่ายในท้องตลาดเช่น ARMORCOR ที่มีน้ำหนักต่อพื้นที่เท่ากับ 5.3 kg/ft<sup>2</sup> ที่ความหนา 28 mm
- ขนาดรูความเสียหายจากการเจาะทะลุของกระสุนปืนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้นตามความหนาของชิ้นงาน

## 6.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

- การวัดความเร็วกระสุนปืนด้านหลังของเครื่องวัดความเร็วกระสุนทำการวัดได้ยากเนื่องจากอาจมีเศษชิ้นงานหรือเศษกระสุนผ่านตัวเครื่องวัดแทนกระสุนจริง ต้องทำการวัดค่าหลายครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าความเร็วที่ปรากฏเป็นความเร็วที่แท้จริงของกระสุน เพื่อลดความคลาดเคลื่อน ทำให้เสียเวลาในการทดสอบมากขึ้น
- เนื่องจากต้องยิงผ่านเครื่องวัดทั้งสองจุด นักยิงปืนต้องมีความแม่นยำในการยิงเพื่อให้ผ่านแนวของเครื่องยิงทั้งสองตำแหน่งได้ เพราะจะทำให้เสียเวลาเพิ่มขึ้นและทำให้ชิ้นงานทดสอบนั้นเสีย
- กระบวนการขึ้นรูปต้องใช้เครื่องมือเฉพาะทางในการขึ้นรูป และสารเคมีบางชนิดไม่มีจำหน่ายตามท้องตลาด จึงจะต้องสั่งซื้อจากหน่วยงานเพียงอย่างเดียว

## 6.3 ข้อเสนอแนะ

- ควรเตรียมเครื่องวัดความเร็วสำรองไว้ในกรณีที่ต้องการวัดความเร็วกระสุนด้านหลัง เพราะสะเก็ดลูกกระสุนอาจสร้างความเสียหายให้กับตัวเครื่องวัดได้

- ควรเปลี่ยนอุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานเป็นแบบใช้ Stud & Bolt หรือแบบอื่นๆที่สอดคล้องกับชิ้นประกอบและการใช้งานชิ้นงาน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างชิ้น
- การวัดความเร็วกระสุนด้านหลัง จะต้องทำการทดสอบหลายครั้ง หรือยิงหลายครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าในครั้งนั้นจะเป็นค่าความเร็วของหัวกระสุนจริง ไม่ใช่สะเก็ดหรือเศษชิ้นงาน
- ชิ้นรูปชิ้นงานให้เป็นชิ้นเดียวกันโดยการอัดขึ้นรูปที่ความหนาตามความต้องการ หรือประสานกันด้วยความร้อนและกาว ระหว่างรอยต่อแผ่น ก่อนการทดสอบยิงกระสุนปืนจริง เพื่อทดสอบพันธะการยึดเหนี่ยวของชิ้นงาน
- วิเคราะห์ความแตกต่างของช่องว่างระหว่างแผ่น
- ออกแบบลักษณะสิ่งห่อหุ้มผลิตภัณฑ์ เพื่อภาพลักษณ์ที่ดีของผลิตภัณฑ์
- ออกแบบชิ้นงานที่สามารถช่วยให้ติดตั้งหรือซ่อมบำรุงได้อย่างรวดเร็ว
- ลดขนาดเส้นลวดตาข่ายเหล็ก และเพิ่มวัสดุเสริมแรงชนิดอื่นเช่น เส้นใยแก้ว เป็นต้น
- ลักษณะการใช้งานของผนังแสดงในภาคผนวก ฉ.

## รายการอ้างอิง

- [1] ปกรณ์ พึ่งเนตร. 11ปีไฟตายตายครึ่งหมื่น-ระเบิด3พันลูก. คมชัดลึก ม.ค. 2558.
- [2] British standard institution. *British standard BS EN 1522:1998*. European committee for standardization. 1988.
- [3] Justice and N.I.o. *Ballistic Resistant Protective Materials NIJ Standard 0108.01*. U.S. Department of Justice National Institute of Justice. 1985.
- [4] P.Sukontasukkul and S.Jamnam. *Use of rubberized concrete as a cushion layer in bulletproof fiber reinforced concrete panels*. Faculty of applied science. Department of civil engineering. The University of British Columbia. 2002.
- [5] แผนกสรรพวุธ. *โกดังเก็บวัตถุระเบิด*. มณฑลทหารบกที่ 14 จังหวัดชลบุรี. 2015.
- [6] คณะโครงการวิจัยทางด้านยุทธโปกรณ์ของกองทัพและการป้องกันประเทศ. *คอนกรีตประสิทธิภาพสูงสำหรับกำแพงป้องกันกระสุนและกัมมันตรังสี*. 2557.
- [7] มนตรี พิรุณเกษตร. *กลศาสตร์วิศวกรรม ภาคพลศาสตร์ (Dynamics)*. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทวิทยพัฒน์ จำกัด. 2550.
- [8] Serge A.. *Impact Engineering of composite structure. CISM courses and lectures 526*. Italy. SpringerWienNewYork. 2011.
- [9] บุญรักษ์ กาญจนวณิช. *บทความการพัฒนาเสื่อเกราะกันกระสุนแบบเกราะแข็ง*. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2557.
- [10] ADI thales comnpany. *5.56x45mm NATO*. Wikipedia. 2007.
- [11] I.M. Daniel and O.Ishai. *Engineering Mechanics of composite materials*. Second edition. Civil and environmental department. New york: Oxford University. 2006.
- [12] Sudhir Sastry Y.B. and Pattabhi R.B.. *Studies on ballistic impact of the composite panels*. Theoretical and applied fracture Mechanics. 2014:2-12.
- [13] W.J. Cantwell and J. Morton. *Impact Perforation of Carbon Fiber Reinforced Plastic*. Composites Science and Technology. Volume 38 Issue 2. 1990:119-141.
- [14] Serge A.. *Dynamic Failure of composite and sandwich structure*. Springer (eBook). 2013.

- [15] W.J. Cantwell and J. Morton. *Comparison of the low and high velocity impact response of CFRP*. Composite. Volume 20 Issue 6. Nov. 1989: 545-551.
- [16] T.E.Tay. *Analysis of stresses in cross-ply composite laminates containing distributed transverse cracks*. Finite elements in analysis and design. Volume 18 Issue 1-3. December 1994:301-308.
- [17] S.Abrate. *Impacted on laminated composite material*. Applied Mechanics review. research gate article. April 1991.
- [18] I.M. Daniel and O.Ishai. *Engineering Mechanics of composite materials*. Second edition. Oxford University.2006.
- [19] ASTM International. *Standard Test Method for Protective Clothing Material Resistance to Puncture*. ASTM F1342 and F1342M - 05(2013)e1. West Conshohocken. 2013.
- [20] ASTM International. *Standard Test Method for Tensile Properties of polymer matrix composite material*. ASTM D3039. Book of Standards Volume: 15.03 West Conshohocken. 2017.
- [21] เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร. วัสดุผสม 1. เอกสารประกอบการสอน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2559.
- [22] J.R. Vinson. *The Behavior of sandwich structure of isotropic and composite materials*. Lancaster. Technomic Pub. Co.,ltd. 1999.
- [23] สุวดี ก้องพารากุล. เทคโนโลยีการดัดแปลงยางธรรมชาติและการประยุกต์ใช้. KKU Science Journal Volume 41 Issue 3. 2556.
- [24] สถาบันวิจัยยาง. ข้อมูลยางพาราดิบ. กรมวิชาการเกษตร. 2555.
- [25] Nawamawat K. and J.T. Sakdapipanich. *Surface nanostructure of Hevea Brasiliensis natural rubber latex particles*. Colloids Surface. Volume 390 Issue(1-3). October 2011: 157-166.
- [26] Brendan Rodgers. *Rubber Compounding*. New York, Basel. The good year Tire & Rubber Company. 2004
- [27] Ying W. and Xiaogang C.. *A numerical study of ply orientation on ballistic impact resistance of multi-ply fabric panels*. Composite: Part B (2015). 2015: 259-265.
- [28] M.Sadighi and R.B. R.C.Alderliesten. *Impact resistance of fiber metal laminates: A review*. International journal of impact engineering. Volume 49. 2012:77-90.

- [29] M.R. Abdullah and Cantwell. *The impact resistance of fiber-metal laminates based on glass fiber reinforced polypropylene*. Polymer-composite. Volume 27 Issue 6. December 2006: 700-708.
- [30] Xudong Zu and X.J. Z.Huang. *Study on rubber composite armor anti-shaped charge jet penetration*. Propellants Explosive Pyrotech. Volume 28. 2013: 695-702.
- [31] Mohd R.A. and Wan Y.W.A. *Effect of fabric stitching on ballistic impact resistance of natural rubber coated fabric systems*. Material and design 29 (2008). 2008: 1353-1358.
- [32] Normala H. and Mohd R.A.. *Puncture resistance of natural rubber latex unidirectional coated fabrics*. Journal of industrial textiles. Volume 42 Issue 2. November 2011: 118-131.
- [33] กฤษฎากร เขวงศักดิ์โสภาคย์. *เสื่อเกราะกันกระสุนจากแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์. ทีวีวิจัยเสื่อเกราะพระเจ้าตาก* จ.ตาก. 2551.
- [34] M. Colakoglu and O. Soykasap. *Experimental and numerical investigations on the ballistic performance of polymer matrix composites used in armor design*. Apply composite material. Volume 14. 2007: 47-58.
- [35] Joseph T.S. *Mechanical properties and durability of natural rubber compounds and composites*. Virginia Polytechnic Institute and state University: Material engineering science. 2001.
- [36] Matweb. *Steels. General Properties*. Matweb. 1990.
- [37] Waco Composites. *ARMORCORE*. Product specification. 2015.
- [38] Systems, A.F. and Customer Inquiry Center. *KEVLAR® ARAMID FIBER TECHNICAL GUIDE*. 2017.
- [39] Azom. *AZO Materials: E-Glass Fibre*. AZoNetwork. 2001.
- [40] M.Grujicic and B.Pandurangan. *The role of adhesive in the ballistic/structural performance of ceramic/polymer-matrix composite hybrid armor*. Material and design. Volume 41. 2012: 380-390.
- [41] S.Abrate. *Modeling of impact on composite structures*. Composite Structures Volume 51. 2001:129-138.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



## ภาคผนวก ก.

## มาตรฐานการทดสอบ

Page 3  
EN 1522:1998**1 Scope**

This standard defines the requirements and classification that windows, doors, shutters and blinds must satisfy when tested in accordance with EN 1523.

This standard is applicable to attacks by hand guns, rifles and shotguns on windows, doors, shutters and blinds complete with their frames and infills, for use in both internal and external locations in buildings. Shutters and blinds must be tested separately and not in conjunction with a window or door, in order to achieve classification in terms of bullet resistance.

This standard gives no information on the behaviour of the test item when subjected to other types of stresses.

It gives no information on the bullet resistance of the junction between the frame and the wall or other surrounding structure.<sup>1)</sup>

**2 Normative references**

This European Standard incorporates by dated or undated reference, provisions from other publications. These normative references are cited at the appropriate places in the text and the publications are listed hereafter. For dated references, subsequent amendments to or revisions of any of these publications apply to this European Standard only when incorporated in it by amendment or revision. For undated references the latest edition of the publication referred to applies.

EN 1523:1998, *Windows, doors, shutters and blinds — Bullet resistance — Test method.*

prEN 1063, *Specification for security glazing — Bullet resistant glazing — Classification and test methods.*

prEN 12216, *Blind and shutters — Terminology.*

prEN 12519, *Doors and windows — Terminology.*

**3 Definitions**

For the purposes of this European Standard, the definitions given in prEN 12519 and prEN 12216 apply.

**4 Requirements**

Any glass infill in the test specimen shall be of bullet resisting glass conforming to the appropriate class of prEN 1063 in accordance with Tables 1 and 2. If the test specimen contains a higher class level of glass, this must be stated in the test report and test report summary.

After the test in accordance with EN 1523 the door leaf and/or any opening window casement, sash or curtain of a shutter or blind shall remain retained in the closed position, whether or not the opening mechanisms are still operable, and it shall not be possible to gain access from the attack face to any operating mechanism which remains in operable condition. It is not a requirement of the test that performance in other respects such as air permeability, watertightness, wind resistance etc. be maintained.

Resistance to perforation by weapons and ammunition listed in Tables 1 and 2 shall be classified in accordance with clause 5. To achieve a particular class of bullet resistance, the test specimen shall show no perforation when tested in accordance with EN 1523 using the ammunition appropriate to that class as shown in Table 1 or 2.

To obtain classes FB4 or FB6 the test specimen shall be tested with ammunition of both calibres indicated.

**5 Classification**

The classes FB1 to FB7 given in Table 1 are in order of increasing resistance to perforation. Class FB1 represents the lowest bullet resistance, and class FB7 the highest e.g. FB4 includes FB3, FB2, FB1 and where necessary the testing institute shall conduct additional tests in the lower classes to confirm this.

Test specimens which fail to meet class FB1 cannot be described as offering bullet resistance.

Results of the tests shall be qualified by the addition of an "S" or "NS" suffix according to the presence or absence of splinters.

EXAMPLE

FB1(S), FB1(NS), etc.

<sup>1)</sup> Care should be taken to ensure that all joints between the wall and the door, window, shutter or blind have bullet protection which is at least equal to that of the door, window, shutter or blind.

Table 1 — Classification and requirements for testing with hand guns and rifles

Class	Type of weapon	Calibre	Bullet		Test condition	
			Type	Mass g	Test range m	Bullet velocity m/s
FB1	rifle	22 LR	L/RN	2,6 ± 0,1	10 ± 0,5	360 ± 10
FB2	hand gun	9 mm Luger	FJ <sup>1</sup> /RN/SC	8,0 ± 0,1	5 ± 0,5	400 ± 10
FB3	hand gun	357 Mag.	FJ <sup>1</sup> /CB/SC	10,2 ± 0,1	5 ± 0,5	430 ± 10
FB4	hand gun	357 Mag.	FJ <sup>1</sup> /CB/SC	10,2 ± 0,1	5 ± 0,5	430 ± 10
	hand gun (see note)	44 Rem. Mag.	FJ <sup>2</sup> /FN/SC	15,6 ± 0,1	5 ± 0,5	440 ± 10
FB5	rifle	5,56 × 45*	FJ <sup>2</sup> /PB/SCP1	4,0 ± 0,1	10 ± 0,5	950 ± 10
FB6	rifle	5,56 × 45*	FJ <sup>2</sup> /PB/SCP1	4,0 ± 0,1	10 ± 0,5	950 ± 10
	rifle (see note)	7,62 × 51	FJ <sup>1</sup> /PB/SC	9,5 ± 0,1	10 ± 0,5	830 ± 10
FB7	rifle	7,62 × 51**	FJ <sup>2</sup> /PB/HC1	9,8 ± 0,1	10 ± 0,5	820 ± 10
L lead CB coned bullet FJ full metal jacket bullet FN flat nose bullet HC1 steel hard core, mass (3,7 ± 0,1) g hardness more than 63 HRC PB pointed bullet RN round nose bullet SC soft core (lead) SCP1 soft core (lead) with steel penetrator (type SS109)			FJ <sup>1</sup> = full steel jacket (plated) FJ <sup>2</sup> = full copper alloy jacket			
* To achieve the stated values for [5,56 × 45], the recommended barrel twist length = (178 ± 10) mm. ** To achieve the stated values for class FB7, the recommended barrel twist length = (254 ± 10) mm.						
NOTE 1 When a shot is to be fired at a single point the test range may be reduced to achieve the firing accuracy as defined in Section 6 of EN 1523:1998. In this case it may not be possible to measure the velocity of the bullet.						
NOTE 2 To be classified FB4 or FB6 the specimen shall be tested with both calibres listed.						

Table 2 — Classification and requirements for testing with shotguns

Class	Type of weapon	Calibre	Bullet		Test condition	
			Type	Mass g	Test range m	Bullet velocity m/s
FSG	shotgun	12/70	Solid lead slug <sup>3)</sup>	31 ± 0,5	10 ± 0,5	420 ± 20
<sup>3)</sup> = Brenneke.						

Table 3 — Class for use in test

Class	Minimum class of glass to be used in test (in accordance with prEN 1063)
FB1	BR1
FB2	BR2
FB3	BR3
FB4	BR4
FB5	BR5
FB6	BR6
FB7	BR7
FSG	SG2

**Annex A (informative)****Some types and calibres of ammunition other than those shown in Tables 1 and 2**

Tables 1 and 2 indicate the most common ammunition available in the European market. For this reason, these types and calibres have been chosen for the tests which form the basis for this European Standard for the classification of bullet resistance.

Countries may have threats from ammunition of other types and calibres and may require tests to be carried out with these. Table A.1 indicates some of these types and calibres of ammunition, together with criteria for interpreting the test results.

Any such test should be conducted in accordance with EN 1523 but classification in accordance with this European Standard is not permitted.

The results of such tests should not be compared with classes FB1 to FB7 and FSG.

**Table A.1 — Criteria for testing with ammunition of some types and calibres other than those shown in Tables 1 and 2**

Type of weapon	Calibre	Bullet		Test condition	
		Type	Mass g	Test range m	Bullet velocity m/s
shotgun	12/70	SP <sup>4</sup> /FS	17,9 ± 0,1	10 ± 0,5	605 ± 30
rifle	5,56 × 45	FJ <sup>2</sup> /PB/HC2	3,45 ± 0,1	10 ± 0,5	980 ± 10
rifle	8 × 68 S	FJ <sup>1</sup> /RN/SC	12,7 ± 0,1	10 ± 0,5	880 ± 10
rifle	5,56 × 45	FJ <sup>1</sup> /PB/SC	4,1 ± 0,1	10 ± 0,5	905 ± 10
rifle	7,5 × 55	FJ <sup>1</sup> /PB/SC	11,3 ± 0,1	10 ± 0,5	760 ± 10
rifle	7,62 × 39	FJ <sup>1</sup> /PB/SC	8,0 ± 0,1	10 ± 0,5	700 ± 10
rifle	5,45 × 39	FJ <sup>1</sup> /PB/SCP2	3,45 ± 0,1	10 ± 0,5	910 ± 10
rifle	7,62 × 51	FJ <sup>1</sup> /PB/HC3	8,45 ± 0,1	10 ± 0,5	960 ± 20
rifle	7,62 × 51	FJ <sup>2</sup> /PB/HC4	9,5 ± 0,1	10 ± 0,5	870 ± 10
rifle	5,56 × 45	FJ <sup>2</sup> /PB/HC5	4,0 ± 0,1	10 ± 0,5	970 ± 10
FJ full metal jacket bullet		FJ <sup>1</sup> = full steel jacket (plated)			
FS full steel		FJ <sup>2</sup> = full copper alloy jacket			
HC2 steel hard core, mass (1,17 ± 0,1) g hardness more than 63 HRC		SP <sup>4</sup> = spherical ball			
HC3 steel hard core, mass (6,0 ± 0,1) g hardness more than 63 HRC					
HC4 steel hard core, mass (4,3 ± 0,04) g hardness more than 63 HRC					
HC5 steel hard core, mass (0,61 ± 0,02) g hardness more than 63 HRC					
PB pointed bullet					
RN round nose					
SC soft core (lead)					
SCP2 soft core (lead) with steel penetrator					

# NIJ STANDARD FOR BALLISTIC RESISTANT PROTECTIVE MATERIALS

## 1. PURPOSE

The purpose of this standard is to establish minimum performance requirements and methods of test for ballistic resistant protective materials. This standard supersedes NIJ Standard-0108.00, Ballistic Resistant Protective Materials, dated December 1981. This revision adds threat level III-A and establishes threat level classifications that are consistent with other NIJ standards for ballistic protection.

## 2. SCOPE AND CLASSIFICATION

### 2.1 Scope

This standard is applicable to all ballistic resistant materials (armor) intended to provide protection against gunfire, with the exception of police body armor and ballistic helmets, which are the topic of individual NIJ performance standards [1,2]<sup>1</sup>. Many different types of armor are now available that range in ballistic resistance from those designed to protect against small-caliber handguns to those designed to protect against high-powered rifles. Ballistic resistant materials are used to fabricate portable ballistic shields, such as a ballistic clipboard for use by a police officer; to provide ballistic protection for fixed structures such as critical control rooms or guard stations; and to provide ballistic protection for the occupants of vehicles. The ballistic resistant materials used to fabricate armor include metals, ceramics, transparent glazing, fabric, and fabric-reinforced plastics; they are used separately or in combination, depending upon the intended threat protection.

The ballistic threat posed by a bullet depends, among other things, on its composition, shape, caliber, mass, and impact velocity. Because of the wide variety of cartridges available in a given caliber, and because of the existence of hand loads, armors that will defeat a standard test round may not defeat other loadings in the same caliber. For example, an armor that prevents penetration by a 357 Magnum test round may or may not defeat a 357 Magnum round with a higher velocity. Similarly, for identical striking velocities, nondeforming or armor-piercing rounds pose a significantly greater penetration threat than an equivalent lead core round of the same caliber. The test ammunitions specified in this standard represent common threats to the law enforcement community.

### 2.2 Classification

Ballistic resistant protective materials covered by this standard are classified into five types, by level of performance.

#### 2.2.1 Type 1 (22 LR; 38 Special)

---

<sup>1</sup> Numbers in brackets refer to the references in appendix A.

This armor protects against the standard test rounds as defined in section 5.2.1. It also provides protection against lesser threats such as 12 gauge No. 4 lead shot and most handgun rounds in calibers 25 and 32.

**2.2.2 Type II-A (Lower Velocity 357 Magnum; 9 mm)**

This armor protects against the standard test rounds as defined in section 5.2.2. It also provides protection against lesser threats such as 12 gauge 00 buckshot, 45 Auto., 38 Special  $\pm$  P and some other factory loads in caliber 357 Magnum and 9 mm, as well as the threats mentioned in section 2.2.1.

**2.2.3 Type II ( Higher Velocity 357 Magnum; 9 mm)**

This armor protects against the standard test rounds as defined in section 5.2.3. It also provides protection against most other factory loads in caliber 357 Magnum and 9 mm, as well as threats mentioned in section 2.2.1 and 2.2.2.

**2.2.4 Type III-A (44 Magnum; Submachine Gun 9 mm)**

This armor protects against the standard test rounds as defined in section 5.2.4. It also provides protection against most handgun threats as well as the threats mentioned in sections 2.2.1 through 2.2.3.

**2.2.5 Type III (High-Powered Rifle)**

This armor protects against the standard test round as defined in section 5.2.5. It also provides protection against most lesser threats such as 223 Remington (5.56 mm FMJ), 30 Carbine FMJ, and 12 gauge rifle slug, as well as the threats mentioned in sections 2.2.1 through 2.2.4.

**2.2.6 Type IV (Armor-Piercing Rifle)**

This armor protects against the standard test round as defined in section 5.2.6. It also provides at least single hit protection against the threats mentioned in sections 2.2.1 through 2.2.5.

**2.2.7 Special Type**

A purchaser having a special requirement for a level of protection other than one of the above standards should specify the exact test rounds to be used, and indicate that this standard shall govern in all other respects.

### 3. DEFINITIONS

#### 3.1 Angle of Incidence

The angle between the line of flight of the bullet and the perpendicular to the plane tangent to the point of impact (see fig. 1). Also known as angle of obliquity.

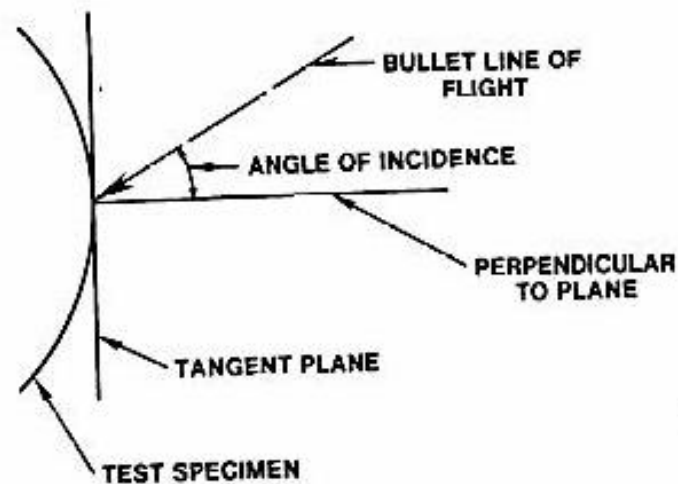


FIGURE 1. *Angle of incidence*

### 3.2 Fair Hit

A hit that impacts the ballistic resistant protective material at an angle of incidence no greater than 5°, and is at least 5 cm (2 in) from a prior hit or the edge of the test specimen and at an acceptable velocity as defined in this standard. A bullet that impacts too close to the edge or a prior hit and/or at too high a velocity, but does not penetrate, shall be considered a fair hit for the determination of nonpenetration..

### 3.3 Full Metal Jacketed (FMJ) Bullet

A bullet made of lead completely covered, except for the base, with copper alloy (approximately 90 copper-10 zinc).

### 3.4 Jacketed Soft Point (JSP) Bullet

A bullet made of lead completely covered, except for the point, with copper alloy (approximately 90 copper-10 zinc).

### 3.5 Lead Bullet

A bullet made of lead alloyed with hardening agents

### 3.6 Penetration

Perforation of a witness plate by any part of the test specimen or test bullet, as determined by passage of light when held up to a 60-W light bulb.

### 3.7 Strike Face

The surface of a ballistic resistant protective material designated by the manufacturer as the surface that should be exposed to (face) the weapon threat.

### **3.8 Semiwadcutter**

A bullet shape characterized by a flat nose and a tapered section leading to a cylindrical bullet body with a sharp break where the taper meets the body.

### **3.9 Witness Plate**

A thin sheet of aluminum alloy placed behind a test specimen to determine the potential for an incapacitating injury.

## **4. REQUIREMENTS**

### **4.1 Acceptance Criteria**

A ballistic material satisfies the requirements of this standard if the sample item (see sec. 5.1) meets the requirements of sections 4.2 through 4.4.

### **4.2 Workmanship**

Ballistic resistant protective materials shall be free from dents, blisters, cracks, crazing, chipped or sharp corners, and other evidence of inferior workmanship.

### **4.3 Labeling**

The Sample item and each full size panel of ballistic resistance material shall be permanently and legibly labeled and shall include the following information.

- a) Name, designation, or logo of the manufacturer
- b) Type of material, according to section 2 of this standard
- c) Month and year of manufacture
- d) Lot number
- e) Strike face, if any
- f) Certification of compliance with this edition of this standard

Items c and d may be incorporated into a single number, e.g., a serial number.

### **4.4 Ballistic Resistance**

The ballistic resistance of each test specimen of ballistic resistant protective material shall be determined in accordance with section 5.3. The test weapon and ammunition used during this test shall be those specified in table 1 in accordance with the type (threat level rating) specified by the manufacturer (sec. 4.3). Any penetration of the witness plate shall constitute failure.

The ballistic resistance test variables and test requirements are presented in table 1.

## 5. TEST METHODS

### 5.1 Sampling

The test specimen shall be a current production sample of the ballistic resistant material at least 30.5x30.5 cm (12x12 in).

### 5.2 Test Equipment

It should be noted that hand-loaded ammunition may be required to achieve some of the bullet velocities required in the following sections.

#### 5.2.1 Type I Test Weapons and Ammunition

##### 5.2.1.1 22 LR

The test weapon may be a 22-caliber handgun or test barrel. The use of a handgun with a 10 to 12 cm (6 to 6.5 in) barrel is suggested. Test bullets shall be 22 Long Rifle High Velocity lead, with nominal masses of 2.6 g (40 gr) and measured velocities of  $320 \pm 12$  m ( $1050 \pm 40$  ft) per second.

##### 5.2.1.2 38 Special

The test weapon may be a 38 Special handgun or test barrel. The use of a handgun with a 15 to 16.5 cm (6 to 6.5 in) barrel is suggested. Test bullets shall be 38 Special round-nose lead, with nominal masses of 2.6 g (158 gr) and measured velocities of  $259 \pm 15$  m ( $850 \pm 50$  ft) per second.

#### 5.2.2 Type II-A Test Weapons and Ammunition

##### 5.2.2.1 Lower Velocity 357 Magnum

The test weapon may be a 357 Magnum handgun or test barrel. The use of a handgun with a 10 to 12 cm (4 to 4.75 in) barrel is suggested. Test bullets shall be 357 Magnum jacketed soft point, with nominal masses of 10.2 g (158 gr) and measured velocities of  $381 \pm 15$  m ( $1250 \pm 50$  ft) per second.

##### 5.2.2.2 Lower Velocity 9 mm

The test weapon may be a 9 mm handgun or test barrel. The use of a handgun with a 10 to 12 cm (4 to 4.75 in) barrel is suggested. Test bullets shall be 9 mm full metal jacketed, with nominal masses of 8.0 g (124 gr) and measured velocities of  $332 \pm 12$  m ( $1090 \pm 40$  ft) per second.

#### 5.2.3 Type II Test Weapons and Ammunition

##### 5.2.3.1 Higher Velocity 357 Magnum

The test weapon may be a 357 Magnum handgun or test barrel. The use of a handgun with a 15 to 16.5 cm (6 to 6.5 in) barrel is suggested. Test bullets shall be 357 Magnum jacketed soft point, with nominal masses of 10.2 g (158 gr) and measured velocities of  $425 \pm 15$  m ( $1395 \pm 50$  ft) per second.

##### 5.2.3.2 Higher Velocity 9 mm

The test weapon may be a 9 mm handgun or test barrel. The use of a handgun with a 10 to 12 cm (4 to 4.75 in) barrel is suggested. Test bullets shall be 9 mm full metal jacketed, with nominal masses of 8.0 g (124 gr) and measured velocities of  $358 \pm 12$  m ( $1175 \pm 40$  ft) per second.



## 5.2.4 Type III-A Test Weapons and Ammunition

### 5.2.4.1 44 Magnum

The test weapon may be a 44 Magnum handgun or test barrel. The use of a handgun with a 14 to 16 cm (5.5 to 6.25 in) barrel is suggested. Test bullets shall be 44 Magnum, lead semiwadcutter with gas checks, nominal masses of 15.55 g (240 gr), and measured velocities of  $426 \pm 15$  m ( $1400 \pm 50$  ft) per second.

### 5.2.4.2 Submachine Gun (SMG) 9 mm

The test weapon may be a 9 mm SMG or test barrel. The use of a test barrel with a 24 to 26 cm (9.5 to 10.25 in) barrel is suggested. Test bullets shall be 9 mm full metal jacketed, with nominal masses of 8.0 g (124 gr) and measured velocities of  $426 \pm 15$  m ( $1400 \pm 50$  ft) per second.

## 5.2.5 Type III Test Weapon and Ammunition

The test weapon may be a rifle or a test barrel chambered for 7.62-mm (308 Winchester) ammunition. The use of a rifle with a barrel length of 56 cm (22 in) is suggested. Test bullets shall be 7.62 mm full metal jacketed (U.S. military designation M80) with nominal masses of 9.7 g (150 gr) and measured velocities of  $838 \pm 15$  m ( $2850 \pm 50$  ft) per second.

## 5.2.6 Type IV Test Weapon and Ammunition

The test weapon may be a rifle or a test barrel chambered for 30-06 ammunition. The use of a rifle with a barrel length of 56 cm (22 in) is suggested. Test bullets shall be 30 caliber armor piercing (U.S. military designation APM2), with nominal masses of 10.8 g (166 gr) and measured velocities of  $868 \pm 15$  m ( $2850 \pm 50$  ft) per second.

## 5.2.7 Special Type Test Weapon and Ammunition

The test weapon, cartridge type, bullet construction, bullet caliber, bullet mass, and bullet striking velocity must all be specified by the user.

## 5.2.8 Chronograph

The chronograph shall have a precision of 1  $\mu$ s and an accuracy of 2  $\mu$ s. Its triggering devices shall be of either the photoelectric or conductive screen type.

## 5.2.9 Support Fixture

The test specimen shall be supported by a fixture that permits its position and attitude to be readily adjusted so that it is perpendicular to the line of flight of the bullet at the point of impact.

## 5.2.10 Witness Plate

The witness plate shall be a 0.5 mm (0.020 in) thick sheet of 2024-T3 or 2024-T4 aluminum alloy and shall be placed and rigidly affixed perpendicular to the line of flight of the bullet and 15 cm (6 in) beyond the armor under test.

## 5.3 Ballistic Resistance Test

Condition the test specimen at a temperature of 20 to 28°C (68 to 82°F) for at least 24 h prior to test.

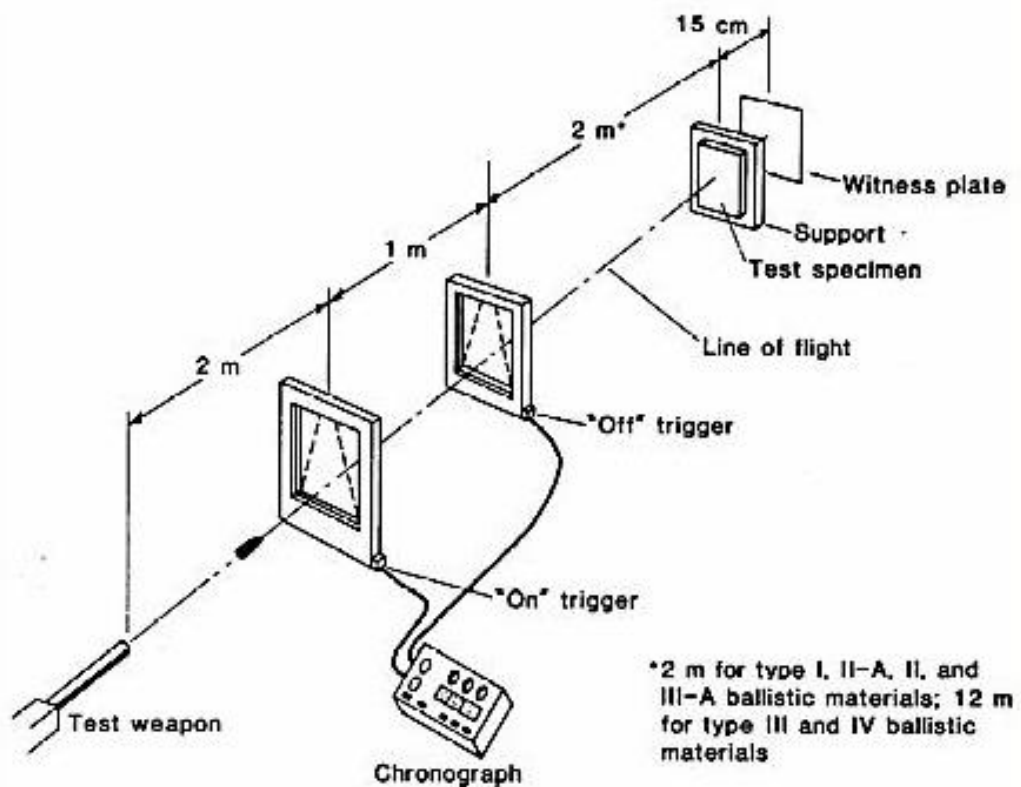
Place the triggering devices 2 and 3 m (6.6 and 9.8 ft), respectively from the muzzle of the test weapon as shown in fig. 2, and arrange them so that they define planes perpendicular to the line of flight of the bullet. Measure the distance between them with an accuracy of 1.0 mm (0.04 in). Use the time of flight and distance measurements to calculate the velocity of each test round.

After the specified test weapon has been supported, leveled, and positioned, fire one or more pretest rounds (as needed) through a witness plate to determine the point of impact.

Place the test specimen in the support fixture and position it 5 m (16 ft) from the muzzle of the test weapon. Then position an unperforated witness plate 15 cm (6 in) beyond the test specimen. Fire a test round and record the velocity of the bullet as measured by the chronograph. Examine the witness plate to determine penetration, and examine the specimen to see if the bullet made a fair hit.

If no penetration occurred, reposition the test specimen and repeat the procedure with additional test rounds until the test is completed. Space the hits as evenly as possible so that every portion of the test specimen is subject to test.

FIGURE 2. Ballistic test setup



## ภาคผนวก ข.

ตารางที่ ข.1 Properties of typical fibers

Type	Diameter $\mu\text{m}$ ( $10^{-3}$ in)	Density $\text{g/cm}^3$ (lb/in <sup>3</sup> )	Modulus GPa (Msi)	Tensile Strength MPa (ksi)
Glass				
E-glass	8–14 (0.30–0.55)	2.54 (0.092)	73 (10.5)	3450 (500)
S-glass	10 (0.40)	2.49 (0.090)	86 (12.4)	4500 (650)
Carbon				
AS4	7 (0.28)	1.81 (0.065)	235 (34)	3700 (535)
T300		1.76 (0.063)	230 (33)	3100 (450)
T-400H		1.80 (0.065)	250 (36)	4500 (650)
IM-6	4 (0.16)	1.80 (0.065)	255 (37)	4500 (650)
IM-7	4 (0.16)	1.80 (0.065)	290 (42)	5170 (750)
Graphite				
T-50		1.67 (0.060)	390 (57)	2070 (300)
GY-70		1.86 (0.067)	520 (75)	1725 (250)
P100 S	10 (0.4)	2.02 (0.073)	720 (105)	1725 (250)
Boron	140 (5.6)	2.50 (0.090)	395 (57)	3450 (500)
Aramid				
Kevlar 49	12 (0.47)	1.45 (0.052)	131 (19)	3800 (550)
Kevlar 149	12 (0.47)	1.45 (0.052)	186 (27)	3400 (490)
Silicon carbide				
(SCS-2)	140 (5.6)	3.10 (0.112)	400 (58)	4140 (600)
Nicalon	15 (0.6)	2.60 (0.094)	172 (25)	2070 (300)
Alumina				
FP-2		3.70 (0.133)	380 (55)	1725 (250)
Nextel 610		3.75 (0.135)	370 (54)	1900 (275)
Saphikon		3.80 (0.137)	380 (55)	3100 (450)
Sapphire whiskers		3.96 (0.143)	410 (60)	21,000 (3000)
Silica	—	2.19 (0.079)	73 (10.5)	5800 (840)
Tungsten	—	19.3 (0.696)	410 (60)	4140 (600)

ภาคผนวก ค.

ค.1 ตารางแสดงส่วนผสมของแผ่นอะลูมิเนียมเกรด 5083

20.03.2018 11:25:33

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Sample Identification										
SampleNo	611503-8114-ALPL 6 MM.			AverOutN	QMDelete					
	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	Ti %	Pb %
1.	0.093	0.252	0.031	0.578	4.492	0.079	0.0054	0.024	0.020	0.0028
2.	0.091	0.244	0.030	0.573	4.527	0.078	0.0052	0.024	0.020	0.0028
3.	0.093	0.244	0.030	0.569	4.513	0.079	0.0053	0.024	0.020	0.0028
4.	0.093	0.253	0.031	0.575	4.537	0.079	0.0054	0.024	0.020	0.0028
5.	0.092	0.244	0.031	0.573	4.560	0.079	0.0052	0.024	0.020	0.0028
6.	0.093	0.251	0.031	0.580	4.548	0.078	0.0052	0.024	0.020	0.0028
7.	0.095	0.246	0.031	0.576	4.515	0.078	0.0055	0.024	0.020	0.0029
↑										
↑										
∅	<b>0.093</b>	<b>0.248</b>	<b>0.031</b>	<b>0.575</b>	<b>4.527</b>	<b>0.079</b>	<b>0.0053</b>	<b>0.024</b>	<b>0.020</b>	<b>0.0028</b>
↓										
↓										
σ	0.0012	0.0041	0.00058	0.0036	0.023	0.00071	0.00012			0.00004
υ	1.290	1.653	1.871	0.626	0.508	0.899	2.264			1.429
	Sn %	Ag %	B %	Be %	Bi %	Ca %	Cd %	Na %	P %	Sb %
1.	0.0020	<0.00050	0.0024	0.00064	0.0030	<0.00010	<0.0010	<0.00010	0.0020	0.012
2.	0.0020	<0.00050	0.0024	0.00063	0.0032	<0.00010	<0.0010	<0.00010	0.0019	0.011
3.	0.0023	<0.00050	0.0023	0.00063	0.0032	<0.00010	<0.0010	<0.00010	0.0019	0.011
4.	0.0019	<0.00050	0.0024	0.00063	0.0032	<0.00010	<0.0010	<0.00010	0.0017	0.011
5.	0.0020	<0.00050	0.0024	0.00063	0.0031	<0.00010	<0.0010	<0.00010	0.0019	0.011
6.	0.0018	<0.00050	0.0024	0.00064	0.0033	<0.00010	<0.0010	<0.00010	0.0022	0.011
7.	0.0020	<0.00050	0.0024	0.00065	0.0032	<0.00010	<0.0010	<0.00010	0.0021	0.011
↑										
↑										
∅	<b>0.0020</b>	<b>&lt;0.00050</b>	<b>0.0024</b>	<b>0.00064</b>	<b>0.0032</b>	<b>&lt;0.00010</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.00010</b>	<b>0.0020</b>	<b>0.011</b>
↓										
↓										
σ	0.00015		0.00004	0.00001	0.00010				0.00017	0.00041
υ	7.500		1.667	1.563	3.125				8.500	3.727
	Sr %	V %	In %	Zr %	Ce %	Co %	Al %			
1.	<0.0010	0.015	<0.0050	<0.0010	<0.00050	0.00054	94.38			
2.	<0.0010	0.015	<0.0050	<0.0010	<0.00050	0.00054	94.36			
3.	<0.0010	0.015	<0.0050	<0.0010	<0.00050	0.00053	94.37			

4.	<0.0010	0.015	<0.0050	<0.0010	<0.00050	0.00054	94.33
5.	<0.0010	0.015	<0.0050	<0.0010	<0.00050	0.00053	94.32
6.	<0.0010	0.015	<0.0050	<0.0010	<0.00050	0.00056	94.32
7.	<0.0010	0.015	<0.0050	<0.0010	<0.00050	0.00052	94.36
↑							
↑							
∅	<0.0010	0.015	<0.0050	<0.0010	<0.00050	0.00054	94.35
↓							
↓							
σ						0.00001	0.025
υ						1.852	0.026



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ค.2 ตารางแสดงส่วนผสมของแผ่นเหล็กกล้า

19.03.2018 19:27:34

## CHULALONGKORN UNIVERSITY

Sample Identification										
Quality	SampleNo 611503-8114-PL12.5 MM AverOutN QMDelete									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.147	0.238	1.337	0.014	0.0031	0.413	0.031	0.084	0.033	0.012
2.	0.150	0.248	1.329	0.015	0.0035	0.414	0.032	0.084	0.035	0.011
3.	0.143	0.245	1.324	0.013	0.0032	0.404	0.032	0.083	0.036	0.012
4.	0.147	0.249	1.311	0.014	0.0033	0.401	0.032	0.084	0.037	0.012
5.	0.146	0.250	1.308	0.013	0.0032	0.400	0.032	0.085	0.037	0.012
6.	0.146	0.249	1.318	0.014	0.0029	0.402	0.030	0.086	0.037	0.012
7.	0.144	0.250	1.338	0.014	0.0031	0.403	0.030	0.088	0.036	0.012
↑										
↑										
∅	<b>0.146</b>	<b>0.247</b>	<b>1.324</b>	<b>0.014</b>	<b>0.0032</b>	<b>0.405</b>	<b>0.031</b>	<b>0.085</b>	<b>0.036</b>	<b>0.012</b>
↓										
↓										
σ	0.0023	0.0043	0.012	0.00071	0.00019	0.0058	0.0010	0.0017	0.0015	0.00041
υ	1.575	1.741	0.906	5.071	5.938	1.432	3.226	2.000	4.167	3.417
	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Zr	Bi
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.0052	0.00059	0.0066	0.017	0.0027	<0.00050	0.0014	0.0015	0.0012	0.0011
2.	0.0051	0.00065	0.0064	0.018	0.0030	<0.00050	0.0017	0.0012	0.0014	<0.0010
3.	0.0053	0.00056	0.0059	0.019	0.0025	<0.00050	0.0017	0.00077	0.0013	<0.0010
4.	0.0058	0.00058	0.0059	0.020	0.0024	<0.00050	0.0022	0.0012	0.0012	0.0022
5.	0.0058	<0.00050	0.0058	0.020	0.0023	<0.00050	0.0021	0.0012	0.0013	<0.0010
6.	0.0059	0.00061	0.0058	0.019	<0.0020	<0.00050	0.0020	0.00061	0.0013	<0.0010
7.	0.0061	<0.00050	0.0060	0.019	<0.0020	<0.00050	0.0020	<0.00050	0.0012	<0.0010
↑										
↑										
∅	<b>0.0056</b>	<b>0.00057</b>	<b>0.0061</b>	<b>0.019</b>	<b>0.0024</b>	<b>&lt;0.00050</b>	<b>0.0019</b>	<b>0.00100</b>	<b>0.0013</b>	<b>0.0012</b>
↓										
↓										
σ	0.00039	0.00006	0.00032	0.0011	0.00036		0.00028	0.00037	0.00008	0.00045
υ	6.964	10.53	5.246	5.789	15.00		14.74	37.00	6.154	37.50
	Ca	Ce	Sb	Ta	B	La	N	O	Fe	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
1.	0.0016	0.0074	<0.0010	0.0053	0.0012	0.0038	0.0081	<0.0060	97.62	
2.	0.0019	0.0080	<0.0010	0.0064	0.0013	0.0035	0.0050	~0.044	97.57	
3.	0.0019	0.0086	0.0013	0.0047	0.0012	0.0015	0.0027	<0.0060	97.64	
Fe110	SS453/1					Type-standard. conc.				
Bruker Elemental						1/2				

4.	0.0024	0.0098	0.0013	0.0030	0.0013	<0.0010	0.0035	0.0093	97.64
5.	0.0024	0.0094	0.0012	<0.0020	0.0013	<0.0010	0.0016	<0.0060	97.65
6.	0.0024	0.0085	<0.0010	<0.0020	0.0012	<0.0010	<0.0010	<0.0060	97.64
7.	0.0025	0.0074	<0.0010	<0.0020	0.0011	<0.0010	0.0011	<0.0060	97.62
↑									
∅	<b>0.0022</b>	<b>0.0084</b>	<b>0.0011</b>	<b>0.0036</b>	<b>0.0012</b>	<b>0.0018</b>	<b>0.0033</b>	<b>0.012</b>	<b>97.63</b>
↓									
∩									
σ	0.00035	0.00093	0.00015	0.0018	0.00008	0.0013	0.0026	0.014	0.027
ν	15.91	11.07	13.64	50.00	6.667	72.22	78.79	116.67	0.028



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### ค.3 ส่วนผสมของเส้นลวดตาข่ายเหล็ก

#### ค.3.1 บริเวณพื้นที่หน้าตัด

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 1.019, 13.420 keV

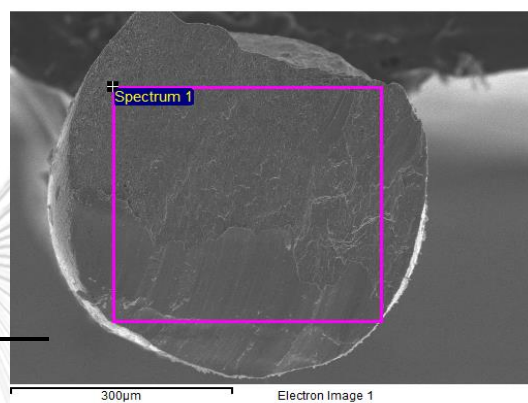
Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 2

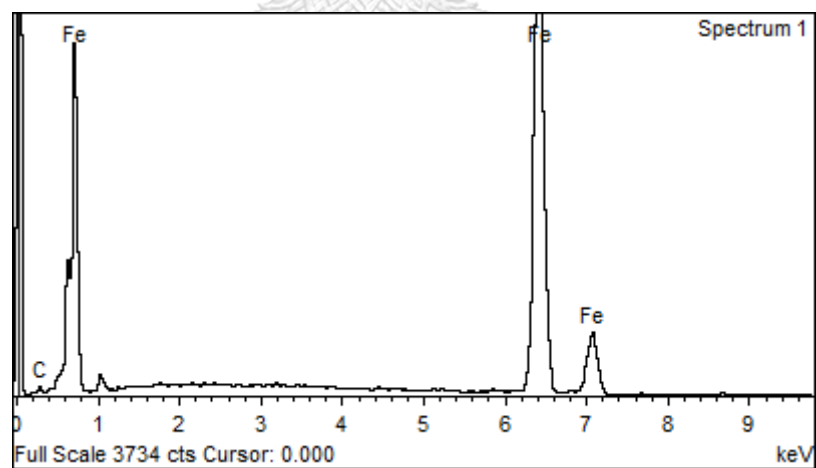
Standard :

C CaCO<sub>3</sub> 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM



Element	Weight%	Atomic%
C K	3.53	14.55
Fe K	96.47	85.45
Totals	100.00	





### ค.3.2 บริเวณพื้นผิว

Spectrum processing :

Peak possibly omitted : 0.273 keV

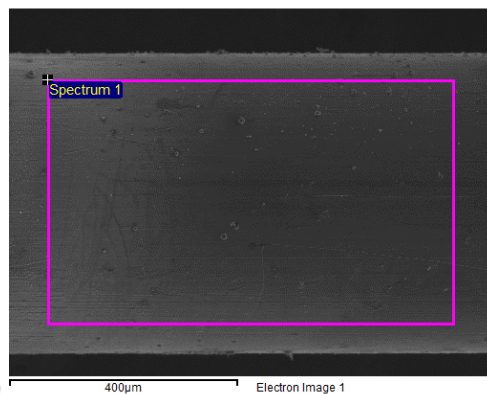
Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 2

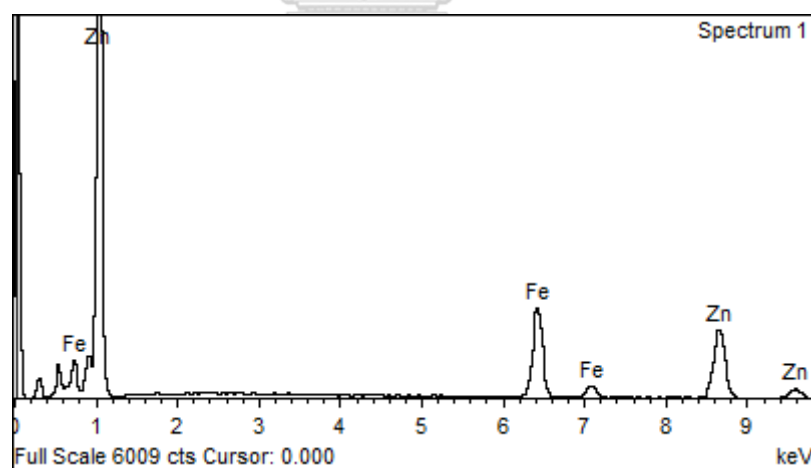
Standard :

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Zn Zn 1-Jun-1999 12:00 AM

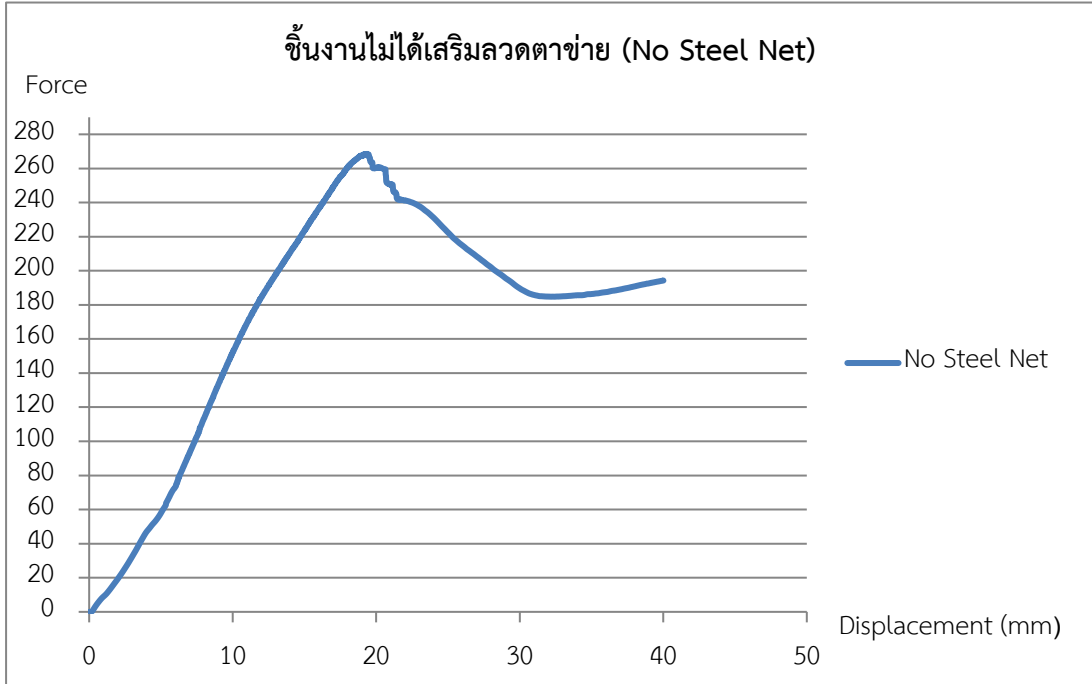


Element	Weight%	Atomic%
Fe K	32.69	36.24
Zn K	67.31	63.76
Totals	100.00	



ภาคผนวก ง.

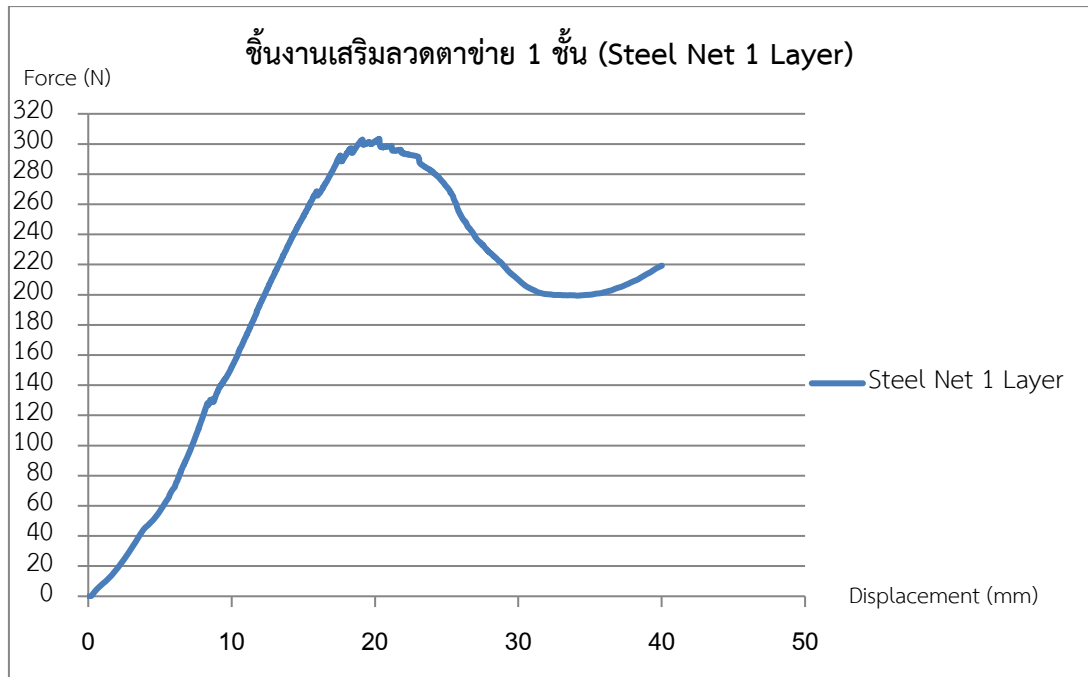
ผลการทดสอบการเจาะทะลุสำหรับชิ้นงานที่เสริมลวดที่แตกต่างกัน



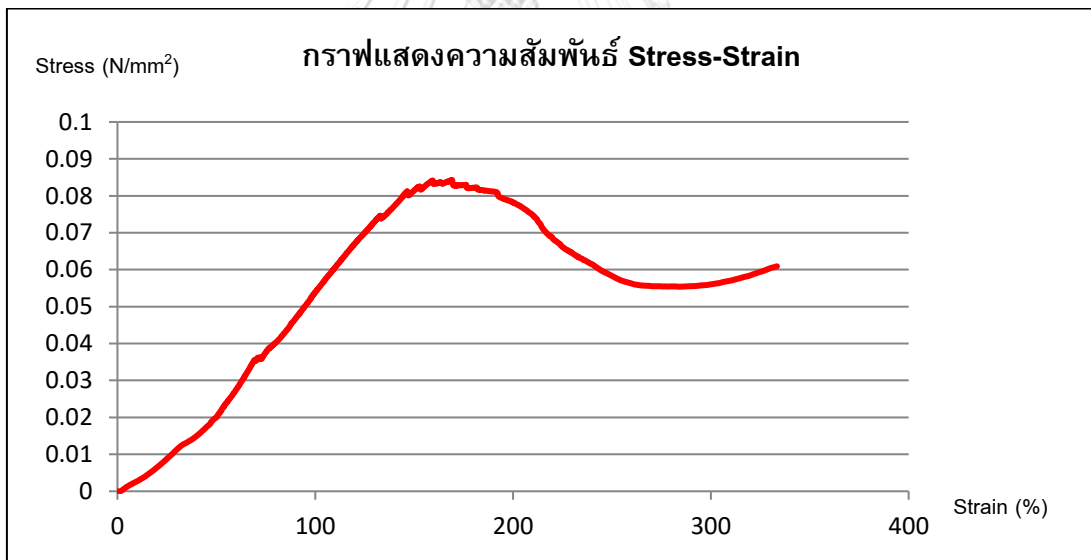
รูปที่ ค.1 แสดง Load- displacement curve diagram สำหรับชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมลวดเหล็ก



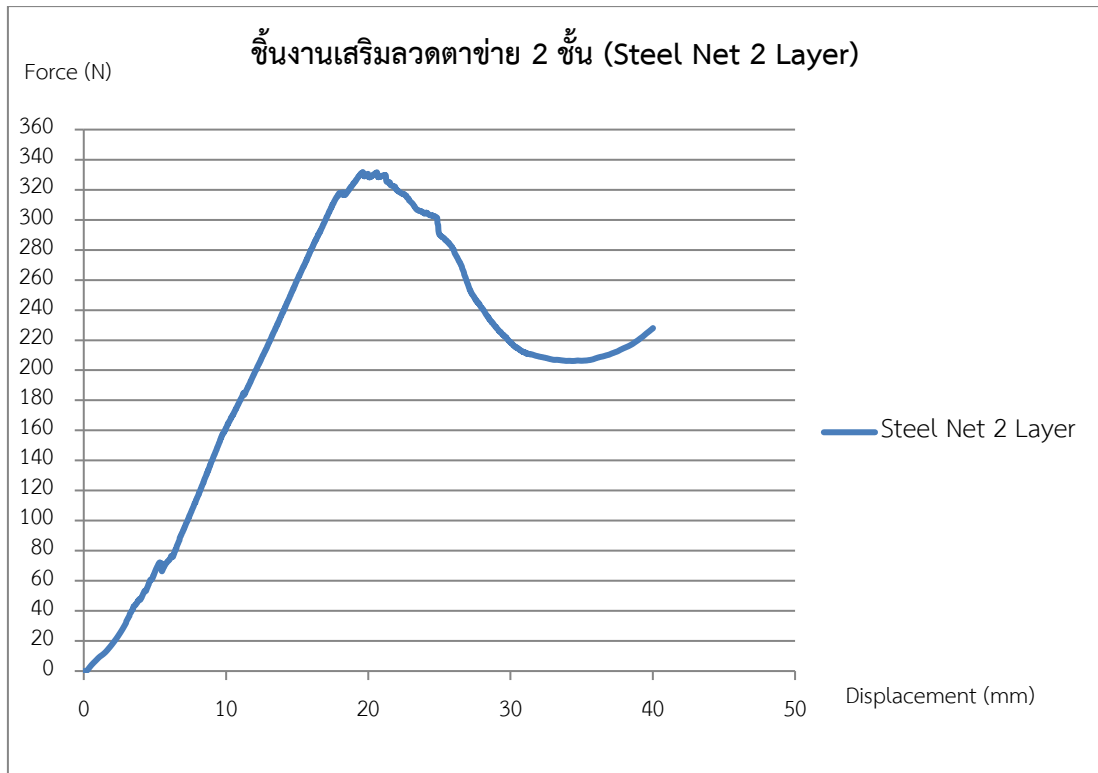
รูปที่ ค.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain สำหรับชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมลวดเหล็ก



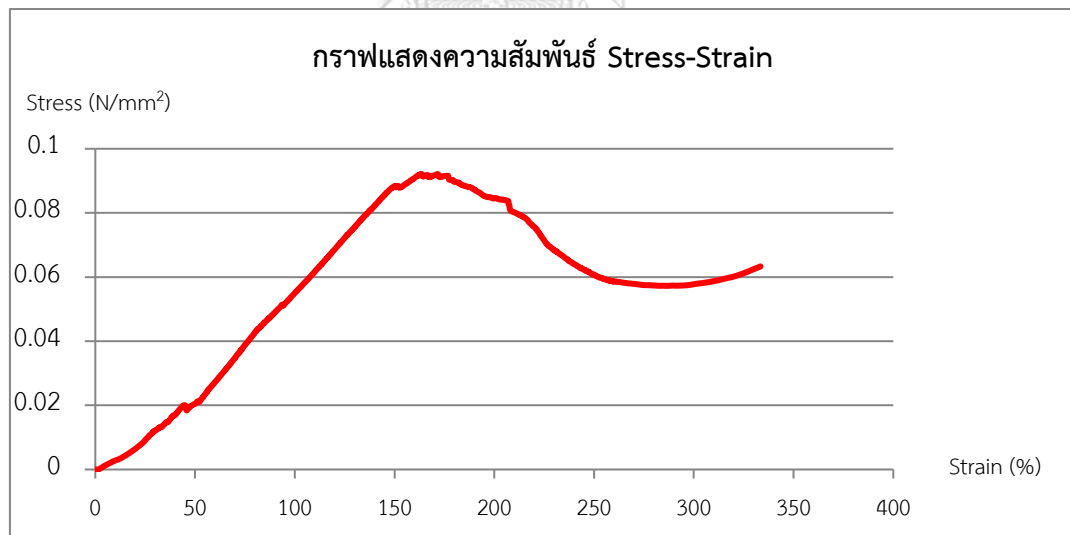
รูปที่ ค.3 แสดง Load- displacement curve diagram สำหรับชั้นงานที่เสริมลวด 1 ชั้น



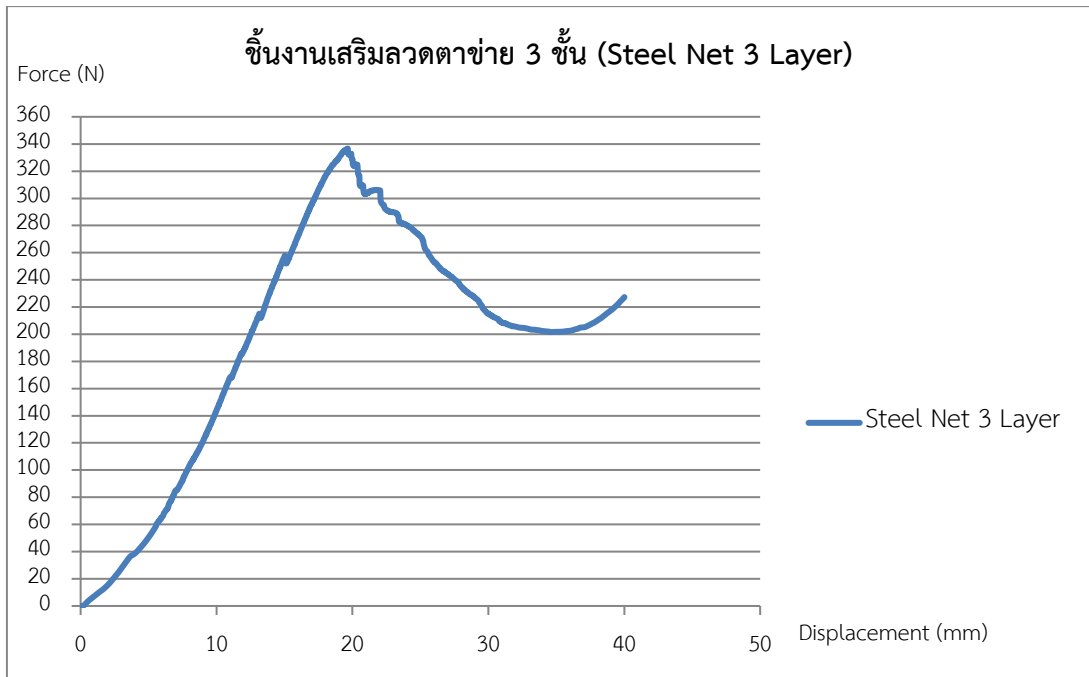
รูปที่ ค.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain สำหรับชั้นงานที่เสริมลวดเหล็ก 1 ชั้น



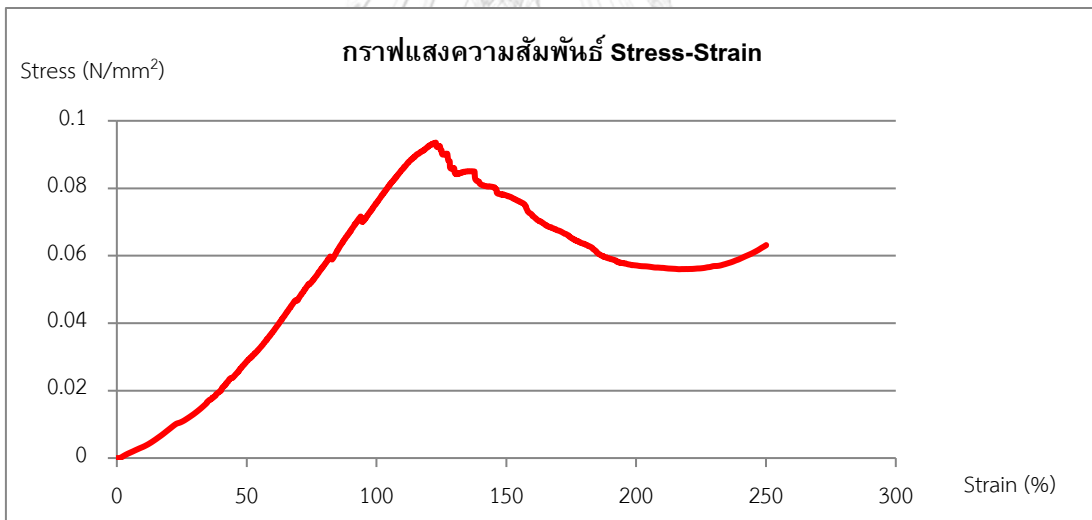
รูปที่ ค.5 แสดง Load- displacement curve diagram สำหรับชั้นงานที่เสริมลวด 2 ชั้น



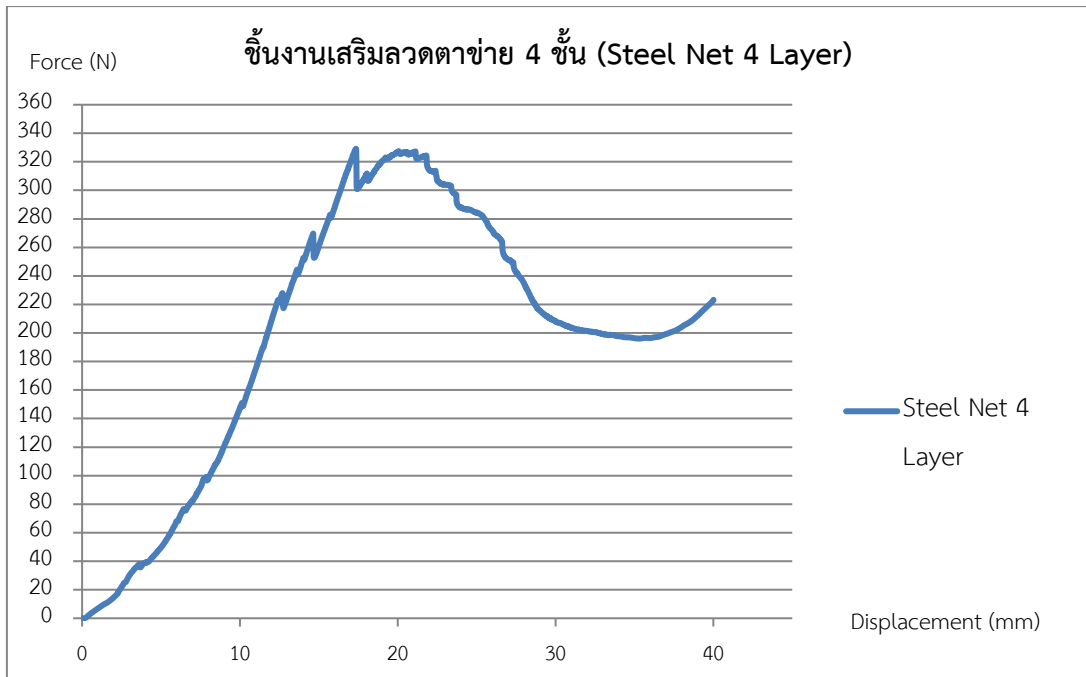
รูปที่ ค.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain สำหรับชั้นงานที่เสริมลวดเหล็ก 2 ชั้น



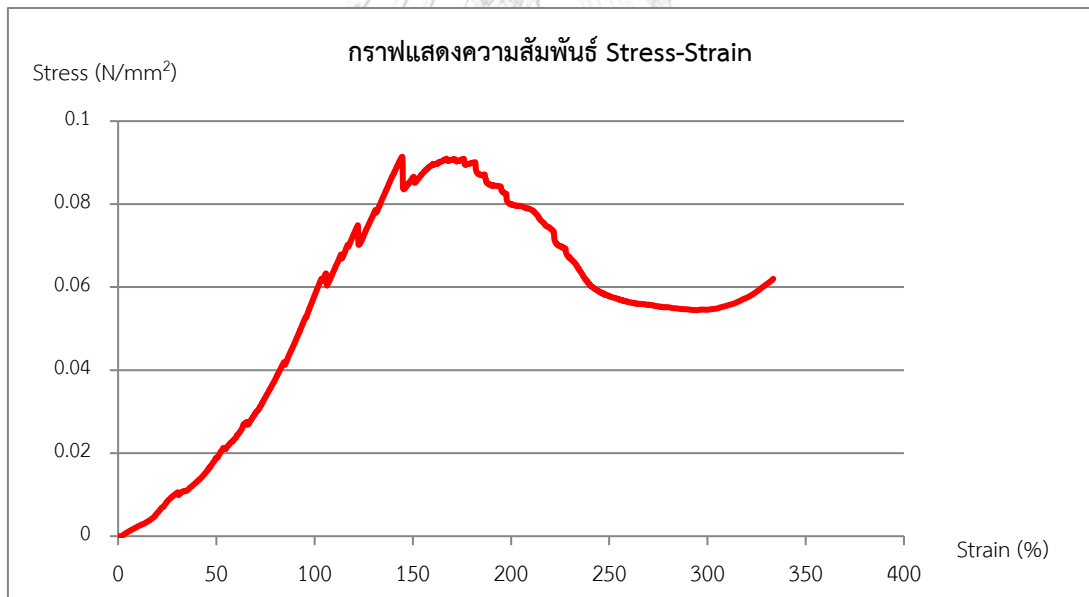
รูปที่ ค.8 แสดง Load- displacement curve diagram สำหรับชั้นงานที่เสริมลวด 3 ชั้น



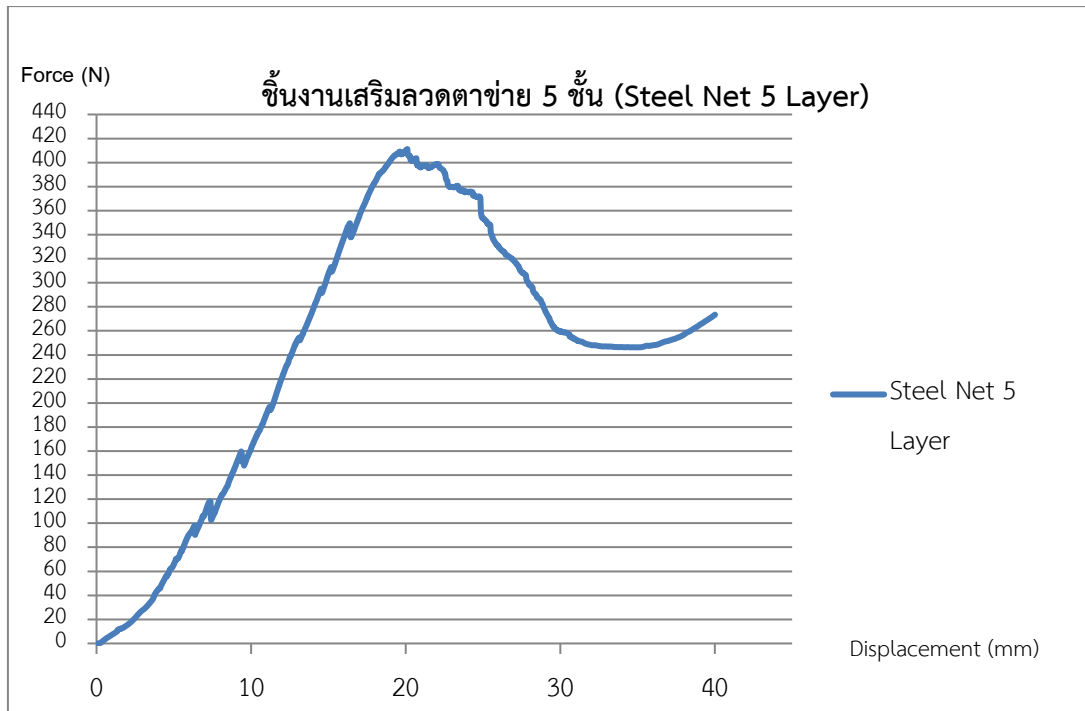
รูปที่ ค.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain สำหรับชั้นงานที่เสริมลวดเหล็ก 3 ชั้น



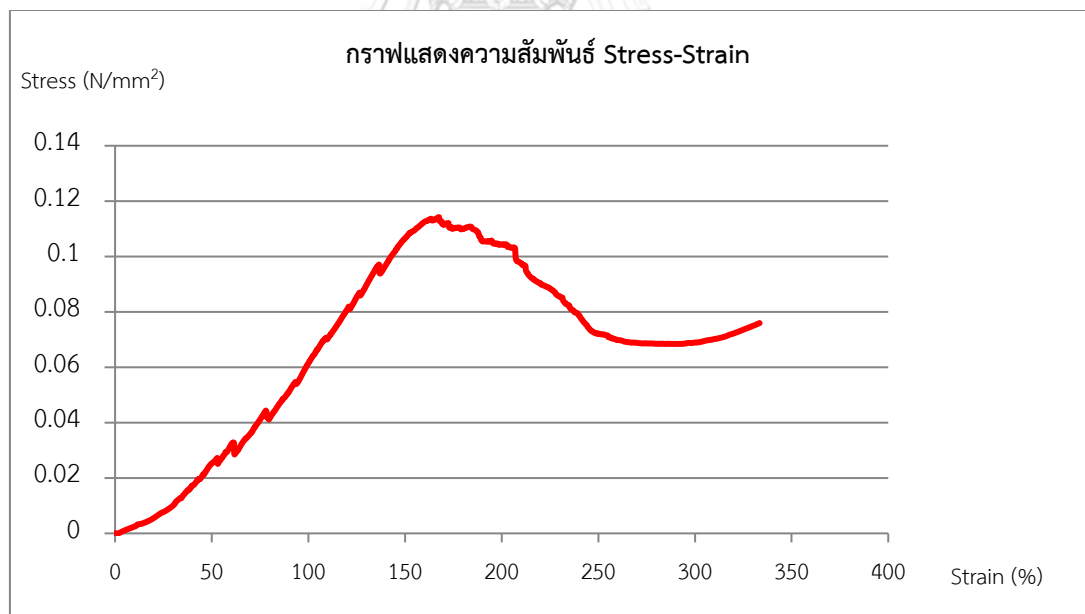
รูปที่ ค.10 แสดง Load- displacement curve diagram สำหรับชั้นงานที่เสริมลวด 4 ชั้น



รูปที่ ค.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain สำหรับชั้นงานที่เสริมลวดเหล็ก 4 ชั้น



รูปที่ ค.12 แสดง Load- displacement curve diagram สำหรับชั้นงานที่เสริมลวด 5 ชั้น



รูปที่ ค.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain สำหรับชั้นงานที่เสริมลวดเหล็ก 5 ชั้น

## ภาคผนวก จ.

## รายการคำนวณ

## ง.1 รายการคำนวณค่าพลังงานการแตกหัก

$$\text{พื้นที่หัวเจาะ} = \text{พื้นที่ทรงกรวย} = \pi r l + \pi r^2 = 7.66 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

r = รัศมีเข็มเจาะ

l = ความยาวรูปทรงกรวย

$$\text{ค่าพลังงานการแตกหัก} = \frac{\text{พลังงานพื้นที่ได้กราฟ}}{\text{พื้นที่ผิวทรงกรวย}} = \frac{9.7}{7.66 \times 10^{-5}} = 126,679.34 \text{ J/m}^2$$

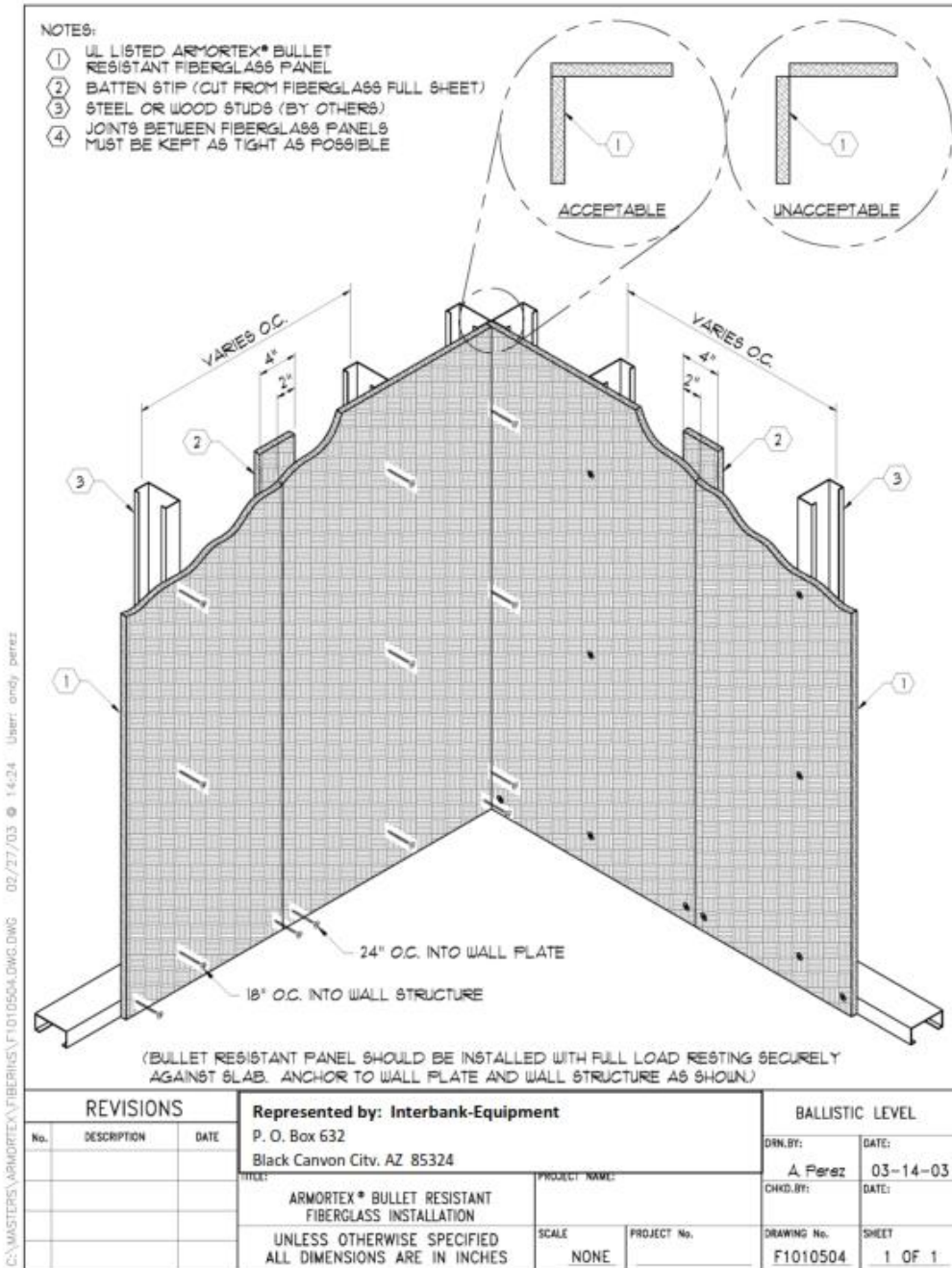
## ง.2 รายการคำนวณสมบัติทางกล

$$\text{ค่ายังมอดูลัส} = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{5,011,111.11}{0.1} = 0.05 \text{ GPa}$$

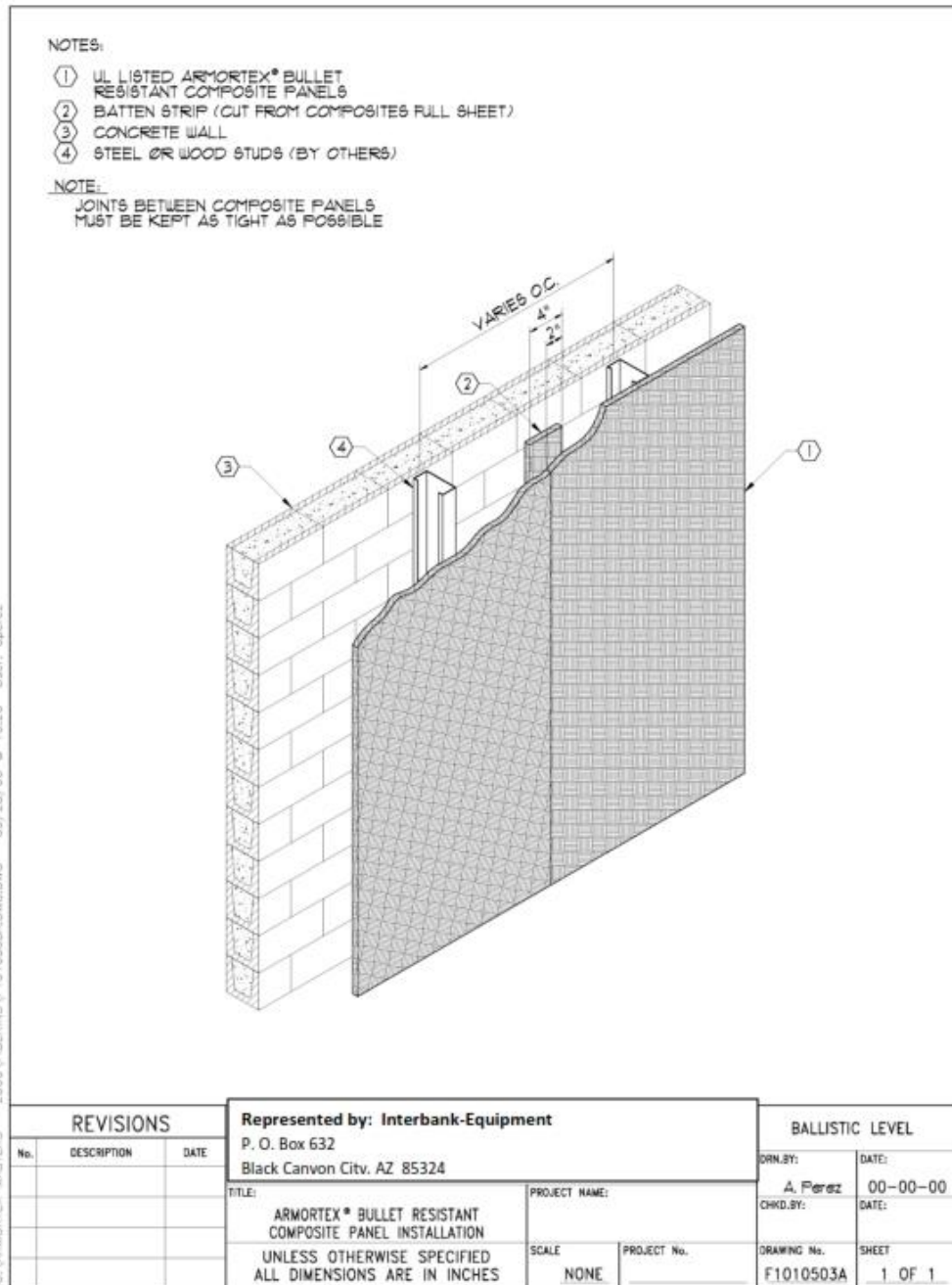


ภาคผนวก จ.

ตัวอย่างการติดตั้งและการใช้งาน



รูปที่ จ.1 แบบตัวอย่างการติดตั้งในกรณีที่ใช้แทนผนัง



รูปที่ จ.2 แบบตัวอย่างการติดตั้งในกรณีที่ใช้ร่วมกับผนังเดิม

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีระนันท์ มาลัยวงศ์ เกิดวันที่ 17 มกราคม 2531 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี จากมหาวิทยาลัยบูรพา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล จังหวัดชลบุรี มีประสบการณ์การทำงานด้านการควบคุมงานก่อสร้าง และงานระบบ หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขา วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาในปี 2559

